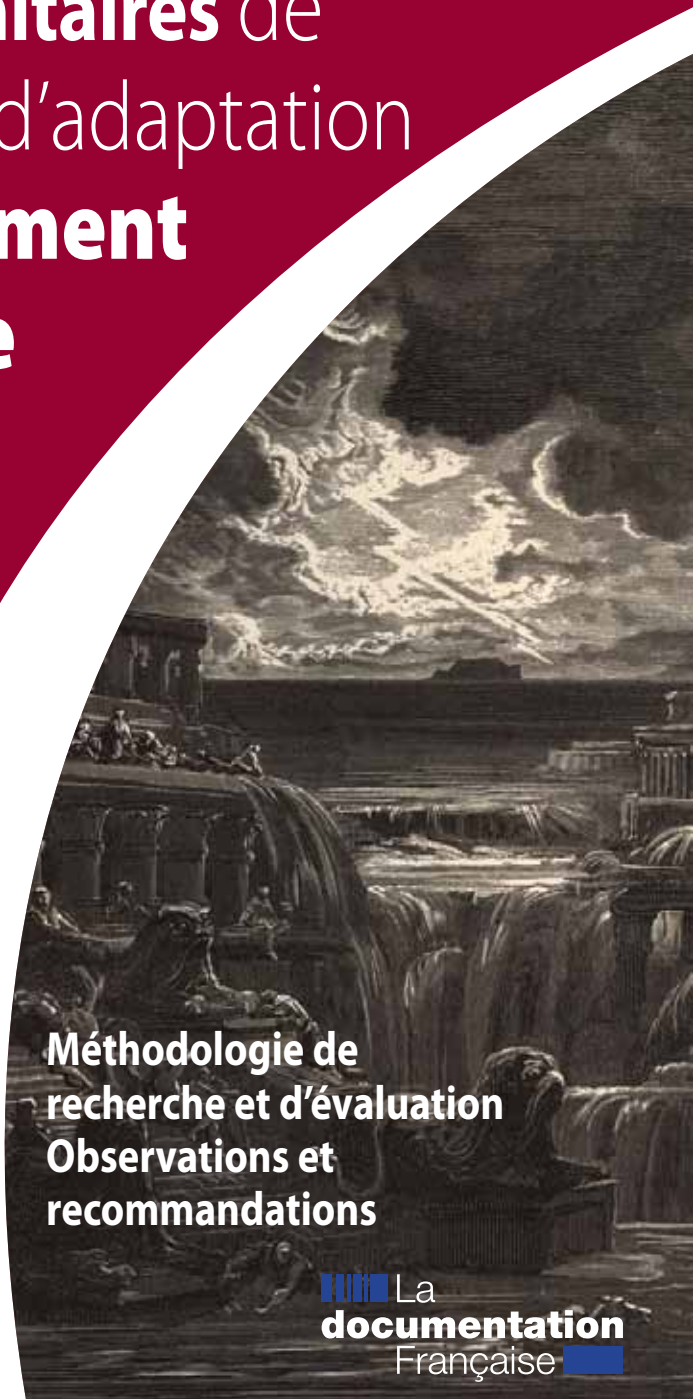


Impacts sanitaires de la stratégie d'adaptation au **changement climatique**

Groupe Adaptation et prospective
du Haut Conseil de la santé publique
Veille santé-climat
Jean-François Toussaint

Collection
Avis et rapports



**Méthodologie de
recherche et d'évaluation
Observations et
recommandations**

Impacts sanitaires de la stratégie d'adaptation au **changement** **climatique**

Méthodologie de recherche et d'évaluation
Observations et recommandations

En application de la loi du 11 mars 1957 (art. 41) et du Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992, toute reproduction partielle ou totale à usage collectif de la présente publication est strictement interdite sans autorisation expresse de l'éditeur.
Il est rappelé à cet égard que l'usage abusif et collectif de la photocopie met en danger l'équilibre économique des circuits du livre.

© Direction de l'information légale et administrative, Paris, 2015

© Haut Conseil de la santé publique

ISBN 978-2-11-01010-82

Pour nous citer :

Haut Conseil de la santé publique

Impacts sanitaires de la stratégie d'adaptation au changement climatique

Paris, Documentation française, HCSP

Impacts sanitaires de la stratégie d'adaptation au **changement climatique**

Méthodologie de recherche et d'évaluation
Observations et recommandations

Groupe Adaptation et prospective
du Haut Conseil de la santé publique

Veille santé-climat

Jean-François Toussaint

Rapport adopté par la Commission spécialisée
« Évaluation, stratégie et prospective » le 29 janvier 2015
et présenté au Collège du Haut Conseil de la santé publique
le 26 février 2015

« S'il n'est pas contrôlé, le changement climatique aura des impacts graves, étendus et irréversibles »

Changements climatiques 2013 : Résumé à l'intention des décideurs, GIEC, Copenhague, 27 octobre 2014

« L'humanité est une entreprise surhumaine »

Jean Giraudoux, Intermezzo, 1933

« On appelle surhumaines les tâches que les hommes mettent longtemps à accomplir, voilà tout »

Albert Camus, L'Été, 1954

« Je tremble, je le confesse, que les citoyens ne se laissent enfin si bien posséder par un lâche amour des jouissances présentes, que l'intérêt de leur propre avenir et de celui de leurs descendants disparaisse, et qu'ils aiment mieux suivre mollement le cours de leur destinée que de faire au besoin un soudain et énergique effort pour le redresser »

Alexis de Tocqueville, De la démocratie en Amérique, 1835

« En apparence, l'homme agit pour son propre compte, en réalité, il subit un vouloir-vivre très supérieur à lui »

Friedrich Nietzsche, Le Gai Savoir, 1882

	Saisine	9
	Composition du groupe de travail et remerciements	11
	Synthèse et recommandations	13
	Introduction	17
CHAPITRE I	Contexte	25
	Le PNACC, Plan national d'adaptation au changement climatique	25
	Changement climatique : observations et projections	27
CHAPITRE II	Bascules et désadaptations	53
	Objectifs d'étude	53
	Éléments de méthodologie	53
	Vulnérabilités	61
CHAPITRE III	Épidémiologie et indicateurs nouveaux	73
	Fluctuations saisonnières de la morbi-mortalité	73
	Un nouveau paysage médical	76
	Maladies émergentes	79
CHAPITRE IV	Analyse des effets par domaine	85
	Cadre	86
	Évaluation des effets sanitaires des actions du PNACC	87
	Analyse des actions et mesures du PNACC	88
CHAPITRE V	Recommandations et arguments	107
	Gouvernance et interdisciplinarité	107
	Territorialité	108
	Veille et communication	109
	Recherche	109
	Conclusion	111
	Références bibliographiques	113
	Annexes	125
	Glossaire	132
	Table des matières	134

Saisine



MINISTÈRE DES AFFAIRES SOCIALES ET DE LA SANTÉ

-3 JAN. 2012

Direction générale de la Santé

Paris, le 19 DEC. 2012

Sous-direction Prévention des risques liés
à l'environnement et l'alimentation
Bureau EA1 Environnement extérieur et produits chimiques
Alice KOPEL
Tél. 01 40 56 50 97
Alice.kopel@sante.gouv.fr

n° 275

Le Directeur général de la santé

A

Monsieur le Président du Haut Conseil
de la santé publique

Objet : Plan national d'adaptation au changement climatique (2011-2015), élaboration d'une méthodologie d'évaluation.

Le Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC) a été adopté par le Gouvernement en juillet 2011. Il couvre les cinq années à venir et comporte de nombreuses mesures visant à se préparer au changement climatique et à limiter les impacts négatifs.

Le plan comprend la mesure 3.1 "Créer un groupe santé-climat au sein du Haut Conseil de la Santé Publique". Le descriptif de la mesure mentionne que le groupe santé-climat aura comme priorité de proposer une méthodologie d'évaluation des choix et des stratégies de remédiation/adaptation au changement climatique et des nouvelles technologies associées, en regard de la santé des individus, des populations et de leur cadre de vie.

En mai 2012, l'observatoire national sur les effets du réchauffement climatique, dans son rapport au Premier ministre et au Parlement sur l'adaptation de la France au changement climatique, a rappelé qu'il s'agissait d'une mesure phare du plan.

Au vue de ce contexte, je souhaite que soit établi un rapport donnant lieu à un avis sur la méthodologie d'évaluation demandée. Les travaux pourront s'appuyer sur l'analyse des mesures du PNACC en regard des effets directs ou indirects du plan sur la santé, l'identification des mesures susceptibles d'avoir des impacts sanitaires potentiels et nécessitant à terme une évaluation approfondie, l'analyse des coûts/bénéfices des mesures choisies en tenant compte de la dimension sanitaire ou toute autre démarche permettant d'évaluer les choix et les stratégies en regard de la santé.

Des propositions et des recommandations de gestion seront formulées : mise en œuvre d'une expertise sanitaire approfondie, poursuite ou réorientation de mesures existantes, définition d'axes de recherches ou études, proposition de mise en œuvre de formations, proposition de mesures de surveillance, saisines des agences de sécurité sanitaire.

Cette mesure a déjà fait l'objet d'une présentation par la DGS en janvier 2012 devant le groupe adaptation et prospective qui avait conclu à la faisabilité du travail demandé.

Mes services se tiennent à votre disposition pour vous apporter tout élément utile à la réalisation de votre expertise. Un état d'avancement fin 2013 et une réponse complète de votre part avant septembre 2014 m'agréeraient.

Le Directeur Général de la Santé,


Dr Jean-Yves GRALL

Composition du groupe de travail et remerciements

Membres

Monique Allès, professeure des universités
Jean-Claude André, directeur de recherche, INSIS, UMR 7274 CNRS-UDL
Geoffroy Berthelot, directeur adjoint de l'Irmes
Éric Billaud, infectiologue, CHU Nantes ; président de la SFLS
Gilles Boeuf, président du Muséum national d'histoire naturelle
Valérie Buthion, maître de conférences, université Lumière Lyon 2
Pierre Chapuy, directeur d'études, Gerpa ; enseignant chercheur, Département innovation et prospective, Cnam
Yves Charpak, vice-président de la SFSP
Laure Com-Ruelle, médecin de santé publique ; directrice de recherche, Irdes
Jean-François Dhote, directeur de recherche, Inra
Hervé Domenach, professeur émérite, université d'Aix-Marseille
Philippe Hartemann, professeur, université de Lorraine
Évelyne Heyer, professeure au Muséum national d'histoire naturelle
Guillaume Lecointre, professeur au Muséum national d'histoire naturelle
Valérie Masson-Delmotte, directrice de recherche, IPSL, CEA
Bernard Swynghedauw, directeur de recherche émérite, Inserm
France Wallet, Service des études médicales, DRH Groupe - EDF Evaluation des risques sanitaires environnementaux

Président du groupe de travail

Jean-François Toussaint, professeur de physiologie, Hôtel-Dieu, université Paris Descartes ; cardiologue, AP-HP ; directeur de l'Irmes, président du Groupe expert HEPA, Commission européenne

Remerciements aux relecteurs

Franck Chauvin, professeur, université de Saint-Etienne
Philippe Cury, directeur de recherche, IRD
Françelyne Marano, professeure, université Paris Diderot
Daniel Nahon, professeur émérite, université Paul-Cézanne, Aix-en-Provence ; directeur général de la recherche, MENRT, 1997-1998
Lise Rochaix, professeure, université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, chaire hospinnomics, PSE-École d'économie de Paris et AP-HP

Remerciements aux personnes auditionnées

Robert Barouki, professeur, université Paris Descartes
Bernard Chevassus-au-Louis, inspecteur général de l'agriculture
Éric Jouglà, directeur de recherche, Inserm
Hugues de Jouvenel, président de Futuribles International
Francelyne Marano, professeure, université Paris Diderot
François Roddier, astrophysicien, professeur émérite

Remerciements aux coordinatrices administratives

Alice Kopel, DGS-EA1
Roberte Manigat, SG-HCSP

Remerciements aux orateurs et intervenants des colloques

« L'Homme peut-il s'adapter à lui-même ? »

organisés par Gilles Boeuf, Bernard Swynghedauw et Jean-François Toussaint
au Muséum national d'histoire naturelle, les 29 et 30 octobre 2010,
avec le soutien du HCSP
http://www.canal-insep.fr/fr/colloque_irmes_mnhn_paris_descartes/02-evolution-seculaire-des-capacites-despece-jf-toussaint
http://www.canal-insep.fr/fr/colloque_irmes_mnhn_paris_descartes/01-ouverture-du-colloque-g-boeuf
et au Collège de France, les 22 et 23 mai 2014
<http://www.college-de-france.fr/site/gilles-boeuf/symposium-2013-2014.htm#|m=#undefined|q=/site/gilles-boeuf/symposium-2013-2014.htm>

Remerciements pour leur contribution et leur éclairage sur ces thèmes à

Jean-Claude Ameisen	Christian Frelin	Jean-François Minster
Arnaud Chaperon	Pierre-Henri Gouyon	Michel Morange
Bernard Chevassus-au-Louis	Claude Grison	Lionel Naccache
Daniel Cohen	Marion Guillou	Daniel Nahon
Yves Coppens	Serge Haroche	Erik Orsenna
Philippe Cury	Chantal Jouanno	Pascal Picq
Boris Cyrulnik	Claudine Junien	Lluis Quintana-Murci
Bruno David	Hervé Le Bras	Hubert Reeves
Jacques Delors	Hervé Le Treut	Ségolène Royal
Philippe Descola	Dominique Lestel	Sylvaine Turck-Chiez
Jean-Pierre Dupuy	Joël Ménard	Cédric Villani
Albert Fert	Gérard Mestrallet	

Hommages

André Lebeau	1932-2013
Jacques Weber	1946-2014

Synthèse et recommandations

Le Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC) a mis en place certains éléments de stratégie générale dont il prévoit lui-même d'apprécier les impacts potentiels sur la vie et la santé des Français. S'inspirant des exercices de prospective, ce rapport ne se résume pas à une prédiction des impacts du changement climatique sur la santé des populations mais il met en évidence les effets sanitaires directs ou indirects des actions planifiées et identifie les mesures nécessitant une évaluation approfondie dans le cadre des interventions choisies.

Il vise ainsi à présenter une synthèse de nos connaissances actuelles sur le changement climatique, et de nos projections quant à son évolution, afin de dégager le contexte futur des conséquences possibles sur la santé humaine, de proposer une méthodologie d'anticipation des stratégies de remédiation ou d'adaptation aux changements en cours, et un mode d'évaluation des nouvelles technologies au regard de la santé des individus et du cadre de vie des populations.

Trois notions importantes se dégagent de ces réflexions.

1. L'action humaine s'inspire beaucoup plus de la reproduction de son comportement standard, en cycles répétés (décrits par les scénarios du « *business as usual* »), que des raisonnements issus de la somme colossale de savoirs accumulée dans les dernières décennies.
2. L'espoir de modifier ce comportement médian ne peut venir que de l'analyse anthropologique et de la mise en lumière des raisons fondamentales qui poussent l'humanité à agir ainsi qu'elle le fait. Dans ce domaine, seules de très longues séries temporelles mettent en évidence les variations significatives, d'ordre technique, sociologique ou physiologique, qui dévoilent nos marges d'adaptation. C'est donc dans ce registre qu'il nous faut élargir rapidement nos bases de connaissances et d'expertise.
3. Notre compréhension se fonde encore trop souvent sur des modèles linéaires que les analyses réductionnistes simplifient abusivement. Sans doute nous

faudra-t-il désormais tenir compte des avancées dans les domaines des algorithmes naturels et de la complexité pour fonder une science des interactions qui nous révèle les clefs de nos dépendances et nous éveille à la réalité du monde.

Recommandations

Gouvernance et interdisciplinarité

- Mettre en place un plan de gouvernance de très long terme sur le sujet santé-climat.
- Inscrire le suivi des interrelations climat-santé dans les objectifs des plans de santé publique (PNSE), de la recherche et de la tenue des indicateurs (Drees).
- Créer un groupe interministériel de suivi des mesures climat-santé et des indicateurs sanitaires dédiés à cette surveillance.

Territorialité

- Intégrer les facteurs de vulnérabilité, tels que le vieillissement des populations et leur niveau de résilience, dans l'anticipation de marges d'adaptation plus réduites.
- Travailler sur l'architecture et les infrastructures, dans un contexte d'urbanisme et de santé, afin de réduire notamment les impacts les plus forts (ex. : conception et gestion des bâtiments, îlots de chaleur, zones boisées en ville...).
- Réduire l'impact et l'utilisation des énergies carbonées, notamment par le biais du développement des mobilités actives en milieux urbain et rural.

Veille et communication

- Créer des observatoires croisés : climat, biodiversité, risques sanitaires.
- Associer aux objectifs de la nouvelle structure de prévention « Santé Publique France », résultant de la fusion de l'Institut national de prévention et d'éducation pour la santé (Inpes), de l'Institut de veille sanitaire (InVS) et de l'Etablissement de préparation et de réponses aux urgences sanitaires (Eprus), la surveillance des interactions climat-santé.
- Intégrer ces risques aux objectifs des directions de communication et de prévention sanitaires de cette nouvelle structure, dans le cadre de ses futurs programmes.

Recherche

- Développer les recherches en adaptation et les programmes ciblant les interactions non linéaires au sein des systèmes complexes.
- Promouvoir la recherche sur la connaissance des services écosystémiques et sur les interactions climat-biodiversité-santé humaine.
- Proposer des programmes ANR (Agence nationale de la recherche) interdisciplinaires croisés entre santé, climat, technologie, pollutions et économie.
- Développer les outils de mesure et les études d'impact économique et sanitaire, et préciser les impacts économiques en évaluant la nature des rapports coût/bénéfice une fois considérée la non-linéarité des interactions.
- Intégrer les études portant sur l'écologie de la santé dans le cursus universitaire.

Introduction

Les interactions perpétuelles entre climat, agriculture, biodiversité, économie, énergie, démographie modulent la prospérité de nos sociétés et leur résilience [1]. Au cours des deux derniers siècles, de multiples avancées technologiques ont permis de réduire considérablement nos contraintes environnementales. Ces changements ont eu jusqu'à présent des conséquences bénéfiques pour l'espèce humaine : diminution de la fréquence des grandes famines par augmentation de la production agricole et du transport de marchandises, maîtrise des maladies infectieuses et réduction de la mortalité infantile sur une grande partie du globe, amélioration de la qualité et de la durée de vie. La *technè* soutient encore *Habitis*.

Cependant l'activité humaine, qui a permis ces avancées, a également entraîné des effets secondaires non prévus : modification de la composition atmosphérique liée à la combustion des énergies fossiles et à la production d'autres gaz à effet de serre (GES), réchauffement et augmentation des événements climatiques extrêmes (précipitations, vagues de chaleur et sécheresses prolongées) [2], acidification des mers et des océans, surpêche, pollutions et érosions des sols, déforestation, réduction de la biodiversité et accélération du rythme d'extinction des espèces [3]. L'homme, en créant de nouveaux déséquilibres, est devenu le principal facteur du changement de son environnement [4].

On constate d'ailleurs aujourd'hui l'absence d'un pilotage effectif des choix techniques, la difficulté à poser les conditions d'un dialogue durable sur ces options (nanotechnologies, nucléaire, biologie de synthèse...). De plus en plus souvent, seul le marché guide le changement économique et fait évoluer la société, les tentatives d'adaptation des politiques publiques à la réalité socio-économique mondialisée ne visant plus que l'emploi ou la croissance du PIB (produit intérieur brut).

Telle qu'elle prévaut dans les pays développés, notre conception de la santé humaine (état de « complet bien-être ») et des perturbations qui conduisent aux maladies est particulièrement trompeuse. Bardés de nos illusions d'un progrès continu, nous n'intégrons pour l'instant que très peu les régulations systémiques et les contraintes environnementales parmi les risques qui pèsent sur la santé et la survie des populations [5]. Or de très nombreux facteurs de santé résident dans notre environnement et dépendent de la qualité de nos échanges avec lui. La santé

collective d'une population est aussi l'expression des relations écosystémiques sous-jacentes.

Cette perspective populationnelle s'est trouvée incidemment reléguée au second plan à la fin du siècle dernier avec la montée en puissance d'un modèle médical fondé sur un rythme étonnant de découvertes scientifiques et le développement des biotechnologies qu'elles ont permis. Ces avancées ne doivent cependant pas masquer les mécanismes fondamentaux qui, bien que n'ayant jamais cessé d'exister, réapparaissent maintenant en pleine lumière. L'augmentation des perturbations actuelles, auxquelles l'homme concourt au premier chef [6], présente des risques mal perçus pour la santé des populations humaines, dont certains pourraient être irréversibles. Les impacts sanitaires toucheront des populations entières par des voies parfois directes, mais plus souvent diffuses, et dans des délais incertains. Il importe donc de les comprendre pour anticiper leurs effets globaux, d'autant que, des pôles aux forêts tropicales, la vitesse des changements actuels dépasse le plus souvent les modèles de suivi développés [7].

Par ailleurs, tandis qu'apparaissent de nombreux signes de saturation [8], révélant les limites de notre croissance [9], le vieillissement des populations crée les conditions de nouvelles vulnérabilités, dans les pays développés [10] comme dans les pays émergents¹. Autre circonstance à prendre en compte, le contexte économique de plus en plus contraint, en Europe et dans le monde, ne permettra pas d'accéder durant ces prochaines décennies à toutes les options d'atténuation initialement envisagées. De fait, nos principales activités progressent de moins en moins : de récessions en fractures politiques, de l'émergence de maladies nouvelles aux premiers reculs de l'espérance de vie, le plafonnement devient chaque jour plus évident. La saturation de nos capacités pose la question de leur limite naturelle mais elle éprouve aussi nos marges d'adaptation devant la complexité des risques cumulés [11].

Ces contraintes et ces changements révèlent nos difficultés d'adaptation [6], d'ordre énergétique et alimentaire notamment. Notre système actuel de production agricole arrive lui aussi à saturation du fait, entre autres, de l'inadaptabilité des variétés sélectionnées dans les dernières années [12] au regard de la vitesse de changement des conditions environnementales (appauvrissement des sols, mésusages de l'eau, pressions d'urbanisation s'ajoutant aux contraintes climatiques...). Et si la dégradation des conditions climatiques, désormais moins favorables, vient à réduire les rendements des cultures vivrières indispensables à la subsistance locale, alors augmenteront les risques de pénurie alimentaire, la prévalence de la dénutrition, les troubles du développement des enfants concernés et, par une boucle de rétroaction cliniquement établie, une susceptibilité accrue aux infections en raison de systèmes immunitaires affaiblis. Le développement, le moral et la stabilité des populations en seront affectés, marquant les impacts négatifs de l'Anthropocène sur la santé humaine.

1. Selon Moody's Investor Service, le vieillissement de la population pourrait réduire la croissance économique annuelle globale de 0,4 point d'ici cinq ans, et de 1 point d'ici 2025.

Un facteur complémentaire révèle d'autres limites naturelles face aux changements climatiques : la lenteur des migrations de certaines espèces [13-15], qui entraîne un rétrécissement des biotopes usuels d'échange, concourt à la disparition de chaînes trophiques [16], principales sources de résilience [17, 18], et réduit les contours de la biodiversité, y compris souterraine [19], dont dépend tant la qualité de nos productions agricoles.

L'urbanisation, qui majore ou entretient certaines de ces conditions, expose aussi à de nouveaux risques liés à la concentration des personnes, à la présence de toxiques — dans les airs, les eaux, les sols — résultant de la consommation énergétique et de la production chimique ou de déchets. Et si ces risques diminuent parfois dans certaines cités lorsque des décisions sont prises pour réduire l'impact des industries et du trafic automobile [20], de nouveaux problèmes surgissent liés à des effets de bascule systémique déjà en cours. Lors des vagues caniculaires par exemple, les îlots de chaleur, où s'est concentré le plus grand nombre de décès en 2003, résultent de l'élévation de la température ambiante et surtout de son renforcement dans les quartiers sans arbres, où sols, murs et asphaltes amplifient l'effet thermique, en particulier nocturne [21]. Durant ces périodes, les perturbations des régulations thermiques exposent aussi les salariés d'entreprise à des troubles du jugement, à des problèmes de sécurité autant qu'à des défauts de productivité [22].

Un risque additionnel est lié aux conditions de vie urbaine qui, amplifiées de génération en génération, finissent par déconnecter les citoyens de la compréhension des principes du vivant et les privent de repères essentiels tandis que le monde redevient un univers de contrainte croissante. La contradiction enfle chaque jour. Mais le risque le plus sérieux provient de l'affaiblissement, voire de la rupture des systèmes fondamentaux sur lesquels repose le vivant lui-même. Nombre de ces impacts indirects résulteront de la perturbation de processus régulant des systèmes complexes (les eaux de ruissellement, les chaînes agroalimentaires, le recul du trait de côte ou l'équilibre entre agents infectieux...). L'altération des clefs de voûte de ces systèmes modifiera très certainement le comportement des populations. Ce type de contraintes, et leurs conséquences, pourrait être à l'œuvre sur le pourtour méditerranéen, où les émeutes de la faim ont précédé de trois ans les printemps arabes et où la gestion des ressources, en particulier de l'eau, joue un rôle historique dans les affrontements en cours, importés au cœur même de nos sociétés.

L'ensemble des progrès humains a souvent été qualifié de transition : épidémiologique (les principales causes de mortalité évoluent vers les maladies dégénératives), nutritionnelle (doublement des apports quotidiens, riches en graisses et en sucres), agricole (décuplement des rendements) ou démographique (réduction initiale des mortalités, suivie une génération plus tard d'une réduction de la natalité). Toutes ces transitions résultent d'abord d'une exploitation énergétique considérable. Elles reposent sur l'exploitation des réserves fossiles et voient leur taux de croissance maximale au milieu du XX^e siècle. Le passage par un pic de production pétrolière mondiale dans les dernières années [23, 24] questionne déjà nos marges de développement.

Par ailleurs, l'utilisation actuelle d'insecticides et d'antibiotiques provoque l'émergence et sélectionne de nouvelles espèces infectantes [25, 26] entraînant des pathologies inédites – végétales, animales ou humaines (tuberculose ultrarésistante, SARM²...) [27-29] – auxquelles nous ne semblons pas particulièrement préparés [30]. Or ces agents pathogènes dépendent aussi de l'état de l'environnement, qui conditionne leur abondance et leur répartition géographique. Dans des milieux jusque-là indemnes, des conditions climatiques altérées faciliteront l'introduction, la multiplication et la virulence de vecteurs nouveaux. S'y ajoutent d'autres risques : de nouvelles maladies infectieuses émergent depuis trente ans alors que des maladies anciennes – comme la tuberculose – reviennent, liées aux situations de grande précarité [31], à la densité urbaine ou à la mondialisation des transports et des flux [32]. De même, l'émergence d'une transmission autochtone du virus du chikungunya dans le sud de la France, ou l'extension des réservoirs de *Yersinia pestis* chez les rongeurs, vecteurs des grandes pestes historiques, sous l'effet du réchauffement [33] pourraient traduire l'impact des fluctuations climatiques sur l'apparition de nouvelles épidémies. Or, dans le même temps, les résistances bactériennes et virales ne cessent d'augmenter alors que notre arsenal thérapeutique (antibiotique notamment) ne progresse plus [34, 35] et que de plus fréquentes résistances des diptères aux insecticides apparaissent et facilitent la propagation de ces agents. Cette situation préoccupante annonce pour certains le début d'une nouvelle transition épidémiologique, à rebours de la précédente.

Ces changements auront enfin un impact direct sur l'ampleur et le rythme de la mortalité causée par les canicules, dont l'effet est majoré dans les grandes agglomérations et favorisé par le vieillissement des populations [36]. Dans ce contexte, l'espérance de vie moyenne reste l'un des meilleurs indicateurs, témoignant des efforts d'une société qui cherche à préserver ses richesses humaines, sociales et environnementales et permet à ses concitoyens de maintenir la dignité de leur condition humaine. Préserver cet acquis tout en réussissant la prochaine transition énergétique est un défi considérable vis-à-vis de nos capacités adaptatives et demeure l'une des plus grandes questions de notre évolution. Car l'espérance de vie commence à montrer des signes d'essoufflement dans de nombreuses régions du monde et parmi les populations les plus avancées [37]. Trois pays parmi les plus développés ont ainsi vu au moins l'un de leurs grands indicateurs démographiques plafonner récemment. Aux États-Unis, les premiers signes sont apparus chez les Euro-Américaines [38], premier groupe à atteindre ses possibles limites, tandis qu'au Japon, longtemps en tête de tous les classements, les mêmes plafonds commencent à s'établir, chez les femmes comme chez les hommes [39]. Quant à la France, le taux annuel de progression de l'espérance de vie des femmes a chuté de 80 % en à peine deux générations et a même stagné trois années de suite, entre 2011 et 2013³.

2. *Staphylococcus aureus* résistant à la méthicilline.

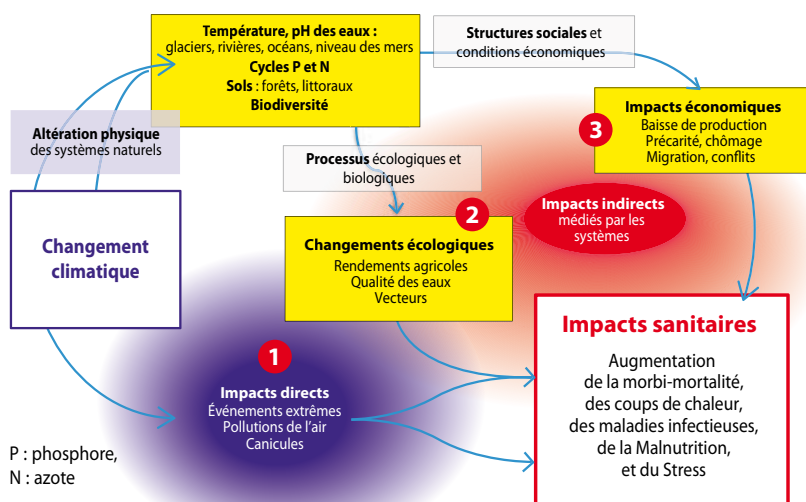
3. Passant de douze mois en 1950 à sept semaines actuellement selon l'Insee.
http://www.insee.fr/fr/themes/tableau.asp?reg_id=0&ref_id=NATnon02229

L'évaluation de ces phénomènes et la compréhension de leurs interdépendances seront déterminantes pour préparer notre pays aux conditions environnementales de ce siècle et des suivants. L'analyse prospective permet d'anticiper d'autres changements, sans doute plus importants encore, mais les efforts de recherche vers des options durables semblent encore trop souvent négligés [40].

Par ailleurs, les vagues de chaleur plus fréquentes et plus intenses entraînent dès à présent de plus grandes variations de la production céréalière mondiale, amplifiées par la spéculation. Mais si des sécheresses catastrophiques ont déjà touché les grands pays producteurs (Russie en 2010, États-Unis en 2012, Inde et Argentine en 2013), les interactions géopolitiques s'invitent désormais comme un autre grand risque dans le concert des nations, avec des répartitions plus complexes et plus incertaines à l'échelle du globe [figure 1].

Figure 1

Voies par lesquelles le dérèglement climatique affecte la santé humaine



Certaines voies sont directes, voire immédiates (1). Beaucoup sont, et deviendront de plus en plus, indirectes (2, 3) et médiées par des ruptures des cycles biophysiques, écologiques, sociaux, économiques et géopolitiques.

Source : adapté des travaux de McMichael A.J., 2014 [41].

Les modèles évolutifs intègrent la plupart des processus physiques du climat où chacun cherche à s'adapter, même partiellement, aux changements environnementaux qu'il engendre [6]. Pour être correctement anticipées, ces rétroactions importantes doivent être modélisées en tenant compte des dynamiques homme-environnement. Et, à mesure que nous faisons le bilan des bouleversements climatiques en cours, des altérations profondes des ressources ou de la biodiversité, il nous faut aussi évaluer la façon dont les gens changent face au climat qu'ils sont eux-mêmes en train de changer [42].

Confrontés à la hausse du niveau des mers ou aux sécheresses récurrentes, les citoyens modifient leurs comportements. Et, quels que soient l'efficacité des politiques d'atténuation ou l'impact des mesures de transition énergétique, les sociétés évolueront dans un environnement plus chaud. Pour éviter des conditions de grande précarité, hommes et femmes se déplacent déjà selon les gradients de ressources et de richesses — et, parfois, de température — vers les pays émergents ou développés. Avec le réchauffement, ce phénomène s'amplifiera et la croissance démographique, l'urbanisation, les migrations [43] et les conflits [44] ne peuvent qu'accentuer les conséquences physiques, sociétales et sanitaires des hausses de température.

Des statistiques peuvent être tirées de données déjà existantes, telles que les bases compilées par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) ou l'Organisation des Nations unies (ONU). D'autres peuvent provenir d'outils moins classiques : ainsi l'analyse des données de plus de cent mille téléphones portables montre que les distances parcourues par leurs utilisateurs ne sont pas aléatoires, mais suivent un schéma simple, commun à d'autres espèces [45]. D'autres études montrent une incidence plus élevée de conflits depuis 1950 entre des communautés en situation de changements climatiques [44].

Il faudra également savoir quelles combinaisons de paramètres pourront servir d'indicateurs à ces différents comportements. La dynamique décisionnelle et l'émergence des comportements permettent de mieux comprendre les tendances : individuellement, on peut agir de façon rationnelle à court terme mais, du fait d'une constitution neuronale commune, agir communément sur le long terme puis finir par détruire nos ressources partagées [46]. Et même l'information la plus précise, la plus actualisée ne suffit parfois pas à prendre la décision la plus pertinente. Il sera donc aussi important de comprendre comment les décisions individuelles se combinent à travers les réseaux (physiques ou numériques) pour conduire à ces comportements résultants, et trouver quelle structure sociale (gouvernement, parti, quartier, association...) exerce la plus grande influence.

De nombreuses solutions techniques sont possibles. L'une d'entre elles est une approche opérationnelle basée sur la notion d'agent — équivalent numérique d'un individu. Des millions d'agents peuvent être codés avec leur âge, leur revenu ou tout autre paramètre phénotypique, et leurs interactions étudiées selon des règles simples. Dans des systèmes auto-organisés, les réponses complexes de tels groupes apparaissent alors (ce qui a notamment révélé le schéma de propagation de certaines épidémies [32]). Des méthodes d'estimation, bayésiennes ou non, peuvent alors être utilisées pour préciser les paramètres qui contribuent le plus aux comportements de groupe, indiquant les probabilités de réponses émergentes les plus communes.

Trois éléments seront nécessaires pour modéliser les réactions humaines aux changements climatiques : un cadre conceptuel cohérent, le recueil de données fiables et l'intégration de recherches interdisciplinaires. La collaboration entre mathématique, informatique, sciences naturelles et sociales, sciences de l'ingénieur

devrait être facilitée. Avec autant de facteurs, de nouvelles approches seront nécessaires aux côtés des méthodes classiques, sur un large éventail spatial et temporel (par le biais des médias sociaux, d'enquêtes de grande envergure ou de données de localisation) et avec un degré suffisant d'intégration, de stockage et d'analyse de ces très grands volumes.

L'exploitation des données relatives aux personnes posera des problèmes juridiques et des questions de respect de la vie privée qu'il faut envisager dès à présent. Les entreprises, les établissements de recherche et les gouvernements devront se mobiliser pour mettre en place ces recueils de données importants, impliquant secteurs public, privé et bénévoles.

Enfin, chacun sera alors confronté à un dilemme éthique : le souci de justice questionne en effet les efforts qu'une société tente de réaliser pour augmenter encore son confort et son espérance de vie, selon l'énergie dont elle dispose et la dimension de ses emprunts à l'environnement. Mais la justice demande aussi un équilibre entre bénéfices et risques, une proportionnalité des actions et la réduction de certaines inégalités. Or la vitesse de nos connections planétaires projette de plus en plus violemment l'idée que nos tentatives actuelles de survie présentent un risque systémique majeur pour nous comme pour les générations futures (sans même tenir compte des « non-humains »). La conception rénovée d'une justice adaptée doit donc tenir compte de ces déséquilibres pour nous permettre d'agir en dépassant les frontières et les générations.

Les modélisations – du climat et des interactions précédemment décrites – permettront d'explorer plus précisément les différents scénarios évolutifs et leurs conséquences sanitaires⁴. Le PNACC a initié une partie de ces réflexions et a proposé des pistes pour tenter de remédier aux impacts de premier degré. Il faut désormais y intégrer de façon plus complète l'ensemble des boucles rétroactives et les effets sanitaires de long et de très long terme [40] pour mieux anticiper l'avenir car les changements qui nous assaillent perturbent nos représentations du monde. Économiques, écologiques, infectieux ou politiques, ces changements remettent en cause certains modèles dont nous nous étions jusqu'alors inspirés. Il nous faut donc comprendre la globalité de leurs effets sur la santé et sur la survie pour envisager sereinement toutes les options.

4. « Un degré de température supplémentaire équivalait à 3 % de mortalité selon une progression linéaire. Or nous avons connu une progression exponentielle. Cela a totalement explosé. Nous étions complètement à côté de la réalité. » Jean-François Mattei, audition devant la Commission d'enquête sur la canicule, Assemblée nationale, 25 novembre 2003.

Contexte

Le PNACC, Plan national d'adaptation au changement climatique

À la suite des travaux du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), deux stratégies ont été développées en France : une stratégie ciblant la réduction des émissions de gaz à effet de serre, et une stratégie de préparation à l'adaptation afin de réduire les effets néfastes du changement climatique, voire d'exploiter certaines opportunités encore potentiellement bénéfiques.

La stratégie nationale d'adaptation a pour objectif de préparer le territoire aux bouleversements induits par le changement climatique. Elle a été élaborée en 2006 dans le cadre d'une concertation menée par l'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (Onerc⁵), impliquant les différents secteurs d'activités et la société civile. Elle identifie quatre grandes finalités : sécurité et santé publique, aspects sociaux, limitation des coûts, préservation du patrimoine naturel. Un groupe de travail « Impacts du changement climatique, coûts associés et pistes d'adaptation » associant différents départements ministériels et de nombreux experts, piloté par le ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE) et l'Onerc, s'est réuni afin de préciser les actions concrètes à mettre en œuvre. Les rapports, publiés en 2008 et 2009, et les recommandations formulées ont constitué le socle de l'élaboration du PNACC [47] demandé par la loi du 3 août 2009 sur la programmation de mise en œuvre du Grenelle de l'environnement (article 42). Ce plan comporte vingt thèmes [figure 2] déclinés en quatre-vingt-quatre actions portées par plusieurs ministères, agences ou organismes publics. Au sein de thèmes comme l'agriculture, la forêt, les infrastructures de transport, la montagne, des actions telles que promouvoir une agriculture efficiente en eau, adapter les ressources génétiques forestières, étudier la vulnérabilité des réseaux de transport, modéliser les évolutions d'enneigement, ont été inscrites. Le plan, couvrant la période 2011-2015 [figure 3], a été adopté par le gouvernement en juillet 2011. Le rapport d'évaluation à mi-parcours du PNACC a été présenté au Conseil national de la transition écologique (CNTE) le 16 janvier 2014.

5. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Impacts-et-adaptation-ONERC-.html>

Figure 2

Les vingt thèmes du PNACC

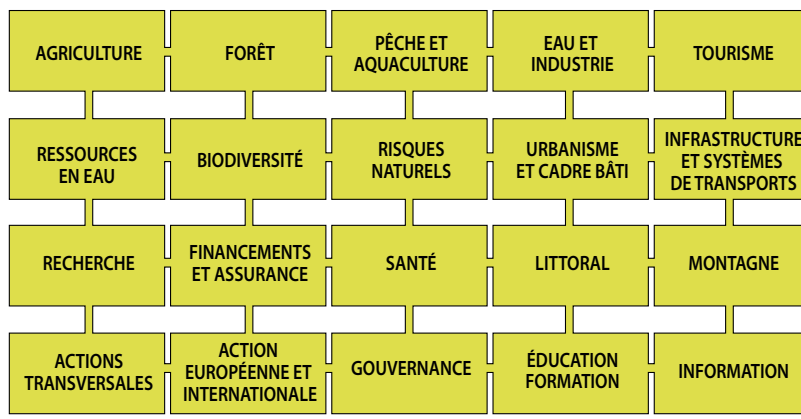
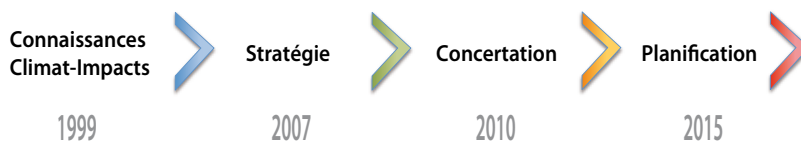


Figure 3

Démarche MEDDE-Onerc d'adaptation au changement climatique⁶



Une fiche d'actions relative à la santé a été inscrite dans ce plan. En effet, la question des risques sanitaires liés au changement climatique, exacerbés ou nouveaux, a fait l'objet de plusieurs rapports au niveau national [48-50]. En novembre 2009, le Haut Conseil de la santé publique (HCSP) a rendu un avis relatif aux risques sanitaires liés aux effets du changement climatique [51]. Il s'agissait d'identifier les conséquences prioritaires à l'horizon 2025 et de formuler des recommandations en termes d'actions de prévention et d'amélioration des connaissances.

Le HCSP faisait le constat que les conséquences sanitaires éventuelles du changement climatique sont multicausales et ne peuvent être convenablement interprétées qu'en les replaçant dans leur contexte (démographique, social, économique, etc.), que 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 – et que la France métropolitaine doit s'attendre à une exacerbation de certains risques existants ainsi qu'à une modification des zones géographiques concernées (du sud vers le nord, des plaines vers les hauteurs). Même si les changements climatiques toucheront très différemment les divers milieux socioéconomiques, culturels et géographiques

6. Disponible sur <http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Demarche-.html> (consulté le 27/02/2015).

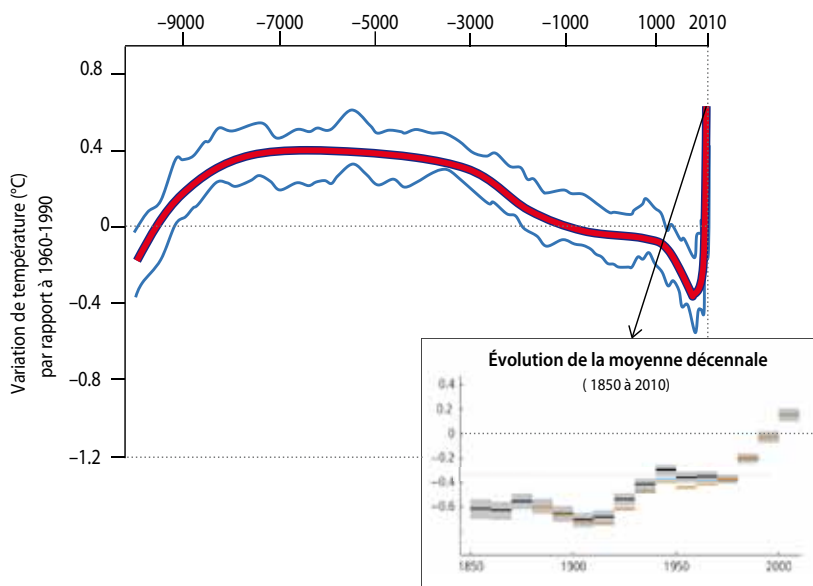
nationaux [52], la France d'outre-mer, essentiellement tropicale, peut s'attendre à une augmentation des risques infectieux, à une augmentation des événements météorologiques extrêmes et à des phénomènes migratoires à partir de pays voisins plus pauvres. Dans son avis, le HCSP listait les actions et les recherches prioritaires à mettre en œuvre dans le domaine de la santé. Ces recommandations ont été incluses dans la fiche santé du PNACC. Cinq actions principales sont ainsi inscrites : recherche en santé-climat, surveillance des facteurs de risque, évaluation des risques, développement d'actions de prévention et de communication sur les risques [voir chap. IV, domaine 13 Santé, p. 104].

Au niveau régional et local, les schémas régionaux climat air énergie (SRCAE), les plans climat énergie territoriaux (PCET) ont été mis en œuvre, dispositifs de planification qui comprennent des mesures d'atténuation et d'adaptation. Des guides à destination des collectivités locales ont été élaborés, tel celui de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) du Languedoc-Roussillon, qui propose un ensemble d'actions d'adaptation [53].

Changement climatique : observations et projections

Figure 4

Évolution de la moyenne annuelle mondiale des températures depuis onze mille ans (de 9300 avant J.-C. à 2010)



Le graphique inférieur indique les variations de la moyenne décennale et son écart-type depuis 1850, montrant une progression croissante depuis le début du XX^e siècle.

Sources : adapté de Marcott S.A., 2013 [54] et du dernier rapport du GIEC, 2014 [55].

La plus récente élévation des températures moyennes annuelles mondiales, de très forte amplitude, est d'une extraordinaire rapidité [figure 4]. Anticiper les conséquences sanitaires du changement climatique en France demande d'exploiter les connaissances acquises sur la variabilité passée du climat et ses impacts régionaux, et les simulations d'évolution possible pour identifier, dans chaque région, les changements graduels ou la modification de l'ordre des événements météorologiques, extrêmes ou non. Les impacts du changement climatique seront différents selon les régions de France métropolitaine et d'outre-mer.

L'identification des risques sanitaires peut se faire à travers l'étude des impacts potentiels sur les milieux – qualité de l'air, ressources et qualité de l'eau, écosystèmes – ou sur les conditions de travail ou de transport. Elle consiste aussi à évaluer les conséquences des actions visant à atténuer ces changements, telles que les politiques énergétiques.

Influence des activités humaines sur le système climatique

L'influence des activités humaines sur le système climatique est désormais clairement établie [2]. Elle est évidente en ce qui concerne l'augmentation des concentrations en gaz à effet de serre dans l'atmosphère⁷, leur effet radiatif, et le réchauffement du climat. Ce réchauffement est sans équivoque et se traduit par des changements cohérents : augmentation des températures de l'air, des surfaces continentales et des océans, diminution des quantités de neige et de glace, montée du niveau des mers. L'influence humaine est également sensible dans la modification du cycle de l'eau planétaire et de certains extrêmes climatiques (diminution du nombre de jours froids et augmentation des extrêmes chauds, et, dans certaines régions, de l'intensité des précipitations maximales). Mais, s'il est très probable que l'influence humaine ait été la cause principale du réchauffement observé depuis le milieu du XX^e siècle, la variabilité du climat aux échelles de temps annuelle ou décennale dépend également de facteurs naturels : activité du soleil et des volcans, variabilité intrinsèque aux circulations de l'atmosphère et de l'océan.

Changements observés en France

En métropole, le réchauffement est détecté au cours du XX^e siècle avec une accélération à partir des années 1980 ; l'étude de simulations climatiques suggère qu'environ 70 % de ce réchauffement sont dus à l'influence humaine [56]. Il est plus prononcé au Sud qu'au Nord en moyenne annuelle, et la nuit (température minimale) que le jour (température maximale). Le plus fort réchauffement des températures minimales nocturnes s'est produit au Nord-Ouest (+ 1,5 °C entre 1900 et 2000), et le plus fort réchauffement des températures maximales diurnes s'est produit au Sud (+ 0,9 °C sur la même période).

Dans les territoires ultra-marins, le réchauffement est détecté en Guyane et en Martinique avec un rythme récent de 0,35 °C par décennie, inférieur à celui enregistré en métropole (0,55 °C par décennie depuis 1979). On observe aujourd'hui une augmentation du nombre de journées estivales avec une

7. Ainsi que leur effet sur l'acidification des océans.

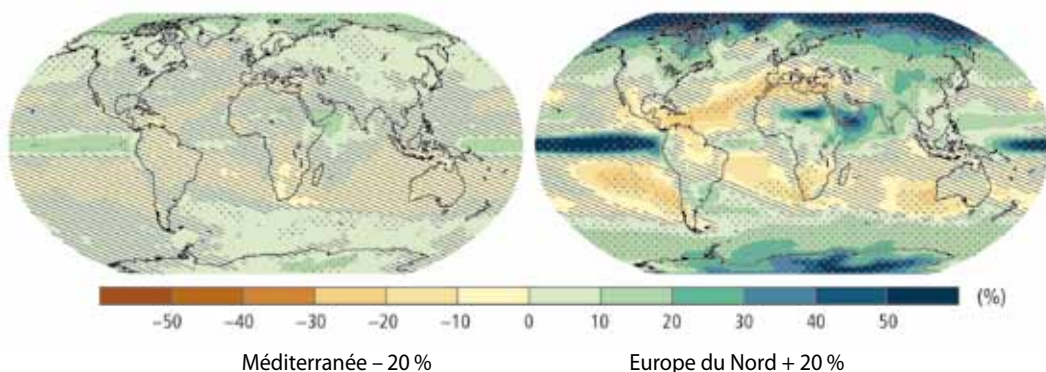
température dépassant 25 °C (+ 5 jours à chaque décennie) et une diminution du nombre de jours de gel (– 3 à 5 jours à chaque décennie), ainsi qu’une diminution des jours dénombrés entre la première et la dernière gelée (8 à 9 jours de moins par décennie).

L’été le plus chaud en France métropolitaine a été enregistré en 2003. Par rapport à la moyenne des années 1950-1980, la température y était plus élevée de 2 °C pour les valeurs maximales diurnes, et de 3,5 °C pour les températures minimales nocturnes ; des températures supérieures à 35 °C ont été atteintes sur les deux tiers du réseau météorologique et ont dépassé 40 °C dans 15 % des stations météorologiques françaises, y compris en Bretagne. Les hivers très doux de 1989-1990, 2006-2007 ou 2013-2014 correspondent à des températures d’environ 2 °C au-dessus des normales mesurées entre 1981 et 2010.

Le régime de précipitations montre également une tendance à l’augmentation en hiver (+ 15 % d’après Météo France et l’Onerc) et à la diminution en été dans le sud de la France métropolitaine. Ces tendances sont conformes à celles observées dans le monde [figure 5] et au Royaume-Uni [figure 6].

Figure 5

Changement attendu des précipitations mondiales à l’horizon 2100 (en % par rapport aux moyennes 1986-2005)

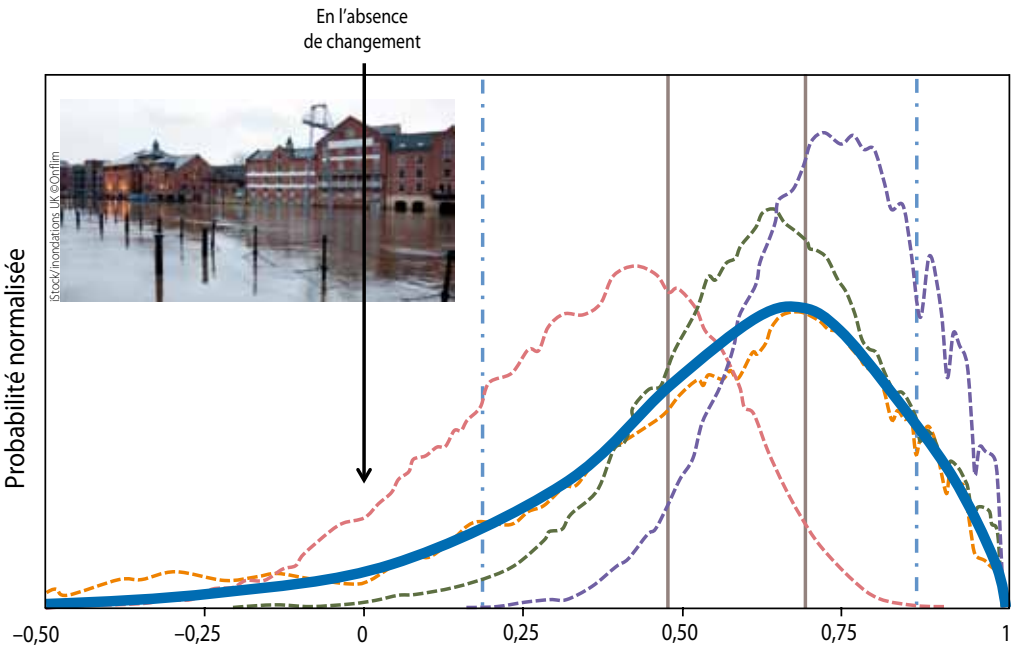


À gauche, les moyennes 1986-2005 ; à droite, l’évolution en % des précipitations prévues en 2100 : diminution probable de 20 % de leur volume sur les régions méditerranéennes, et augmentation de 20 % sur le nord de l’Europe.

Source : rapport du GIEC 2013 [2].

Figure 6

Part du risque d'inondation sévère en Angleterre et au Pays de Galles, attribuable aux émissions de gaz à effet de serre anthropogéniques au XX^e siècle



Établis à partir des données mesurées, 66 % des modèles (courbes pointillées et sommation portée par la courbe bleue continue) indiquent que les émissions de GES ont accru les précipitations sur les terres de l'hémisphère Nord et augmenté le risque d'inondations de plus de 90 %, avec des modifications perceptibles dans la partie nord de la France comme en Angleterre et au Pays de Galle. L'axe des abscisses indique la probabilité de changement (vers la gauche, probabilité négative : diminution des précipitations ; vers la droite, probabilité positive : augmentation des précipitations). La flèche indique ce que serait la situation en l'absence de variation. Les lignes verticales pleines indiquent les 2^e et 3^e tertiles des modélisations, les lignes verticales pointillées les 10^e et 90^e percentiles.

Source : adapté de Pall P, 2011 [57] et Min S.K., 2011 [58].

Simulations du climat futur à l'échelle globale

Les simulations d'évolution future du climat reposent sur des modèles numériques, développés à partir de lois physiques et de paramètres qui représentent les processus de plus petite échelle (typiquement, pour l'atmosphère, moins de 100 km). Ces modèles prennent en compte les interactions entre atmosphère, océan, surfaces continentales, cryosphère (banquises et glaciers), et les couplages entre le climat et le cycle du carbone. Ces modèles sont mis au point à partir de multiples observations et testés par rapport aux données disponibles pour l'évolution passée du climat à différents pas de temps, afin de représenter au mieux le fonctionnement dynamique du climat et ses principes de transfert énergétique.

Les risques climatiques futurs sont explorés à partir de quatre scénarios représentatifs de concentration atmosphérique, dont le numéro (RCP 2.6, 4.0, 6.0 et 8.5) correspond aux niveaux possibles d'impact radiatif en 2100 des émissions de gaz à effet de serre et de particules de pollution (en W/m^2). Depuis la période préindustrielle, l'impact radiatif des activités humaines est estimé à $+2,3 W/m^2$, dont les trois quarts se seraient produits depuis 1950. Le scénario RCP 2.6 correspond à une augmentation comparable à l'élévation actuelle du forçage radiatif d'ici à 2040, suivi d'une stabilisation. Les scénarios intermédiaires correspondent à une stabilisation plus tardive (après 2040) et à un niveau plus élevé. Le scénario haut (RCP 8.5) correspond à une augmentation continue du forçage radiatif tout au long du XXI^e siècle.

Il faut souligner que : (i) l'effet radiatif des gaz à effet de serre n'est pas proportionnel à leur concentration (pour le CO_2 , elle correspond au logarithme de celle-ci) ; (ii) l'impact des émissions humaines de gaz à effet de serre est en partie compensé par les puits naturels de carbone (océans, sols et végétation), qui absorbent aujourd'hui 55 % des émissions de CO_2 . Le scénario le plus bas actuellement retenu correspond ainsi à un pic d'émission de gaz à effet de serre d'ici dix à vingt ans, suivi d'une diminution après 2050 jusqu'à des émissions équivalentes au niveau préindustriel. Le scénario le plus haut correspond à une augmentation d'un facteur 2,5 de la consommation d'énergies fossiles d'ici à la fin du XXI^e siècle.

Les conséquences de ces différents scénarios de perturbation radiative sont estimées en comparant les résultats de quarante modèles dans le cadre d'un programme international (CMIP5). La température moyenne à la surface du globe a augmenté de $0,85^\circ C$ depuis 1880. Dans les scénarios RCP 4, 6 et 8.5, le réchauffement dépassera probablement $1,5^\circ C$ entre 1850 et 2100. Dans les scénarios RCP 6 et 8.5, il dépassera probablement $2^\circ C$.

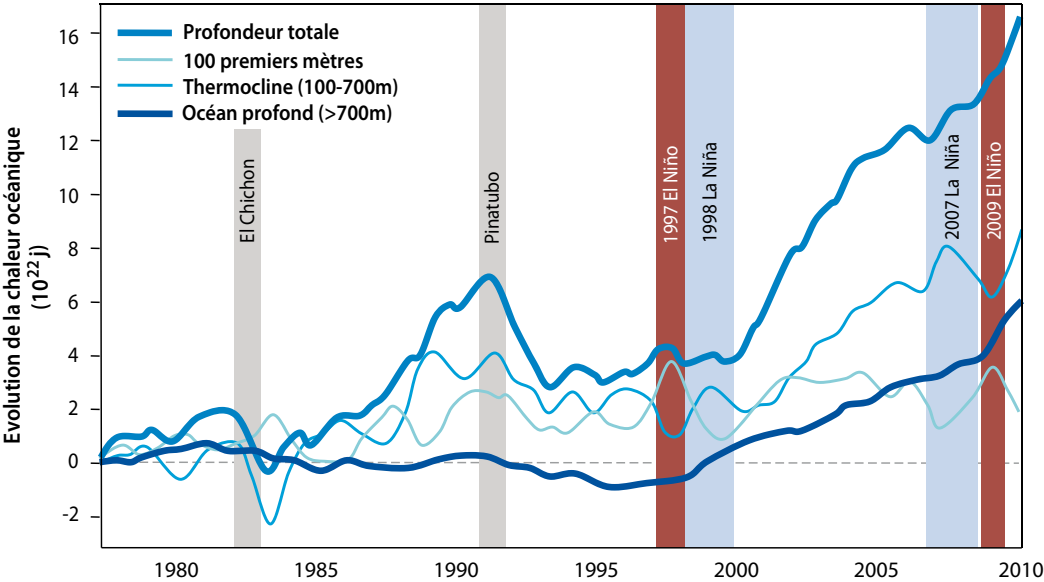
Par ailleurs, le réchauffement se poursuivra au-delà de 2100 pour tous ces scénarios (à l'exception du RCP 2.6). Il ne sera pas uniforme d'une région à l'autre, ni d'une saison à l'autre. Il sera plus marqué au-dessus des continents que des océans, et particulièrement prononcé en Arctique. Du fait d'un ralentissement de la circulation méridienne de retournement de l'océan Atlantique, il sera moins prononcé sur l'une des zones marines de l'Atlantique Nord.

Variabilités
des températures
océaniques et
des précipitations

Les modèles de climat simulent en général une augmentation des contrastes dans la répartition des précipitations : elles augmenteront dans les régions et les saisons humides (moyennes latitudes en hiver et Arctique) et diminueront dans les régions sèches (du fait d'un élargissement de la circulation de Hadley dans l'atmosphère tropicale). Cela augmentera le risque de sécheresse sur le pourtour méditerranéen.

Figure 7

Élévation thermique océanique des trente dernières années à trois niveaux de profondeur marine



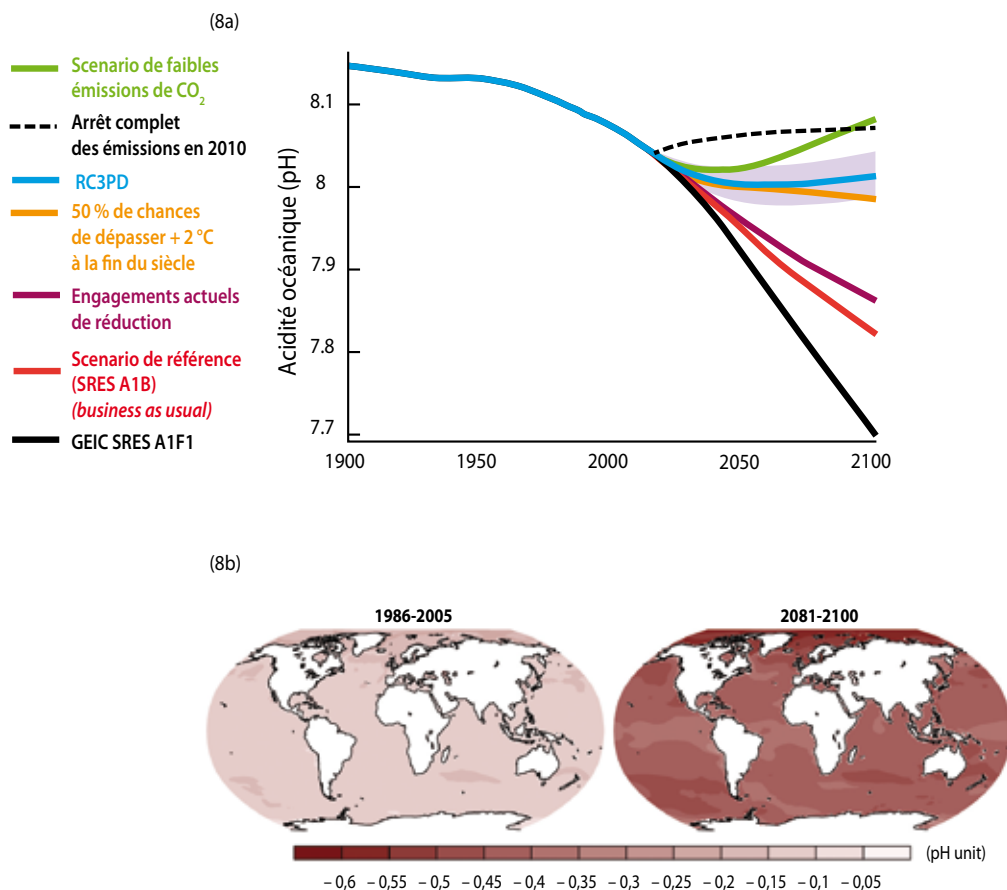
Source : adapté de Clement A., 2014 [59].

Les surfaces affectées par les moussons devraient s'étendre, avec une augmentation du niveau et de la durée des précipitations. Parmi les résultats les plus robustes figurent l'augmentation de fréquence et de durée des vagues de chaleur, la diminution des jours et nuits très froids, l'augmentation des jours et nuits très chauds, ainsi qu'une augmentation de l'intensité et de la fréquence des précipitations extrêmes sur les continents des moyennes latitudes et sur les régions tropicales humides. L'intensité des tempêtes et des ouragans les plus violents pourrait également augmenter avec un déplacement progressif vers les pôles [60]. La survenue des épisodes cévenols récents (septembre-novembre 2014) pourrait en partie s'expliquer par des conditions méditerranéennes de cet ordre.

Les zones littorales seront affectées par l'acidification des eaux de mer [figures 8a et 8b], par une augmentation des conditions anoxiques, et par les conséquences de la montée du niveau moyen des mers, résultant du réchauffement en profondeur des océans et de leur dilatation, ainsi que de la fonte des glaciers et des calottes polaires.

Figures 8a et 8b

Changement attendu du pH océanique à l'horizon 2100 selon le scénario retenu (8a) et en comparaison à la moyenne des années 1986-2005 (8b)



Source : adapté de Hare W.L., 2011 [61], et Rogelj J., 2012 [62].

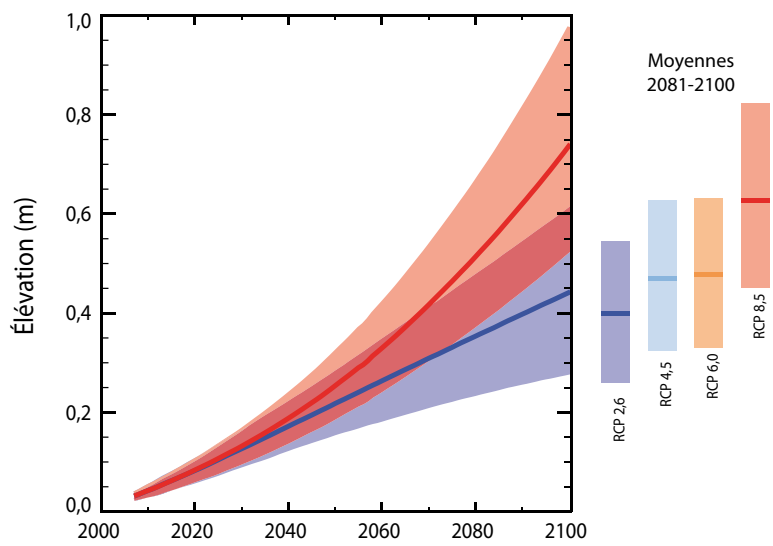
Tous les scénarios confirment une acidification très sensible des océans si la trajectoire actuelle ne se modifie pas.

Niveau des mers

Le niveau des mers a augmenté en moyenne de 19 cm au XX^e siècle, et depuis vingt ans il augmente d'environ 3 mm/an. Ce niveau moyen continuera à s'élever au cours du XXI^e siècle [figure 9], avec une vitesse plus importante pour tous les scénarios RCP, en raison du réchauffement accru des océans et de l'augmentation des pertes de masse des glaciers et calottes glaciaires. Dans le scénario RCP 2.6, le niveau des mers monterait d'environ 40 cm d'ici à 2100, et de 50 cm à 100 cm dans le scénario RCP 8.5, avec un rythme d'augmentation de 8 à 15 mm/an en 2100.

Figure 9

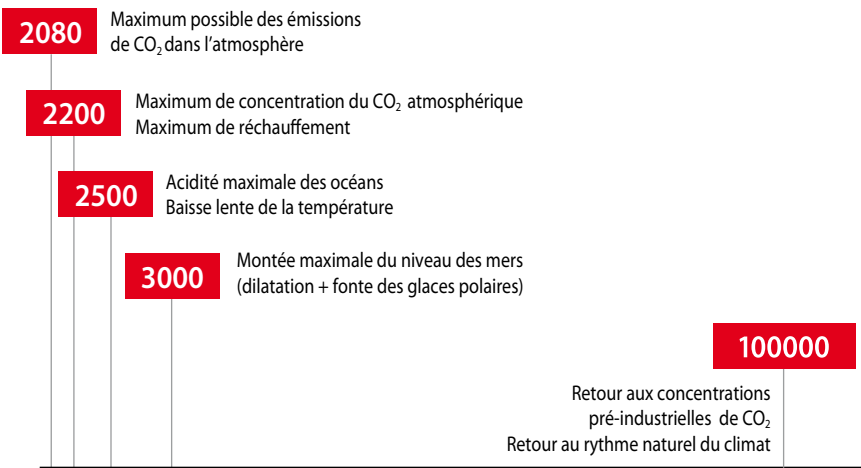
Élévation moyenne attendue du niveau des mers (en mètre) selon le type de scénario RCP de 2008 à 2100



Source : rapport GIEC 2013 [2].

Figure 10

Caractéristiques du changement climatique aux horizons 2080 – 100000



Source : Valérie Masson-Delmotte, IPSL.

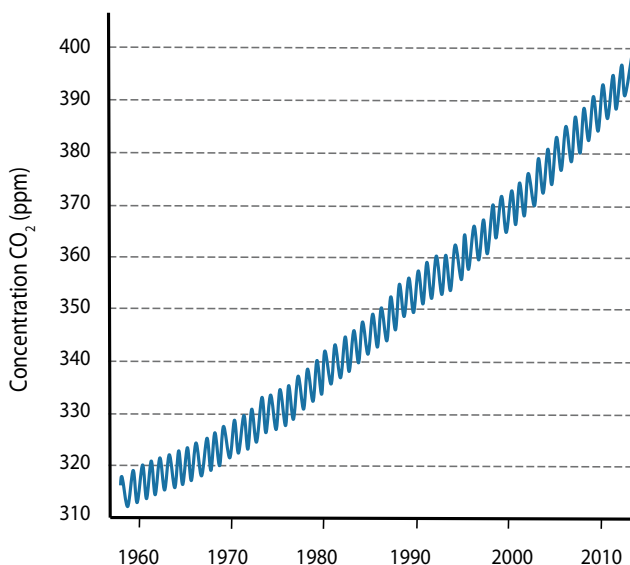
Du fait de l'inertie des cycles du carbone (20 à 40 % des émissions de CO₂ resteront plus de mille ans dans l'atmosphère, même après l'arrêt de toute émission) et du climat (énergie et chaleur des océans), la plupart des caractéristiques du changement climatique persisteront durant plusieurs siècles après l'arrêt des émissions de CO₂ [figure 10].

Le CO₂,
principal gaz
à effet de serre

L'atmosphère est le compartiment le plus affecté par les activités humaines. Au cours de la dernière décennie, elle a absorbé près de la moitié des 340 gigatonnes (Gt) de CO₂ d'origine anthropique, augmentant sa concentration de 40 % par rapport aux débuts de l'ère industrielle. L'observation de ce paramètre, à grande distance de tout site producteur, montre que, malgré les prises de conscience internationales et les promesses de réduction, la pente de cette élévation ne cesse de croître [2] [figure 11]. Les émissions totales seront le paramètre déterminant de la valeur moyenne de la température terrestre et de sa vitesse de croissance, qui conditionnera les capacités d'adaptation.

Figure 11

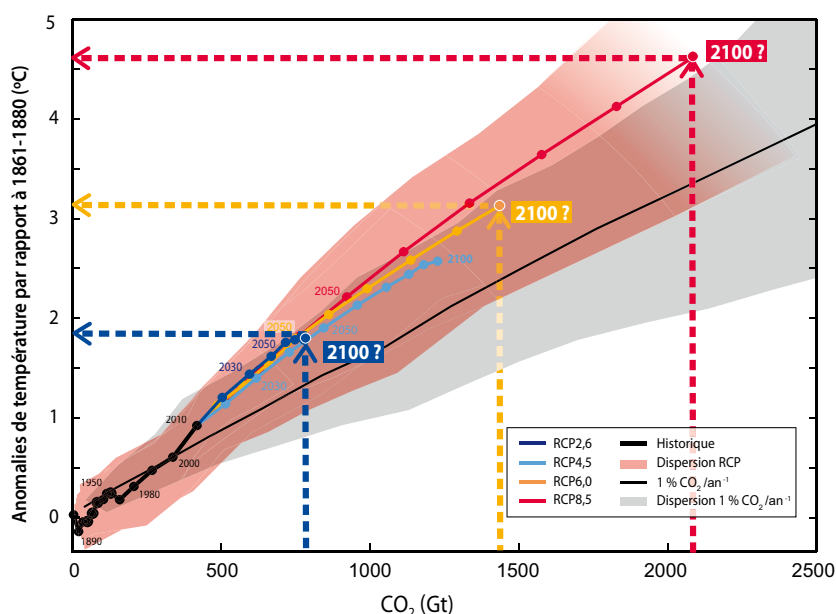
Élévation depuis cinquante ans de la concentration mensuelle de CO₂ dans l'air ambiant (et fluctuations saisonnières), mesurée au niveau du l'Institut Scripps d'océanographie de Mauna Loa



Source : adapté de Monastersky R., 2013 [63].

Figure 12

Émissions cumulées de CO₂ de 1870 à 2010 (en milliards de tonnes, Gt) et impacts sur les températures en 2100 selon la quantité totale qui aura été émise



Scénario bas en bleu : 1/3 des réserves totales d'énergies fossiles consommées.
Scénario haut en rouge : $\approx$ 90 % des réserves totales auront été consommées.

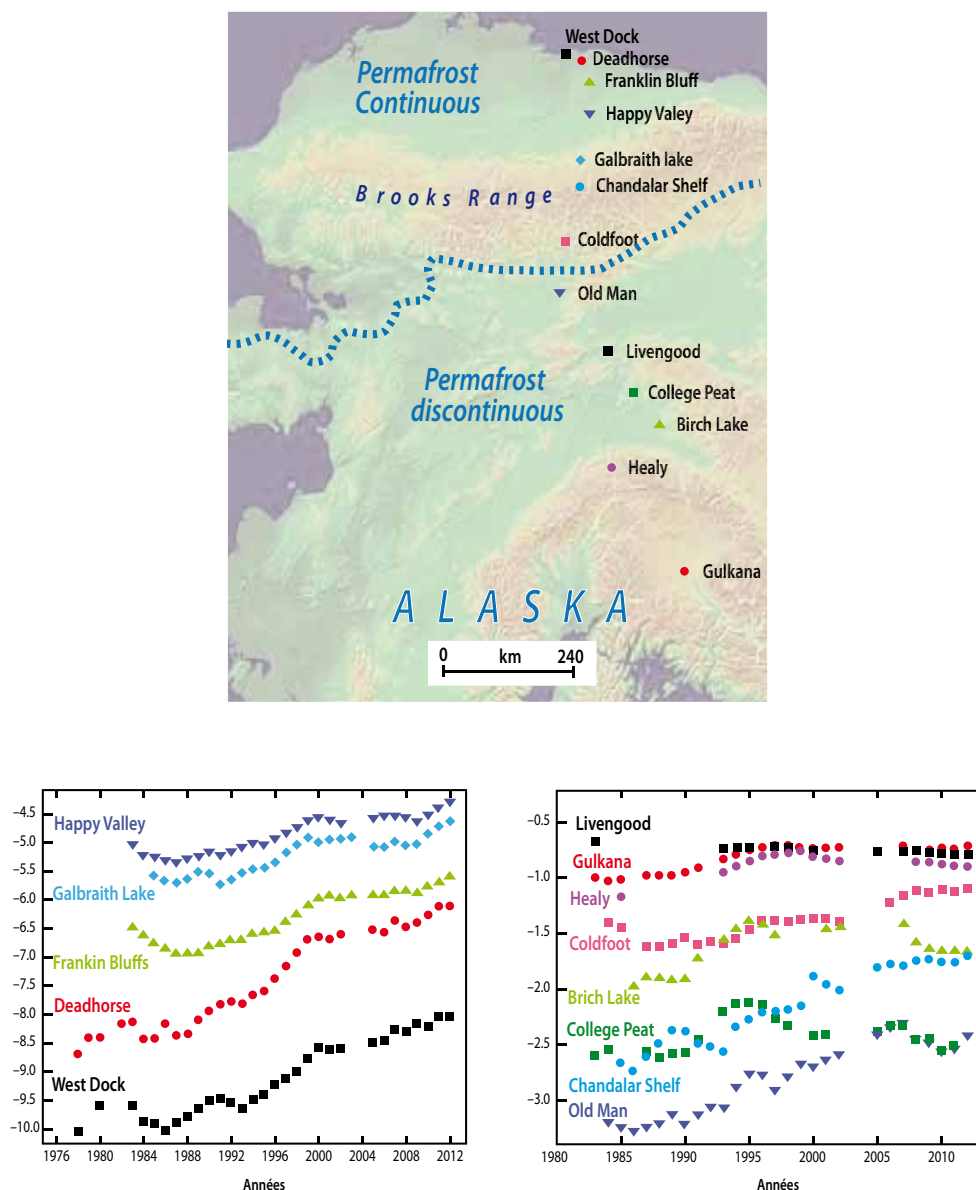
Source : GIEC 2013 [2].

Compte tenu du lien entre CO₂ émis et température [figure 12], le rythme d'élévation de celle-ci dépend de l'intensité de la production humaine de CO₂ et donc de la consommation annuelle d'énergies carbonées, principalement fossiles (pétrole, gaz, charbon) [55].

Le méthane (CH₄) De même, le relargage de méthane, avec le dégel du permafrost [64] [figure 13], pourrait aggraver le dérèglement du climat, contribuant à atteindre plus rapidement certains points de bascule, mais la fonte du pergélisol pourrait aussi entraîner une rétroaction positive sur le long terme. Le coût lié à ces dégâts potentiels a néanmoins été estimé, pour le moment, à 60 000 milliards de dollars [65].

Figure 13

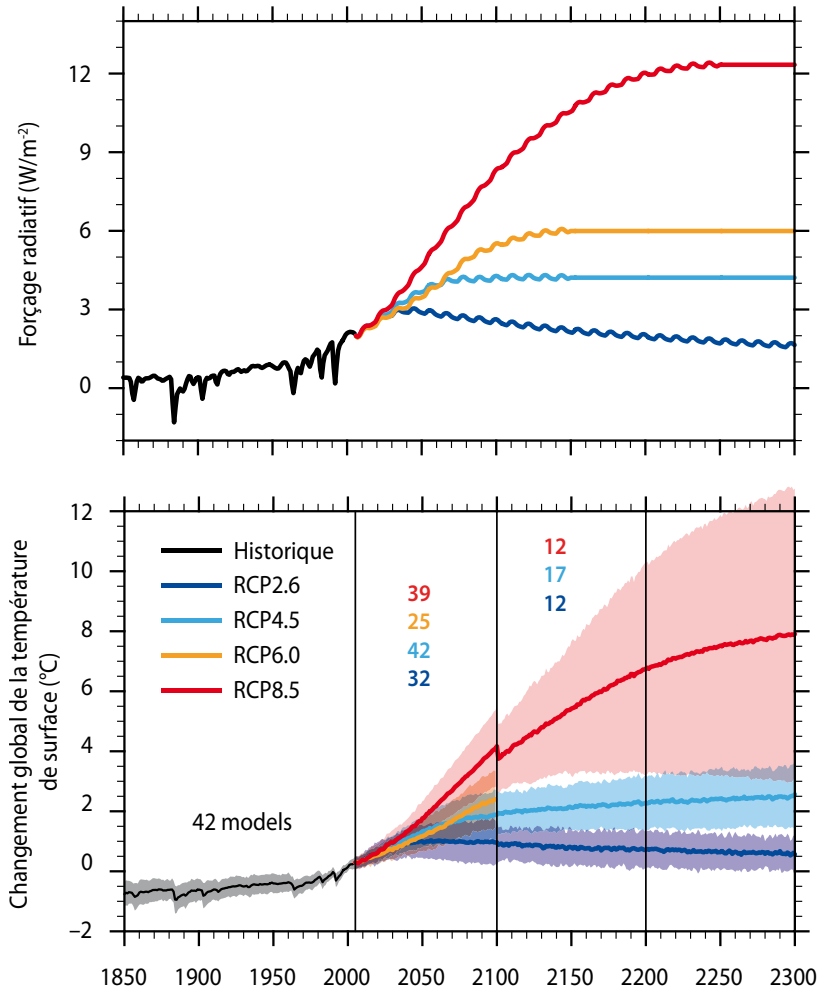
Températures annuelles du permafrost mesurées sur vingt sites du nord au sud de l'Alaska montrant une élévation de 1 à 2 °C en moyenne



Source : adapté de Romanovsky V. E., 2013 [66].

Figure 14a

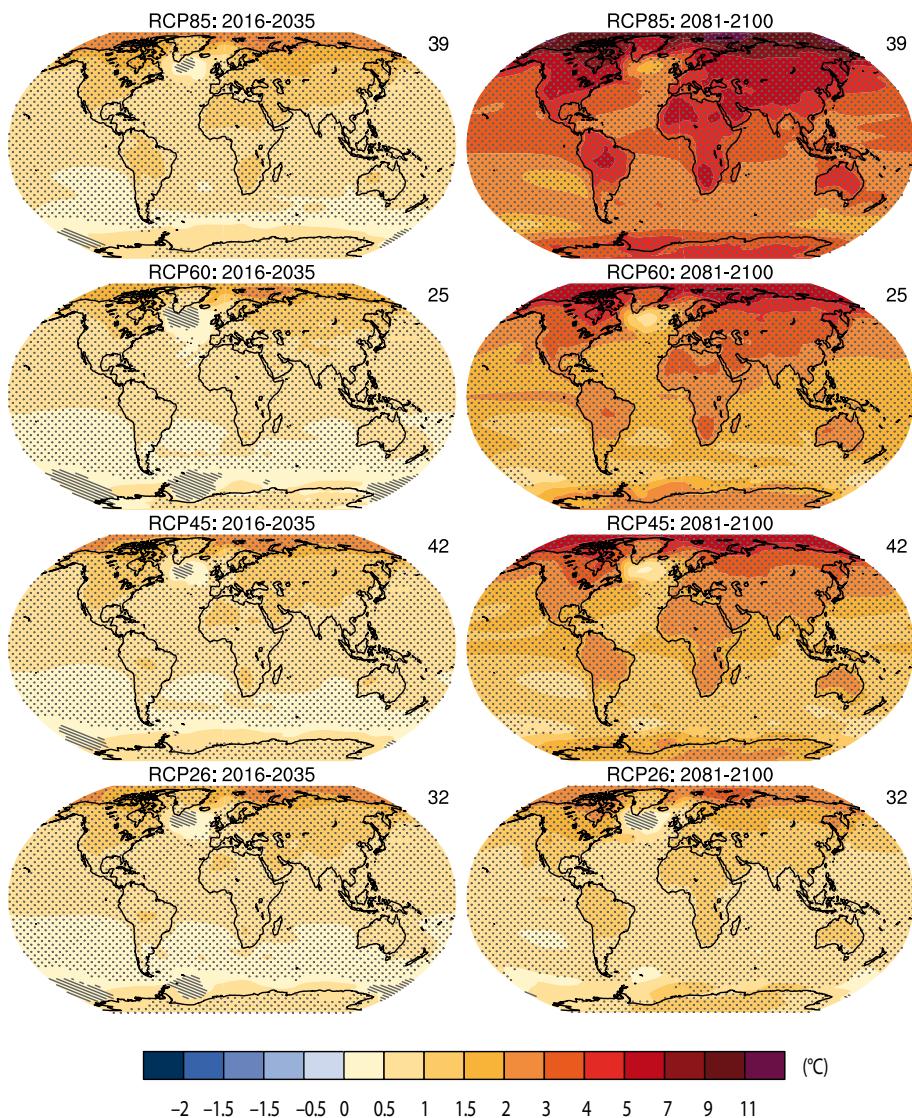
Scénarios radiatifs et simulations d'évolution du climat global



Scénarios radiatifs (en haut) et simulations d'évolution du climat global représentées par la moyenne globale des changements de température de surface (en bas).

Figure 14b

Changement de température moyen annuel

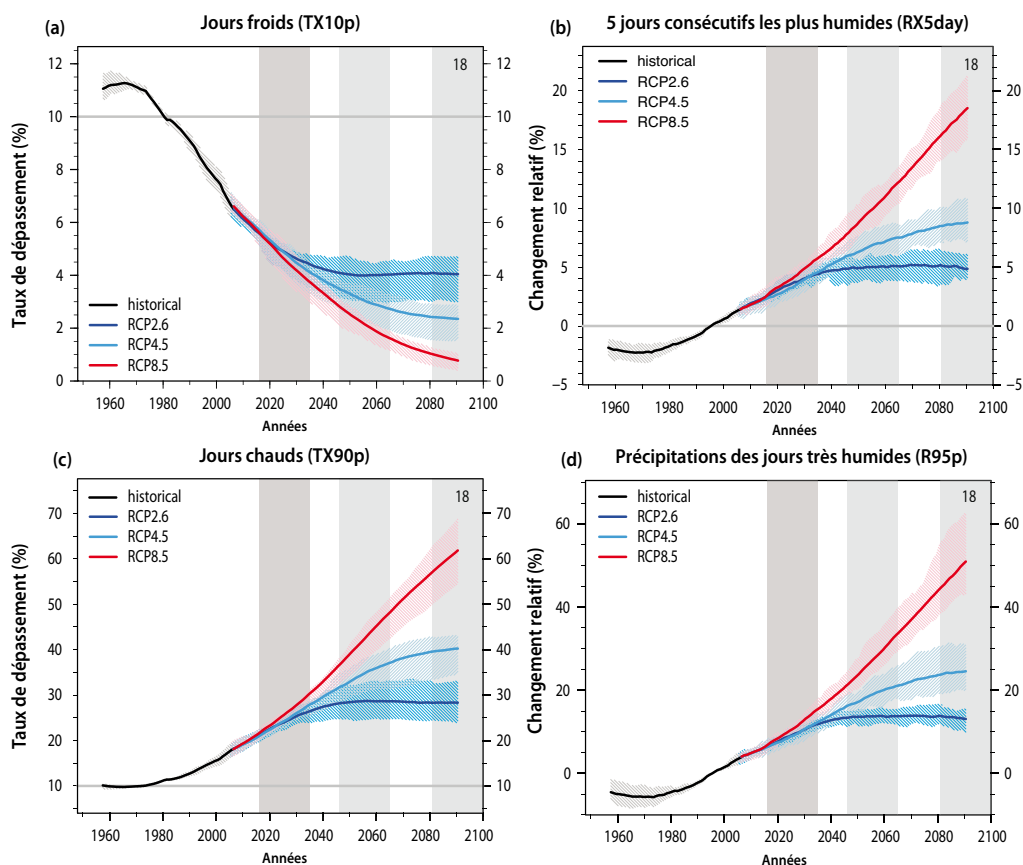


Cartes des changements de température en moyenne annuelle à court et long terme pour chaque scénario, entre les périodes 1981-2000 et 2016-2035 (colonne de gauche) et entre 1981-2000 et 2081-2100 (colonne de droite).

Source : rapport GIEC 2013 [2].
http://www.climatechange2013.org/images/figures/WGI_AR5_FigTS-15.jpg

Figure 15

Projections des changements pour les jours froids, les périodes les plus humides, les jours chauds et les précipitations intenses



Projections des changements pour :

- (a) les jours froids (TX10p : pourcentage de jours d'une année avec une température journalière maximale, Tmax, en dessous du 10^e percentile de la Tmax entre 1961 et 1990) ;
- (b) les périodes de 5 jours les plus humides : RX5day (pourcentage par rapport à 1986-2005 du cumul maximum de précipitations d'une période de 5 jours consécutifs, chaque année) ;
- (c) les jours chauds (TX90p : pourcentage de jours d'une année avec température journalière dépassant le 90^e percentile de la Tmax entre 1961 et 1990) ;
- (d) les précipitations très intenses (R95p : pourcentage par rapport à 1986-2005 de la quantité de précipitations annuelles provenant de jours où les précipitations se situent au-delà du 95^e percentile).

Source : GIEC 2013 [2].

Conséquences de l'évolution des risques climatiques en France

Simulations d'évolution du climat pour la France

Les résultats présentés ci-dessus [figures 14 et 15] sont issus des scénarios RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5 et des simulations CMIP5. Les traits continus indiquent la moyenne des résultats obtenus pour chaque modèle, et l'enveloppe colorée indique l'écart interquartile entre les simulations individuelles (entre les 25^e et 75^e percentiles). Chaque approche confirme l'augmentation de fréquence et d'intensité des périodes chaudes et des précipitations dans un système climatique plus chaud, plus turbulent et plus actif.

Une étude récente a utilisé les nouvelles simulations CMIP5 d'évolution du climat pour la France [56] : elle a mis à jour les analyses antérieures (autres modèles de climat et autres scénarios), également illustrées par le travail de l'Onerc à l'échelle nationale [67].

Dans le scénario RCP 8.5, le climat de la France métropolitaine pourrait se réchauffer de 4,5 °C au cours du XXI^e siècle. Le réchauffement hivernal serait de l'ordre de 3 °C (plus marqué à l'est de la France et au nord-est de l'Europe). Le réchauffement estival serait plus intense, de l'ordre de 4 °C au nord de la France et de 6 °C au sud de la France.

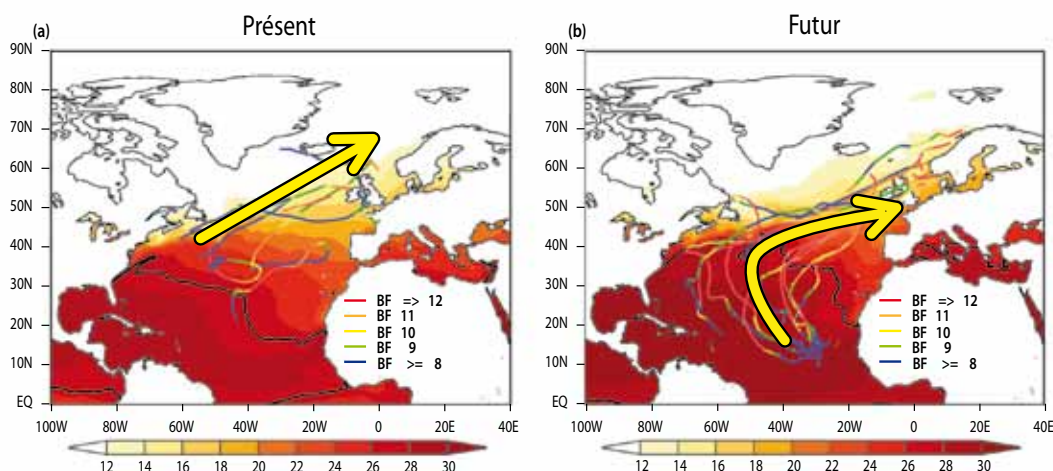
Ces gradients spatiaux proviennent de changements cohérents à l'échelle européenne, dus à des interactions entre surface continentale et atmosphère. L'amplification estivale au Sud est liée à une forte diminution de la couverture nuageuse sur le pourtour méditerranéen et à une augmentation du stress hydrique. L'amplification hivernale au Nord-Est est associée à la diminution du couvert neigeux. Les changements de précipitations seraient marqués par une diminution au printemps et en été, et par une augmentation en hiver, avec de fortes incertitudes sur leur amplitude et leur répartition géographique.

Des hivers froids continueront à se produire au cours des prochaines décennies du fait de la variabilité de la circulation atmosphérique, en dépit de la tendance au réchauffement d'ensemble. A ces tendances se superpose en effet une forte variabilité interannuelle à multidécennale, liée à la structure de la circulation atmosphérique (oscillation nord-atlantique, NAO) et océanique (oscillation atlantique multidécennale, AMO) qui peut ralentir ou accélérer les tendances de long terme dues à l'impact anthropique. Les modèles de climat semblent sous-estimer l'ampleur de la variabilité naturelle de la NAO, qui résulte d'interactions avec la stratosphère, pas forcément prises en compte dans chacun des modèles.

Le ralentissement de la circulation méridienne de l'océan Atlantique entraîne une zone de moindre réchauffement des températures de la mer, au sud du Groenland. De ce fait, le gradient de température en fonction de la latitude est accentué au sud de cette zone, ce qui pourrait entraîner une augmentation de l'activité des tempêtes sur l'Europe de l'Ouest (jusqu'à 50 %) [figure 16]. Une étude, ainsi que le rapport 2013 du GIEC [2], suggère une augmentation du risque de tempête extratropicale d'automne en Europe de l'Ouest, liée à la formation d'ouragans au centre de l'Atlantique [60]. Une fréquence plus élevée de ces événements pourrait concerner le golfe de Gascogne.

Figure 16

Changements possibles de direction des événements tempétueux en Atlantique Nord et sur l'Europe de l'Ouest à l'horizon 2050-2100



Ces scénarios anticipent une déviation des principaux trajets de tempêtes du nord de l'Écosse (présent) vers le sud de l'Angleterre, la Manche et le golfe de Gascogne (futur).

Source : adapté de Haarsma R.J., 2013 [68].

Conséquences à diverses échelles spatiales

Les conséquences à petite échelle spatiale sont estimées à partir d'approches statistiques de régionalisation, ou bien à l'aide de modèles de circulation atmosphérique régionale, avec une résolution pouvant aller jusqu'à 15 km en longitude. Cette régionalisation est essentielle pour représenter, par exemple, la distribution spatiale des précipitations et ses conséquences hydrologiques. Enfin, des modèles de microclimat urbain ont été développés pour évaluer les risques liés aux îlots de chaleur, ces îlots étant dus aux effets cumulés des sources d'énergie locales et aux impacts des bâtiments ou des sols (albédo⁸, absence d'évapotranspiration).

Concernant les effets d'îlot de chaleur urbain, un exemple d'étude conduite sur Paris suggère une très forte augmentation à la fin du XXI^e siècle du nombre de jours en vigilance canicule (10 à 25 par an à Paris et 5 à 15 dans les zones rurales voisines, contre 1 par an actuellement). Pendant la canicule de 2003, un îlot de chaleur urbain apparaissait en fin de nuit dans le centre de Paris, atteignant +4 à +7 °C, avec des micro-îlots (+2 à +4 °C) et un phénomène de panache pour les communes ou arrondissements voisins situés sous le vent.

8. Calcul du rapport de l'énergie solaire réfléchi par une surface à l'énergie solaire incidente. L'albédo d'un toit varie entre 0,1 et 0,35, celui d'une surface goudronnée de 0,05 à 0,20. Par comparaison, l'albédo d'une surface cultivée est de 0,15 à 0,25.

Les eaux de surface (cours d'eau, lacs) devraient être affectées par une augmentation des températures avec une baisse des débits moyens annuels (de -10 à -40 %, particulièrement dans les bassins Seine-Normandie et Adour-Garonne[69]) et une baisse prononcée des débits d'étiage, mais avec une évolution plus hétérogène pour les crues. Dans les Cévennes existe un fort risque d'augmentation des crues éclair (en fréquence et en intensité). Dans les départements d'outre-mer, les incertitudes restent larges. Quant aux régions de montagne, les simulations (par méthodes de désagrégation) montrent une réduction du nombre de jours de gel, une diminution de la quantité des précipitations neigeuses et une augmentation du pourcentage de jours secs supérieure à 10 %. Il pourrait y avoir une diminution des vents de surface (moyens et extrêmes) dans la région méditerranéenne et une augmentation des précipitations intenses.

Impacts majeurs attendus

■ Aggravation des événements de sécheresse

Parmi les impacts majeurs attendus émerge une aggravation des événements de sécheresse, surtout liés au déficit d'humidité du sol. Lors de la seconde moitié du XXI^e siècle, la France pourrait subir des sécheresses quasi continues de grande intensité, totalement inconnues dans le climat actuel. Cette baisse de l'humidité des sols devrait amplifier l'intensité et la fréquence des vagues de chaleur. Il y aurait une augmentation de la variabilité intrasaisonnière et interannuelle des températures en Europe. Pour l'île de La Réunion, les modèles de climat simulent un assèchement global, avec des périodes de sécheresse plus longues, mais avec des précipitations extrêmes plus importantes.

■ Risques d'incendie de forêt

L'augmentation du déficit hydrique des sols en été devrait augmenter le risque d'incendie de forêt. Météo France indique déjà une augmentation du nombre annuel de jours avec risque d'incendie (+20 % entre 1961-1980 et 1989-2008). La probabilité d'occurrence des feux de forêt a augmenté dans le sud de la France et devient significative jusqu'en Bretagne et en Île-de-France. D'ici à 2040, les territoires à risque d'incendie devraient s'étendre vers le nord de la France, avec une augmentation constante du nombre de jours à risque de feu et un allongement de la saison à risque.

■ Évolution de la qualité de l'air

L'évolution de la qualité de l'air (ozone [O₃] et PM 2,5⁹ en surface) dépendra en premier lieu des émissions (dont celles de CO₂ et de méthane [CH₄], les effets climatiques étant plus incertains. Le réchauffement global devrait ainsi diminuer le niveau moyen d'ozone, mais cet effet pourrait être compensé en cas de fortes émissions de méthane. Dans les régions polluées, le réchauffement atmosphérique entraînera des modifications de la chimie et des émissions locales, qui pourraient augmenter les niveaux d'ozone et de PM 2,5 lors des pics de pollution associés aux épisodes de blocage atmosphérique, avec des rôles parfois contrastés des émissions particulières à capacité à la fois radiative et antiradiative. Pour les PM 2,5,

9. Les PM 2,5 sont des particules fines (*particulate matter*) dont le diamètre est inférieur à 2,5 micromètres.

le changement climatique pourrait modifier les sources naturelles d'aérosols (feux de forêt, transport de poussières, précurseurs biogéniques) ainsi que le lessivage par les précipitations. Enfin, il pourrait entraîner une augmentation des durées de production de pollen.

■ Évolution des cycles et de la qualité des eaux

Des changements importants des cycles et de la qualité des eaux peuvent être anticipés en raison de la variabilité des précipitations, mais les quantités accessibles dans les réservoirs dépendront aussi des densités démographiques sur les bassins versants, des concentrations en toxiques liées aux eaux de ruissellement, au développement éventuel de pathogènes et aux conditions d'irrigation agricole.

■ Changement de confort thermique

Le changement de confort thermique est évalué au niveau international en utilisant un indice (*Wet Bulb Globe Temperature*, WBGT) qui prend en compte la température et l'humidité, et permet d'évaluer les dépassements de seuil critique pour l'activité physique ou sportive et pour la productivité professionnelle (à 28, 32 et 35 °C). L'indice WBGT est typiquement de 22 °C en métropole et de 30 °C pour les DOM-TOM. Il a vu sa valeur moyenne augmenter (de + 2,2 °C en cinquante ans en France métropolitaine, et de + 1,8 °C dans les Caraïbes) avec des dépassements de seuil (+ 7 % de la fréquence de dépassement du seuil de 28 °C en métropole entre 1973 et 2003). Pour les projections, la diminution de l'humidité relative en été (-5 à -10 % dans le scénario RCP 8.5 d'ici à 2100) devrait entraîner une augmentation de WBGT inférieure à celle de la température (et inversement dans les régions tropicales) [70]. Les effets d'îlot de chaleur en contexte urbain se renforceront par ailleurs sous ces impacts conjoints.

■ Exposition au rayonnement ultraviolet

L'évolution de l'exposition au rayonnement ultraviolet dépendra de l'évolution de l'ozone stratosphérique, elle-même modulée par le changement climatique, et de l'évolution de la couverture nuageuse. L'irradiance des UVB pourrait diminuer aux moyennes latitudes (de -5 à -20 %) et augmenter dans les régions tropicales (de +2 à +3 %). Néanmoins, ces projections dépendent fortement des changements de nébulosité, de polluants ou d'aérosols et restent très incertaines [71]. L'exposition des personnes au rayonnement UV dépendra fortement de l'évolution du temps passé à l'extérieur.

Risques spécifiques
aux régions
côtières et
aux régions de
montagne

Enfin, les conséquences du changement climatique entraîneront des modifications de risques spécifiques dans les régions côtières comme dans les régions de montagne.

■ Régions côtières

Sur les côtes [72], l'augmentation du niveau des mers augmentera le risque de submersion marine. La distribution régionale du changement du niveau des mers dépend de la température et de la salinité locales, des courants marins, de la pression atmosphérique, de l'apport d'eaux continentales et de la déformation des

plateaux continentaux. Elle reste donc difficile à estimer précisément (par exemple pour la Méditerranée, où les effets locaux de température et de salinité pourraient se compenser).

Les projections à l'horizon 2100 prenant en compte tous ces facteurs, selon le rapport 2013 du GIEC [2], suggèrent une augmentation du niveau des mers légèrement inférieure à la moyenne globale (-10 %) pour la Méditerranée et pour la façade atlantique métropolitaine, et légèrement supérieure (+10 %) pour les départements et territoires d'outre-mer tropicaux. On observe déjà une augmentation des niveaux de mer extrêmes, du fait de l'augmentation du niveau moyen. Quelques études suggèrent une tendance à l'étalement de la distribution des hauteurs des vagues en Méditerranée ou en baie de Biscaye. Pour une augmentation du niveau moyen des mers de 50 cm, la fréquence de dépassement d'un niveau local donné (niveaux extrêmes) augmentera d'environ dix fois plus souvent sur la façade atlantique ou davantage (pour les régions tropicales).

L'érosion des côtes est souvent affectée par des facteurs régionaux comme l'anthropisation, l'apport de sédiments ou les dynamiques locales d'érosion. Cependant, l'élévation du niveau des mers accentuera l'érosion dans certaines zones (deltas, plages de sable ou galets, marais côtiers et falaises de craie). L'élévation du niveau maritime sera le facteur principal d'aggravation des submersions marines au XXI^e siècle, qu'elles soient dues au débordement, au déferlement des vagues ou à la rupture de cordons dunaires ou d'ouvrages de protection. Enfin, la montée du niveau affectera les aquifères côtiers et insulaires français à travers l'accentuation des intrusions salines et les modifications de la recharge en eau douce (qui dépendra autant du climat que des prélèvements anthropiques).

■ Régions de montagne

Concernant les reliefs montagneux [73], le réchauffement observé dans les Alpes ces cinquante dernières années a été de 50 % plus prononcé que la moyenne métropolitaine, avec une diminution de l'enneigement, en particulier en dessous de 1 500 m. Cette diminution s'accentuera au XXI^e siècle entre 1 500 et 1 800 m, en particulier en début et en fin d'hiver. L'isotherme 0 °C d'hiver, aujourd'hui situé entre 800 et 1 200 m d'altitude, s'élèverait d'environ 200 m par degré Celsius de réchauffement. Enfin la fonte du pergélisol favorisera les écroulements de paroi. Pour un réchauffement moyen, les glaciers alpins perdront 75 % de leur superficie d'ici à 2050 et la plupart des petits glaciers disparaîtront. Cette fonte présentera dans certains cas des risques de vidange brutale des lacs de dégel.

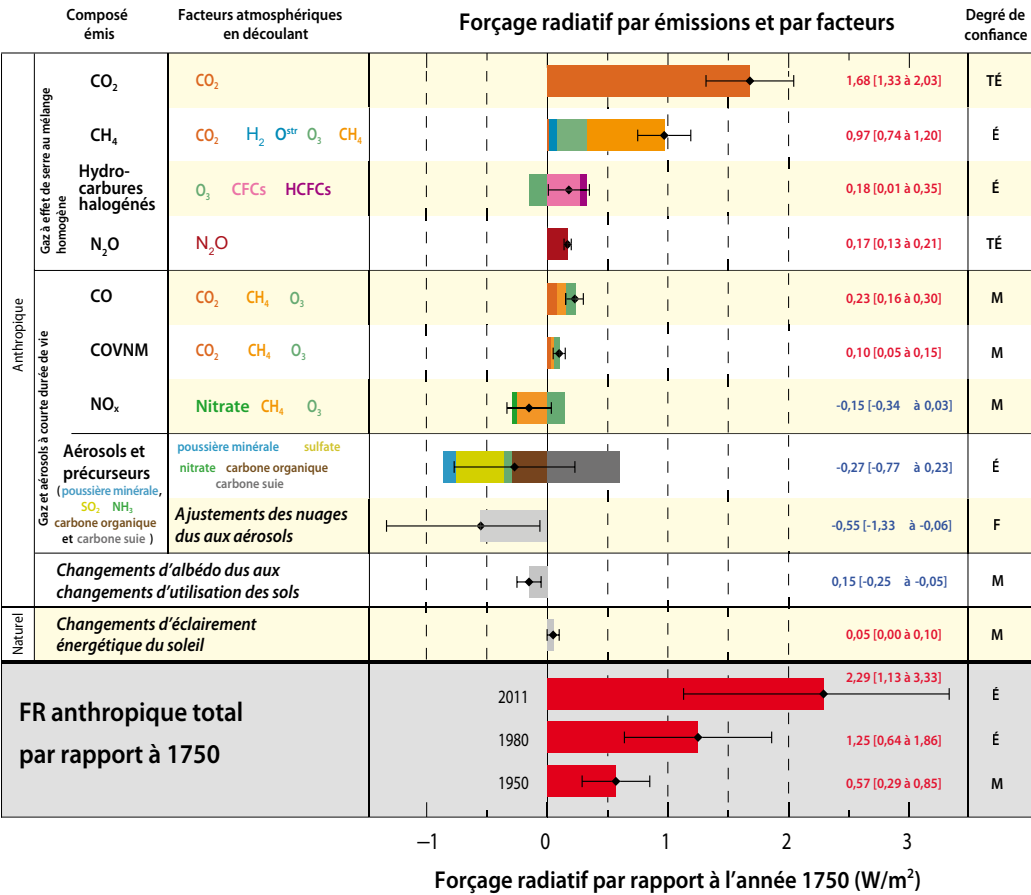
Dans les régions littorales et en montagne, les impacts déjà visibles du changement climatique sur les paysages, perçus comme la perte d'un patrimoine naturel, les récurrences d'événements extrêmes (sécheresses) et leurs impacts sur les pratiques (forêt, agriculture...) pourraient favoriser le développement d'un sentiment de perte, conceptualisé comme un « mal du pays » dans son propre territoire, la « solastalgie » [74].

Bénéfices et
risques
des stratégies
d'atténuation et
d'adaptation

La stratégie d'atténuation française vise la réduction d'un facteur 4 des émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2050, au-delà du triple objectif de l'Union européenne à horizon 2020 (+ 20 % d'énergies renouvelables, -20 % de réduction d'émissions de GES et + 20 % de gain en efficacité énergétique, par rapport à 1990). Il s'agit de respecter les engagements inscrits dans la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) et de contenir la hausse des températures à moins de 2 °C. Atteindre cet objectif nécessite la réduction de la moitié des

Figure 17

Impact sur le réchauffement du climat des différents composants
anthropiques rejetés dans l'atmosphère (forçage radiatif, en W/m²)



L'effet radiatif net, en W/m², est exprimé selon les composés émis (à gauche) et leurs conséquences sur les déterminants du forçage radiatif.
Le niveau de confiance associé apparaît à droite (F, faible ; M, moyen ; É, élevé ; TÉ, très élevé).

Source : GIEC 2013 [2].

émissions mondiales d'ici à 2050 par rapport à celles de 1990. Cette stratégie implique des transformations de pans entiers de différents secteurs : bâtiment, politiques urbaines, agriculture, eau et assainissement, énergie et transports. Par exemple, afin de maîtriser la demande en énergie dans le bâtiment, des actions de soutien aux rénovations lourdes dans le bâtiment ancien et l'application de nouvelles réglementations thermiques lors de la construction de bâtiments neufs peuvent être mises en œuvre.

Le développement des énergies renouvelables est également un axe fort de la stratégie [75]. Certaines actions d'atténuation environnementale pourraient, en favorisant les déplacements actifs (marche, vélo) ou les modifications de l'alimentation (moins de viande rouge), avoir des bénéfices en santé publique. De même, la réduction des émissions de nombreux composés ayant un effet climatique, comme le méthane (CH_4) [figure 17], améliorerait la qualité de l'air. D'autres aspects, comme l'augmentation du prix de l'énergie, l'augmentation de l'isolation des logements ou la densification urbaine, devraient également être anticipés en termes de santé. D'autres voies technologiques (enfouissement du CO_2 ...) pourraient se développer, mais nombre d'entre elles posent des questions non résolues de sécurité à long terme.

Projections régionales

Les quatre pages suivantes montrent les changements prévus de température en Europe en hiver [figure 18] et en été [figure 19] à horizon 2016-2035, 2046-2065 et 2081-2100 (écarts en degré Celsius par rapport à 1986-2005) et les changements de précipitations en saison froide [figure 20] et chaude [figure 21] (en pourcentage de changements par rapport à 1986-2005), pour tous les modèles et pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5.

Les différentes cartes correspondent aux 25^e, 50^e et 75^e percentiles de la distribution des simulations de l'ensemble CMIP5 (ce qui inclut la variabilité naturelle et la dispersion entre modèles). Les zones hachurées désignent les zones où les différences de percentiles sur vingt ans sont inférieures à l'écart type de la variabilité actuelle.

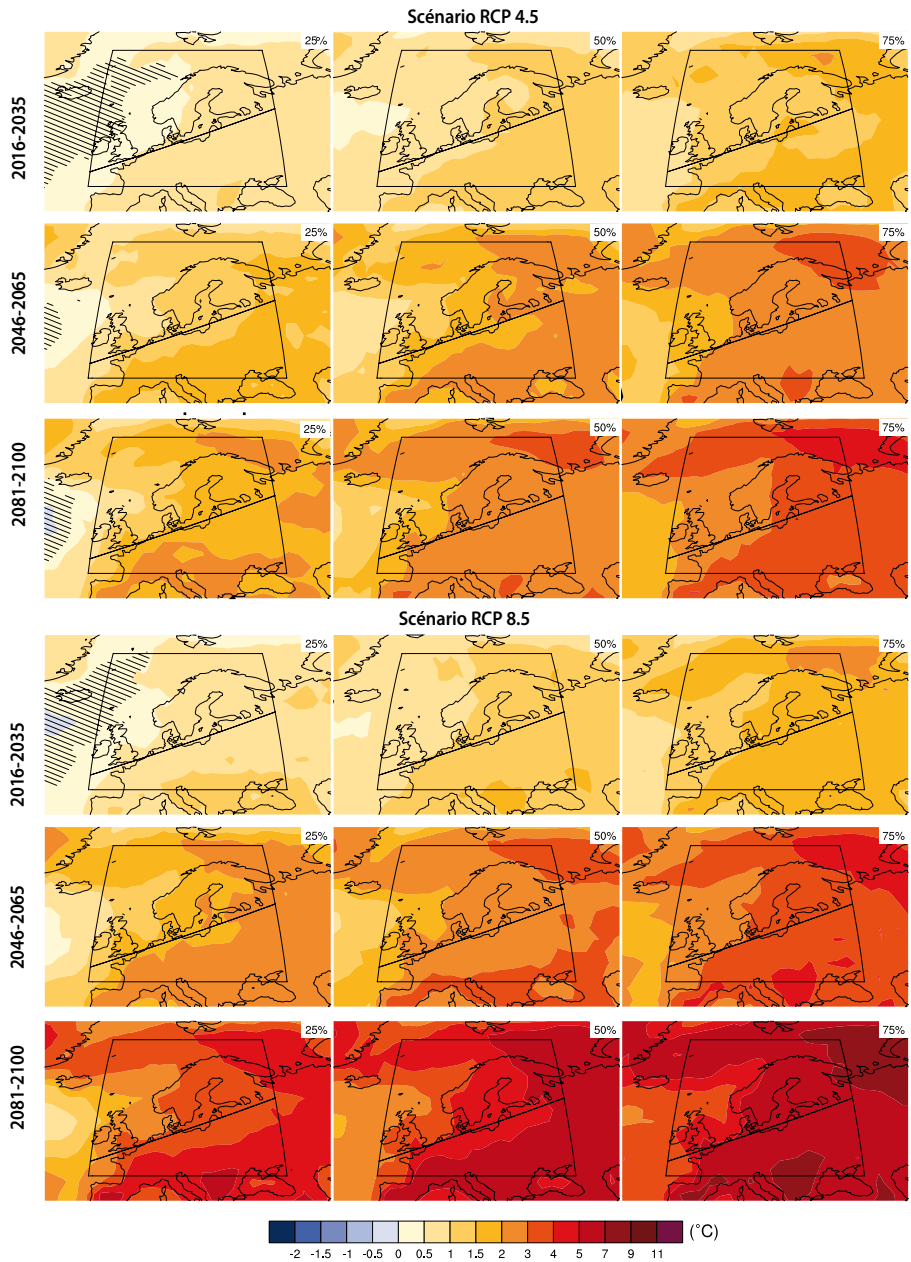
Le scénario RCP 4.5 correspond en moyenne globale à un réchauffement de 1,4 °C entre 1986-2005 et 2046-2065, et de 1,8 °C d'ici à 2081-2100.

Le scénario RCP 8.5 correspond en moyenne globale à un réchauffement de 2 °C entre 1986-2005 et 2046-2065, et de 3,7 °C d'ici à 2081-2100¹⁰.

10. Les changements régionaux pour d'autres scénarios sont disponibles sur climatechange2013.org, dans la rubrique « *Supplementary Material* » de l'Atlas des projections globales et régionales.

Figure 18

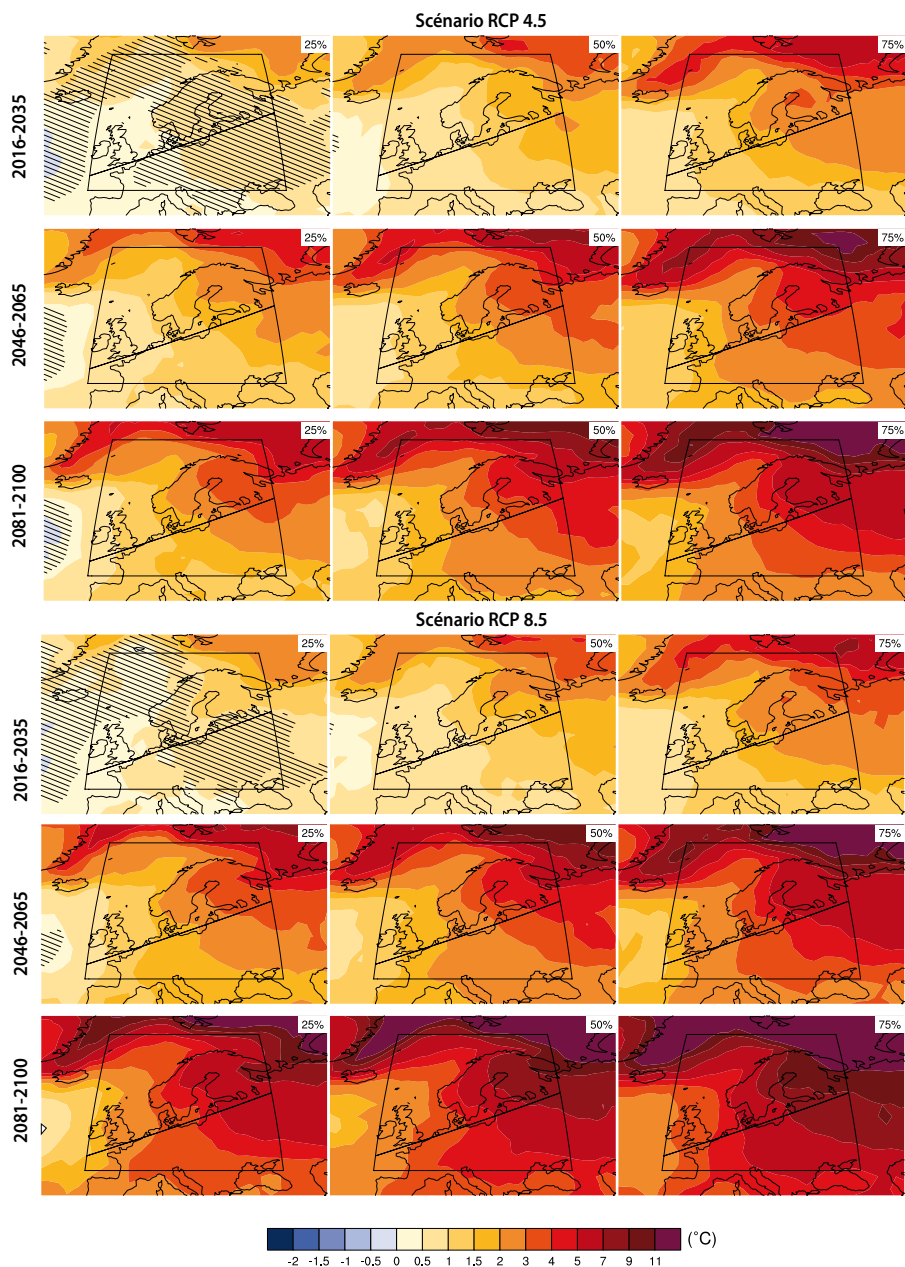
**Changements prévus des températures européennes hivernales
(de décembre à février)**



Source : rapport GIEC 2013 [2].

Figure 19

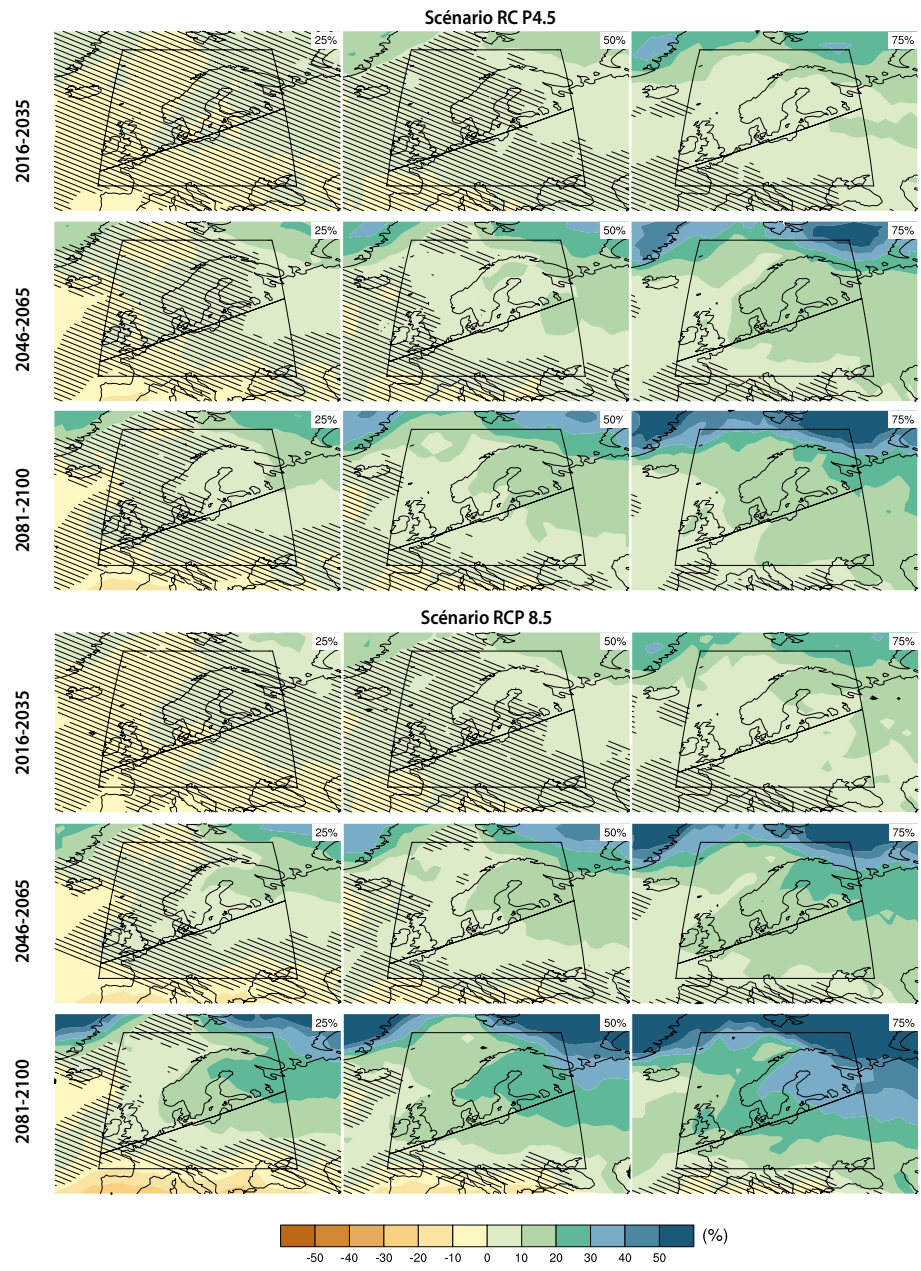
Changements prévus des températures européennes estivales (de juin à août)



Source : rapport GIEC 2013 [2].

Figure 20

Changements prévus des précipitations européennes d'octobre à mars
(saison froide)



Source : rapport GIEC 2013 [2].

Changements prévus des précipitations européennes d'avril à septembre (saison chaude)



Bascules et désadaptations

Objectifs d'étude

L'objectif est ici de cibler la santé des populations et, en faisant émerger des conditions corrélatives nouvelles, d'identifier et de hiérarchiser les problèmes de santé susceptibles d'apparaître à la suite des changements attendus, soit directement (diffusions épidémiques accompagnant le changement des conditions environnementales), soit indirectement (conséquences sur la santé d'événements extrêmes [76] ou d'une baisse de production agricole). Par exemple, le domaine « transports et changement climatique » est un thème souvent discret de l'action publique, mais il est important pour comprendre et illustrer les effets de double dépendance.

Éléments de méthodologie

Systèmes complexes non linéaires

Les relations peuvent s'établir en relations directes ou indirectes à partir de centres principaux (ou nœuds), qualifiant les relations d'interdépendance (théorie des réseaux) [figures 22 et 23]. La non-linéarité traduit le jeu complexe des relations qui s'établissent entre facteurs multidépendants. À l'équilibre, leur résultante ajoute aux risques de premier degré les effets de cascade aboutissant aux points de rupture du système.

Interactions, inter-dépendances et synergies

Concernant les impacts du changement climatique sur la santé humaine [figures 24 et 25], l'augmentation de l'interconnectivité des populations accroît les échelles d'action autant que l'intensité des impacts [78, 79], en raison tant de l'accroissement démographique que des vitesses accrues de diffusion de l'information ou de la propagation du risque.

Figure 22

Cartographie type d’une interconnexion des risques

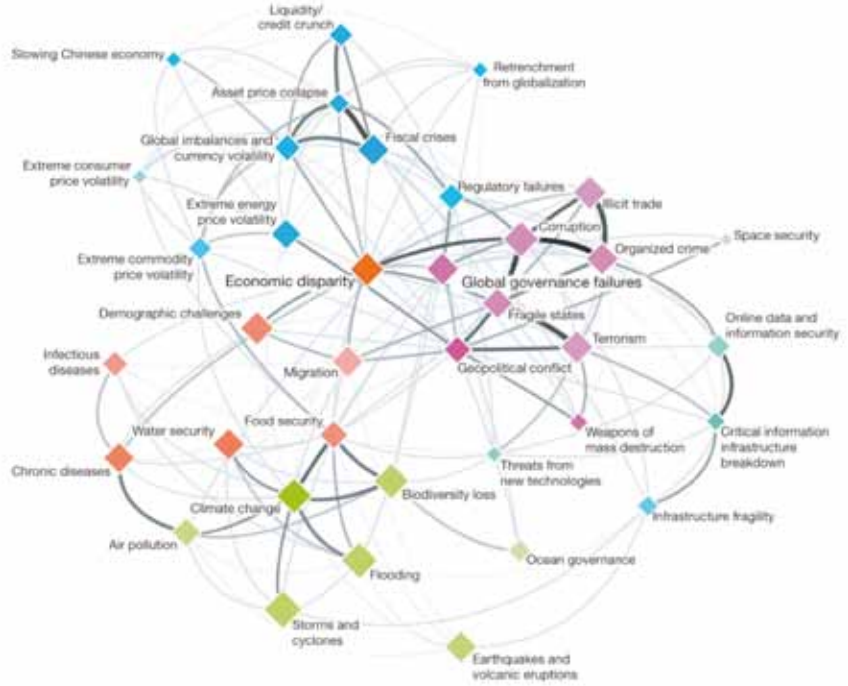
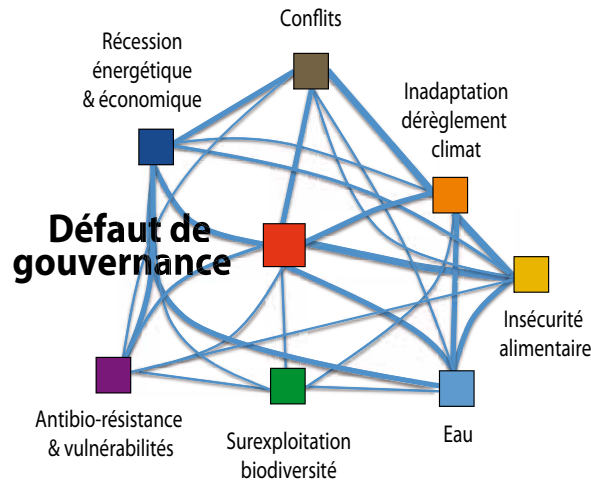


Figure 23

Source : adapté de Helbing D., 2013 [11].

Cartographie simplifiée de l’interconnexion des risques



Source : World Economic Forum 2013 [77].

Figure 24

Impacts systémiques dans le cadre de changements globaux et boucles de rétroaction environnement-santé

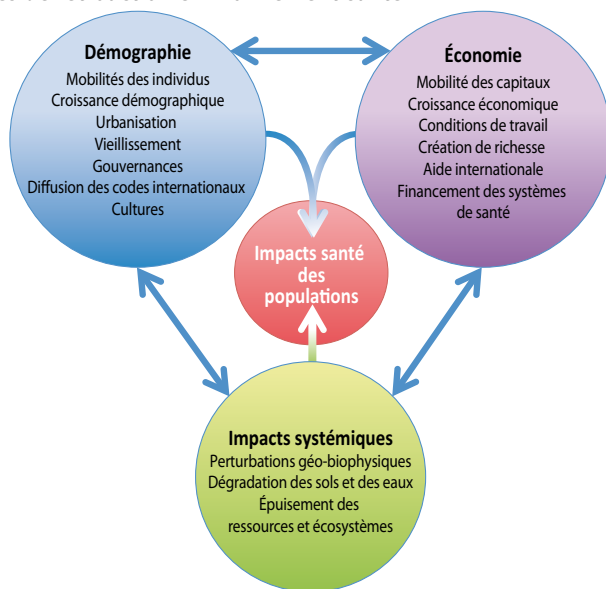
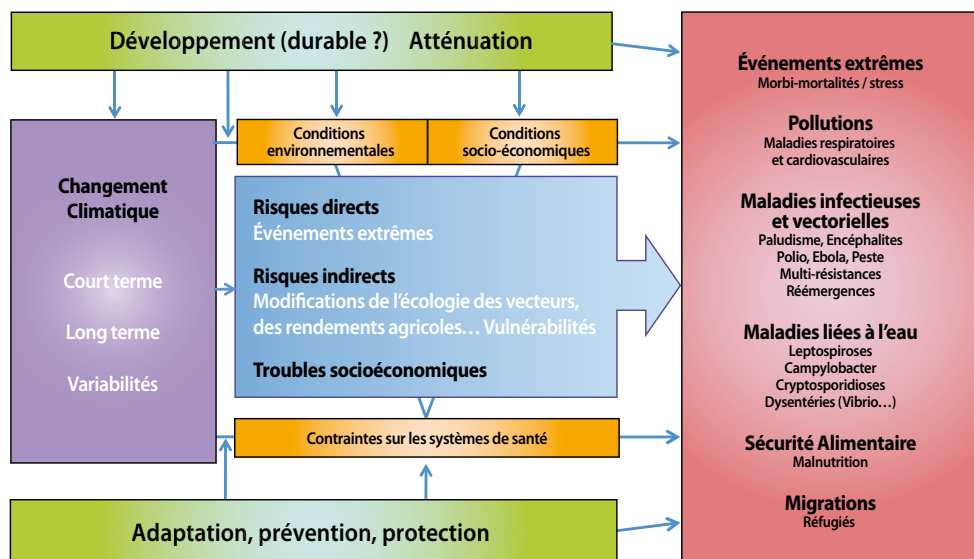


Figure 25

Exemples de scénarios d'adaptation



Source : adapté du rapport GIEC 2014 [55] et de Confalonieri U., 2007 [80].

Approche systémique

Ces méthodes peuvent être mises en œuvre afin de mesurer et d'anticiper plus précisément l'impact des changements environnementaux sur les populations.

Les travaux du PNACC sur le changement climatique mentionnent un nombre important de variables (population, climat, biodiversité, agriculture, énergie...) en interaction les unes avec les autres. Le développement récent des connaissances dans le domaine des sciences de la complexité met en évidence la difficulté de prédire les évolutions de variables fortement connexes. Usuellement, le nombre de paramètres à analyser est d'abord restreint afin de ne retenir que les composantes les plus significatives du problème [81-83] (à titre d'exemple, l'environnement, la génétique et les technologies ont un impact sur la santé). Ces grands paramètres se déclinent ensuite plus finement avant d'accroître le nombre de composantes à étudier.

Le degré d'intrication de tels systèmes est élevé, avec de nombreuses relations redondantes, formant un enchevêtrement de relations pondérées, parfois fortes, parfois faibles. À ce titre, il est important de noter que, de par leurs relations le plus souvent logarithmiques, l'impact sommé des multiples déterminants supposés « faibles » est largement supérieur aux effets observés des quelques déterminants dits « forts ». Par ailleurs, et dans des conditions de récursivité, la structure d'un système est autant une cause qu'une conséquence de l'intrication et de la dissipation (avec des propriétés d'autosimilarité que les mathématiques explorent au chapitre des fractals). L'auto-organisation donne ainsi l'impression que la structure émerge de la combinaison des interactions entre entités constitutives (dont l'énergie est un élément essentiel).

La prédiction du comportement de ces systèmes avec le temps est difficile [84]. Elle se fait à des coûts exponentiels mais peut s'attacher à décrire la dynamique autour de points d'équilibre (stables ou instables). L'objectif est alors d'identifier et de mesurer les liens significatifs entre les grands déterminants de la santé publique et ceux du climat, tels que mentionnés dans le PNACC, afin d'estimer les équilibres et les points de bascule à différents horizons temporels. A titre d'exemple, le lien entre l'augmentation de fréquence des ulcères de Buruli (infection cutanée à *Mycobacterium*) et l'intensité des précipitations a ainsi pu être reconstitué à partir d'une analyse des cycles pluriannuels et saisonniers en Guyane [85]. Avec le recours à de longues suites d'observations, par la qualité et la précision de leur mesure, et le recours à des méthodes nouvelles d'analyse des relations complexes non linéaires [86], la recherche peut ainsi révéler des interactions potentielles fortes et leurs effets de deuxième et troisième ordres.

Nomenclatures spatiale et temporelle

Dans le PNACC, les propositions et estimations portent sur le territoire national. Il convient d'apprécier plus finement l'échelle de traitement de l'information et des projections. On peut différencier plusieurs échelles : l'échelle globale (planète, monde), nationale étendue (France, DOM-TOM et voisins immédiats), métropolitaine (France continentale européenne) ou locale (régions et départements). Il conviendrait idéalement de traiter la question à plusieurs échelles, d'une part parce que le changement climatique n'est pas dépendant

des frontières mais aussi parce qu'un événement majeur en un lieu éloigné peut avoir des répercussions à long terme sur le territoire national. Cependant, dans le cadre des mesures du PNACC, on délimitera la définition nationale en optimisant localement les mesures observées pour les cas d'intérêt.

Les horizons temporels fournis par le PNACC sont ceux de 2050 à 2100. Nous resterons dans ce cadre, tout en nous intéressant à des intervalles de temps plus fins, de l'ordre de l'année ou de la décennie.

Identification des déterminants et de leurs interactions

Le PNACC cible l'environnement (eau, forêt, biodiversité, littoral, montagne) et son interaction avec l'homme (pêche, agriculture, aquaculture, industrie et énergie, infrastructures et transports, gouvernance...). Ces grands domaines constituent la liste des éléments d'intérêt pour une région géographique. D'autres aspects seront également déterminants, notamment l'épuisement des ressources énergétiques et les contextes économiques qui modifieront (et, le plus souvent, réduiront) les possibilités d'accès aux marchés (de l'énergie, de l'alimentation, de la santé...), et nos degrés de liberté pour atténuer les conséquences du changement climatique.

De nombreux auteurs, parmi lesquels le prix Nobel d'économie Robert Fogel, ont mené des travaux sur les horizons concernés par le PNACC avec des inquiétudes liées à la récente augmentation de la démographie humaine [87]. Il apparaît que ces questionnements sont aussi à mettre en parallèle avec le dérèglement climatique, car ces deux processus sont couplés : l'accroissement rapide du nombre d'habitants a eu un impact sur le réchauffement climatique (par le biais de la consommation des énergies fossiles, de la production de CO₂ et des autres produits secondaires de ces combustions) et il est probable que l'intensité des changements climatiques annoncée ait des effets démographiques importants au long terme.

Approches des experts, SWOT et scénarios

Il est important que l'ensemble des mesures proposées par le PNACC puisse initialement être évalué par des experts de chacun des domaines, afin d'estimer les mesures qui auraient un impact sanitaire significatif sur les changements liés aux altérations climatiques. Deux outils sont à considérer dans ce cadre visant à ordonnancer les mesures du PNACC : l'analyse SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats*) et la construction d'un jeu de scénarios.

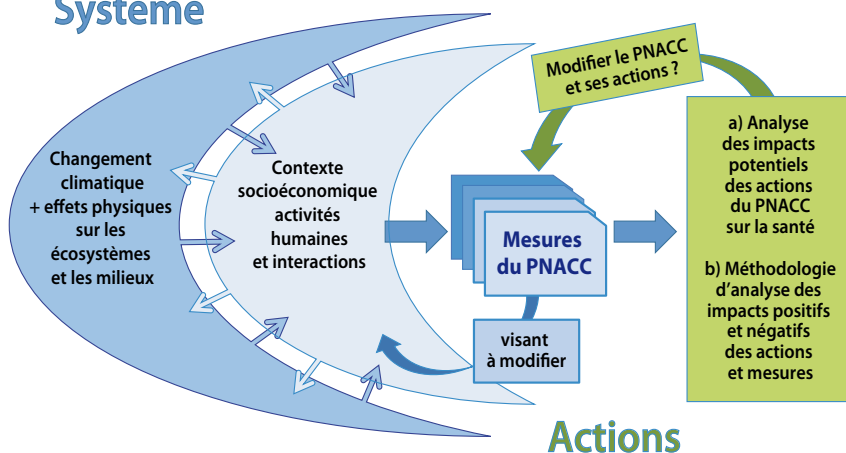
Définition de scénarios

Les options abordées dans les différents scénarios intègrent des variations du cadre systémique de référence portant sur les paramètres et l'intensité des changements climatiques comme sur les variations environnementales dans un cadre plus large, incluant les perturbations socioéconomiques [figure 26].

Figure 26

Scénarios potentiels et effets de l'évaluation sur la mise en place d'un plan et sur la déclinaison de ses mesures

Système



Source : Pierre Chapuy, Gerpa, 2013.

Une première approche peut tenir compte de l'avis des experts au sein de chaque domaine afin d'identifier les actions les plus susceptibles de conséquences sanitaires négatives. La seconde pourra décrire la succession des conséquences sanitaires de l'action avec mention explicite du contexte de départ (facteurs clefs, relations et hypothèses clefs) dans un environnement climatique, socioéconomique et humain « de référence » avec des modifications climatiques scénarisées (changements « de référence »). La dimension temporelle prospective sera établie en incluant la possibilité de plusieurs émergences (hypothèses d'évolution contextualisées) afin d'évaluer les effets sanitaires directs et, éventuellement, d'autres impacts (financiers, sociaux, etc.) dont les modes évolutifs seraient similaires.

Il convient alors de choisir un triptyque de référence associant changement climatique attendu, scénario socioéconomique et état de l'environnement, et de le décrire comme cadre systémique. Des écarts par rapport à ce triptyque ou à l'une de ses composantes seront ensuite étudiés : par rapport aux impacts ou aux actions « de référence », si l'hypothèse X (différente du schéma initial) est avérée, alors les écarts d'impacts et d'actions pourraient être de Y.

Il est important de noter que, dans les publications les plus récentes [88], les scénarios retenus sont ceux du « *business as usual* », ce qui montre que les revues médicales les plus lues ne s'embarrassent plus d'incertitude quant à notre capacité

à modifier encore nos trajectoires. Les comportements humains émergents sont désormais clairement retenus comme ceux qui dominent le monde à venir, comme ils l'ont aussi dominé par le passé. Démonstration en avait d'ailleurs été faite lors de deux évaluations indépendantes [89, 90], à trente ans d'écart du chemin parcouru depuis la publication du rapport Meadows [91].

En effet, dans une société qui a vu l'accélération technologique depuis deux cents ans — avec une fuite en avant quant à la fourniture de biens de consommation et les comportements associés à ces progrès techniques —, les changements d'un futur proche devront s'appuyer sur des ruptures radicales, qui sont pourtant difficiles à promouvoir (choix de sociétés démocratiques, stabilité sociale, décentralisation des décisions...).

Parmi les principaux facteurs de blocage :

- l'attraction maintenue pour l'innovation technologique stimulant la consommation ;
- la difficulté de sortir d'une culture du progrès technique pluriséculaire au profit d'une transition qui tâtonnera inmanquablement, simplifiera abusivement et échouera parfois ;
- le refus de traiter le problème chez soi autant que chez les autres (« *pas de ça dans mon jardin* ») face à toute forme de pollution ou de traitement des déchets ;
- l'incertitude propre à l'appréciation des phénomènes complexes qui rend les décisions difficiles à prendre ;
- la confusion sur les horizons temporels, qui évacue *a priori* un large ensemble de possibilités, déterminant pourtant en grande partie, les marges de manœuvre ;
- une perception insuffisante des bénéfices de long terme (tels que ceux des politiques post-carbone) en termes d'emplois, d'économie, d'attractivité ou de gestion des risques. Ces bénéfices restent trop vaguement mesurés, quand ils le sont, alors que les coûts et risques actuels sont toujours plus explicites (tels que la perte d'emplois immédiate) ;
- un enfermement des questions climatiques et énergétiques dans des débats techniques sectoriels, avec une implication trop réduite des citoyens, aux dépens des innovations sociales ;
- l'inadaptation des structures de gouvernance locale à des questions qui supposent une forte coordination globale, les problèmes de cohérence, de leadership, de mutualisation ou d'articulation sectorielles (foncier, infrastructures...) s'amplifiant ;
- la difficulté de définir des chemins de transition qui n'affecteraient pas les groupes sociaux déjà les plus précaires et vulnérables, c'est-à-dire de redéfinir le partage des contraintes au moment d'aller vers une sobriété qui ne soit pas subie par ceux qui sont déjà les plus contraints.

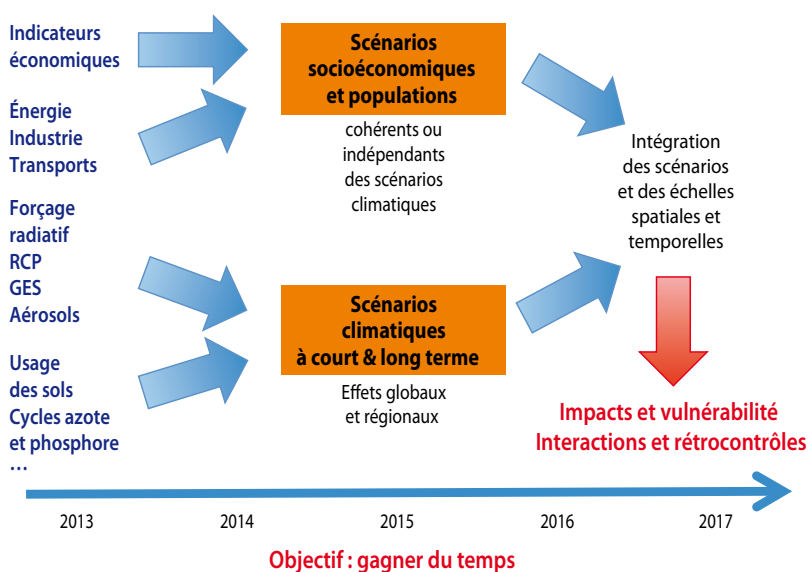
Les éléments à prendre en compte doivent alors permettre d'apprécier le plus objectivement possible les effets attendus et d'aider à affiner le jugement quant à l'atteinte et la validité des objectifs. Dans le souci de contribuer à l'amélioration

des options, ces éléments en préciseront le sens et les conditions. Mais le principal problème sera cependant de ne pouvoir qu'anticiper (de pré-dire) des conséquences potentielles, sans pouvoir les observer réellement. La méthodologie d'évaluation doit donc s'affranchir de certains critères d'une démarche conventionnelle d'expertise et recourir à la simulation des conditions à venir, visant à renforcer les possibilités de réorientation rapide.

Dans le même temps, la recherche de corrélations nouvelles conduit à la mise en place de scénarios originaux d'interaction. La recherche en adaptation découle alors de multiples processus de réflexion parallèles, dont l'objectif est de gagner du temps, compte tenu de l'urgence liée à l'accélération actuelle des risques [figure 27].

Figure 27

Développement de scénarios climatiques et économiques parallèles pour une étude plus rapide de leurs interactions



Source : adapté de Moss R.H., 2010, [92].

Par les simulations guidées, et le positionnement d'objectifs à atteindre, le but est de gagner du temps sur la démarche conventionnelle.

Perspectives

Ces méthodes devront être complétées par des approches plus systémiques, issues de la physique non linéaire telles que les développe notamment la Plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES¹¹). Trois grandes méthodologies peuvent être proposées, notamment pour ce qui

11. Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services.
http://www.ipbes.net/images/documents/plenary/second/working/2_17/Final/IPBES_2_17_en.pdf

concerne les horizons 2050 et 2100 : les systèmes multiagents, les automates cellulaires multidimensionnels et les systèmes dynamiques et leurs algorithmes [93].

Diverses approches holistiques ont été et continuent d'être développées : GIEC, IGSM-MIT [94], travaux de Meadows (MIT, [91]), Sornette (ETH Zurich, [95]) et Berthelot (Irmes, [96]). Ces approches globales excèdent le cadre du PNACC, mais elles sont importantes pour affiner les impacts territoriaux du changement climatique car des changements de grande échelle (modifications atmosphériques) peuvent ne pas être mis en évidence lors d'une analyse nationale stricte.

**Approches
discrètes et
continues**

Les approches numériques discrètes et continues sont intéressantes même si on préférera, dans un premier temps, investiguer les méthodes discrètes (par pas de temps et d'espace successivement restreints) avant de basculer sur des méthodes continues. Les méthodes discrètes sont en effet plus simples à initier et peuvent modéliser des processus complexes. Les méthodes continues fourniront ensuite des résultats plus précis mais elles sont plus délicates à mettre en œuvre rapidement.

**Définition du
domaine spatial**

Dans un souci de rapidité de mise en œuvre, les premières estimations peuvent être réalisées en deux dimensions sur des plans limités. Dans un deuxième temps, on incorporera des dimensions supplémentaires, comme c'est le cas avec les modèles « *end-to-end* » génériques [97], qui modulent les effets du changement climatique en altitude – comme en latitude – selon les gradients thermodynamiques attendus.

**Adaptation et
interactions**

Un des processus clefs à introduire dans la modélisation et les scénarios concerne les types d'interaction interindividus (coopération, compétition, coopérations compétitives) et l'interaction entre les individus et leur environnement qui peut avoir des effets sur le changement climatique. Elinor Ostrom, prix Nobel d'économie, a également souligné l'importance des interactions positives entre individus et écosystèmes [98].

Vulnérabilités

***Optima* des
capacités et
caractère multi-
dimensionnel
des
vulnérabilités**

Les liens sont directs entre les capacités (le phénotype) et les facteurs de santé, publique ou non. Le caractère public de la santé dépendant principalement de la représentation symbolique du nombre de personnes concernées et de l'intensité du drame qui les touche, il répond à la charge émotionnelle associée à un état pathologique – ou considéré comme tel à un moment donné – et évolue avec la mobilisation autour d'une maladie ou d'un de ses facteurs de risque. Ce problème résume le dilemme des efforts à produire dans le cas des changements climatiques et environnementaux : certes le nombre totalise à terme l'humanité entière – réchauffement compatible avec la poursuite de nos activités ? sixième grande extinction incluant notre espèce ? – mais l'intensité du drame en cours reste encore peu perceptible.

Au sein d'une population, les indicateurs de santé résultent de l'association de multiples fonctions (réalisations ou performances, au sens anglo-saxon du terme)

individuelles (immunitaires, respiratoires, rénales, cognitives...) et collectives, incluant les synergies sociales et les comportements émergents, qui dépendent de facteurs de prédisposition (principalement génétiques) et de paramètres environnementaux (y compris culturels) [99]. Considérées dans leur rapport deux à deux, ces relations sont le plus souvent simples, avec des indices maximisés autour de valeurs optimales : la relation entre l'âge et les principaux paramètres physiologiques culmine ainsi autour de 25 ans [100] ; c'est aussi l'âge auquel le risque de décès maternel à l'accouchement est le plus faible [101], révélant un autre aspect de la relation performance-survie [102].

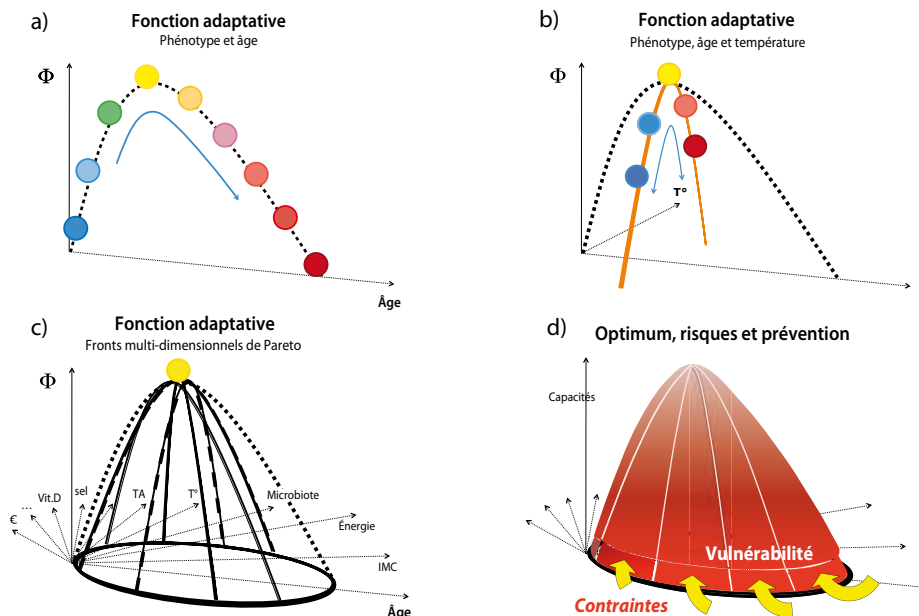
La complexité naît ensuite non du type de relation établie (qu'elle soit polynomiale ou biexponentielle) mais du nombre de relations intriquées. L'ensemble répond alors à la maximisation d'une fonction multitâche, décrite sous forme d'un front de Pareto [103], c'est-à-dire à l'optimisation d'un compromis résultant de choix d'allocations sous contrainte, en situation de ressources limitées. Cette fonction globale est elle-même soumise à sélection. Et c'est ce à quoi aboutit aujourd'hui notre double contrainte :

- environnementale par exploitation des ressources au-delà de leur capacité de renouvellement et par excès de dégradation secondaire (gaz à effet de serre et CO₂ issus de la combustion des énergies carbonées, accumulations océaniques) ;
- démographique avec une population humaine décuplée en quelques générations et une consommation énergétique *per capita* elle aussi décuplée dans le même temps, conduisant en deux siècles à l'évaluation d'une empreinte humaine supérieure de deux ordres de grandeur [104, 105].

Le risque principal se trouve aux confins de ces relations : lorsque les performances d'un système sont faibles, sa fragilité s'accroît à mesure que sa distance à l'optimum augmente (ce cas de figure se rencontre en général aux extrêmes de la relation, de part et d'autre de l'optimum, comme au début et à la fin du parcours) [figure 28]. La moindre perturbation le déstabilise et, passés les seuils de vulnérabilité, peut l'amener à s'interrompre. La multiplication des susceptibilités, connues ou non, rend les systèmes d'autant moins résilients. L'un de nos problèmes collectifs rejoint l'inconscience et, souvent, le déni de nos vulnérabilités [106].

Figure 28

Relations entre phénotype et facteurs de santé : optimisations, vulnérabilités, contraintes croisées et synergie des risques



Les relations entre le phénotype Φ (estimé par l'indicateur d'une capacité) et le facteur de santé (endogène ou exogène) sont le plus souvent simples. Les capacités passent par une valeur maximale (rarement plus d'une). A tout instant, elles s'optimisent dans un intervalle centré par cette valeur.

- La relation entre l'âge et les principaux paramètres physiologiques culmine autour de 25 ans – même si certaines fonctions cumulatives se révèlent plus tardivement [100]. Les capacités déclinent ensuite exponentiellement, tant pour les mesures individuelles que populationnelles, suivant une fonction de décroissance particulièrement simple.
- Pour deux relations évaluées simultanément (ici phénotype-âge et phénotype-température [T°]), la fonction procède d'une double optimisation dont le maximum culmine à 25 ans pour une température de 23°C (valeurs associées aux meilleures capacités de vitesse [107], comme au nombre minimal de décès quotidiens en France [108]).
- La multiplication des relations entre phénotype et facteurs de santé, interdépendants ou non (économie[€], énergie *per capita*, natrémie [sel], tension artérielle [TA], taux sérique de vitamine D, indice de masse corporelle [IMC] ou interactions bactériennes [microbiote]), conduit à un front multidimensionnel de Pareto, définissant une zone optimale au sommet de toutes ces relations. Par ailleurs, et dans un principe d'allocation optimisée des ressources, tout changement qui augmenterait la performance de l'ensemble n'est possible dans cette configuration qu'à la condition de réduire l'efficacité d'une tâche concurrente. Enfin les relations entre ces fonctions font également l'objet de régulations et d'optimisation [109].
- Les vulnérabilités s'accroissent par gradient exponentiel, à mesure que l'on s'éloigne de l'optimum c'est-à-dire du sommet des courbes de capacités physiologiques et donc de survie. Pour l'IMC, la survie décroît (la mortalité augmente) à mesure qu'on s'éloigne de l'intervalle 20-25 kg/m^2 (très vite vers les limites basses [$\sim 10 \text{ kg/m}^2$] rapidement incompatibles avec la vie, plus lentement vers les valeurs hautes [$> 100 \text{ kg/m}^2$]). Pour de multiples contraintes croisées (âge élevé + précarité + T° excessive + comorbidité), la prise en compte des plus fragiles nécessite une approche multiparamétrique intégrant la synergie des risques.

Source : Toussaint J.-F., Irmes, 2014 [99].

Catégories de risques sanitaires liés aux changements climatique

Antony McMichael a publié une première analyse des risques sanitaires en rapport, direct ou indirect, avec les dérèglements en cours [tableau 1].

Limites et facteurs de vulnérabilité liés à l'environnement

Johan Rockström synthétise les effets planétaires positifs, neutres ou délétères de l'activité humaine [110] [tableau 2, p. 66]. Il montre que, s'il n'y a pas à douter des bénéfices du développement humain, certains effets se sont cependant réalisés à des coûts très élevés pour les écosystèmes, dont certaines limites sont déjà dépassées, auxquelles l'usage des phosphates ajoute désormais d'autres risques [111, 112].

Sans doute faudra-t-il une ou plusieurs générations pour arriver à un consumérisme moins agressif, à moins que la clef de ce comportement ne soit au cœur du vivant... La sobriété sera-t-elle alors considérée comme une nécessité ou comme un choix maîtrisé avec une vision plus saine de la transition énergétique et climatique ? Cette transition sociale possible concernant les usages et une réelle frugalité conduiront à un autre rapport aux objets, mais elles devront s'inscrire dans la redécouverte de la proximité, la reconquête des espaces publics, la relocalisation des productions (plus artisanales) et de nouveaux modèles économiques : ville vivrière, âge de la connaissance, économie du lien... qui risquent seulement, après les phalanstères de Fourier et de Godin, de n'être que la dernière forme de nos utopies sociales [113].

Facteurs de vulnérabilités des populations

Sur un plan sanitaire, il est impossible de considérer le changement climatique isolément. Cette nécessaire globalisation a été soulignée dans la récente revue d'Antony McMichael dans le *New England Journal of Medicine* [78] [tableau 1]. Le contexte comprend de nombreux éléments – les limites d'adaptabilité planétaire [tableau 2, p. 66] – qui, pour la plupart, ont des incidences sanitaires connues [110].

La vulnérabilité des populations est d'abord dépendante du niveau de vie, que ce soit au niveau national ou planétaire. Dans toutes les régions du monde, la durée de vie et la mortalité sont avant tout dépendantes du PIB. Dans les pays développés, l'espérance de vie a crû de façon considérable et la vulnérabilité d'une population dépend essentiellement de l'âge. Les deux groupes à risque sont les deux extrêmes : les personnes âgées et les très jeunes enfants.

Tableau 1

Risques biologiques et médicaux liés aux changements climatiques selon leur origine

RISQUES PRIMAIRES	Conséquences sanitaires directes des paramètres climatiques • Conséquences liées à la température (coups de chaleur, effets de moisson, modifications de la mortalité hivernale) • Conséquences des événements climatiques extrêmes (cyclones, inondations, vagues de froid : manque d'accès à l'eau, risques psychiques, stress post-traumatique...) • Conséquences liées aux UV (cancers de la peau) • Dispersion et diffusion de polluants et d'agents infectieux pathogènes sous l'effet de la température (ou de certains événements climatiques extrêmes) • Amplification par les modes de vie et de construction (imperméabilisation des sols) et d'exposition (exposition solaire par exemple) • Amplification dans les populations les plus vulnérables, en particulier chez les personnes âgées et les populations précaires • Effets biologiques directs des changements climatiques (vernalisation, effets phénologiques, effets de nature génétique ou épigénétique)
RISQUES SECONDAIRES	Risques médiés par des changements de nature biophysique ou écologique • Modification des rendements agricoles, des réserves halieutiques et des flux d'eau • Vagues de pollution urbaine (ozone de surface, PM 2,5, nanoparticules) majorées par la chaleur, diffusion de molécules toxiques, augmentation des allergènes • Modification du compartiment microbiologique : biodiversité des eucaryotes (prolifération de pathogènes, diffusion des vecteurs) ou des procaryotes (microbiotes), modification de virulence, mutations et sélections d'origine thérapeutique • Impact sur la faune avec déplacement des réservoirs connus de pathogènes (maladie de Lyme), modification de répartition des vecteurs (<i>Aedes</i>...) • Risques liés aux impacts sur les infrastructures (risque d'incendie, risque sur les infrastructures de transport avec augmentation de la fréquence des accidents, défaut de refroidissement dans l'industrie, notamment énergétique...) • Dysrégulations des systèmes immunitaires
RISQUES TERTIAIRES	Effets plus diffus • Conflits armés (guerres climatiques, conflits de reconquête, guerres de la faim) ou tensions dues à la réduction de l'eau, de la nourriture ou de l'espace [44] • Problèmes mentaux dus aux déplacements de groupes • Problèmes spécifiques liés aux minorités réfugiées • Impacts socioéconomiques : modification des organisations sociétales pouvant augmenter les inégalités, la pauvreté, l'économie et les facteurs sociaux de la santé

Source : d'après McMichael A.J., 2013 [78].

Tableau 2

Impacts planétaires de l'activité humaine et facteurs de vulnérabilité humaine liés à l'environnement

Effets bénéfiques de l'activité humaine	• Augmentation de la durée moyenne de vie • Réduction de la fréquence des famines • Diffusion généralisée des connaissances • Contrôle des infections • Facilitation des transports
Effets planétaires encore récemment considérés comme neutres	• Urbanisation croissante (mais effets déjà mesurables sur les vents et les courants aériens au-dessus et autour des métropoles) • Introduction d'espèces étrangères (avec modifications des équilibres écologiques)
Limites non encore dépassées ?	• Acidification des océans • Augmentation de la quantité de phosphates déversée dans les océans • Augmentation de la consommation d'eau douce • Augmentation du pourcentage de terres arables et déforestations • Augmentation de la concentration atmosphérique en particules polluantes • Pollutions chimiques (organiques, plastiques, endocrines, métaux lourds, déchets nucléaires)
Limites dépassées	• Changement climatique global (radiations, CO₂) • Augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes • Changement de la biodiversité des eucaryotes et des procaryotes • Augmentation de la quantité d'azote prélevée dans l'atmosphère pour l'usage de l'homme [114]
Autres limites majeures et facteurs de vulnérabilité	• Augmentation de la population mondiale - • Planétarisation de certains conflits • Élévation du niveau des mers • Réchauffement des océans • Prélèvements halieutiques excessifs • Surexploitation de la biodiversité • Gaspillage alimentaire, surconsommation • Augmentation de la production de déchets. Déplacement des ressources renouvelables (stocks de poissons) et migrations humaines subséquentes • Augmentation de la production carnée mondiale (de 137 millions de tonnes en 1975 à 286 millions de tonnes en 2010, le troupeau mondial d'un milliard de bovins générant 18 % des émissions des gaz à effet de serre, principalement par production de méthane) • Accroissement planétaire des inégalités sociales • Augmentation des dépenses énergétiques malgré la réduction progressive des ressources fossiles

Source : d'après Rockström J., 2009 [110] et McMichael A.J., 2014 [41] et 2013 [78].

La vulnérabilité dépend donc aussi d'un très récent facteur d'origine anthropogénique : le vieillissement des populations. L'augmentation de la durée de vie a été continue depuis la fin du XVIII^e siècle (avec quatre interruptions transitoires dues aux grands conflits européens) même si son taux de croissance ralentit depuis quelques années [115, 37], suggérant les premiers éléments factuels d'un phénomène de saturation évoqué depuis longtemps [116]. Le vieillissement peut être aujourd'hui considéré comme le processus incarnant la flèche du temps et son impact sur toutes les structures du vivant, par le biais de la croissance de l'entropie [117, 118]. Il révèle l'instabilité des composants autant que la fragilité des mécanismes de réparation [119]. L'apparition de la cellule sénescence est un événement récent qui a modifié le paysage médical contemporain. La biologie de la sénescence montre que ces cellules et leurs interactions facilitent le développement de trois groupes d'affections (cancers, maladies cardiovasculaires et affections neurodégénératives) avec des modifications de nature plus systémique [120, 121].

Enfin, les vulnérabilités immunitaires et métaboliques, également liées à l'activité humaine récente, sont complexes à évaluer car il en existe plusieurs facettes contradictoires : carence nutritionnelle (liée à la précarité et au niveau de vie) vs excès alimentaire et sédentarité (augmentation du poids moyen des individus mais aussi croissance du nombre de sujets obèses dans les pays développés comme dans les économies émergentes et les BRICS¹²). En revanche, l'un des risques immunitaires principaux pourraient provenir d'une distanciation désormais trop grande avec le vivant (en rapport avec l'urbanisation notamment) entraînant une autoréactivité de nos systèmes (le système immunitaire s'activant contre soi-même) et une incidence plus élevée de maladies auto-immunes [122].

Du fait de ces vulnérabilités et des risques émergents, un nouveau paysage médical est en train de se dessiner sous la forme d'une seconde transition épidémiologique, dont on définira les principales caractéristiques [voir «Un nouveau paysage médical» page 76].

Globalisation et limites d'adaptation

L'activité humaine contemporaine modifie largement notre environnement planétaire dans sa globalité, et pas seulement son climat. Il est donc impossible de considérer les conséquences sanitaires du changement climatique isolément ; les interférences entre ces différents paramètres sont beaucoup trop nombreuses. S'il faut bien parler d'écologie de la santé face aux changements considérables engendrés par l'homme, il faut aussi parler d'écologie globale car les changements environnementaux anthropogéniques ne sont pas limités aux seuls agents infectieux¹³.

Cette même activité humaine a eu, et conserve encore, de nombreux aspects bénéfiques, qui ont cependant tous un revers délétère : on vit plus longtemps mais, de ce fait, on meurt maintenant de maladies non transmissibles favorisées

12. BRICS : Brésil, Russie, Inde, Chine et Afrique du Sud.

13. Ce point est également souligné par Yves Coquin (Direction générale de la santé) dans un rapport sur le changement climatique publié par l'Onerc après la vague de chaleur de 2003.

par la sénescence. Ces modifications sont telles que l'on peut se demander si l'homme pourra vraiment s'y adapter. L'activité et les découvertes scientifiques humaines ont réduit, peut-être transitoirement, mais avec efficacité le nombre des infections et des famines, et ont facilité les communications et les échanges. Ces effets bénéfiques sont, pour l'essentiel, l'apanage des pays développés et, même dans ces pays, bénéficient surtout aux classes sociales les plus aisées¹⁴.

La liste de tous ces effets anthropogéniques est longue [tableau 2], elle fait état d'un certain nombre de limites¹⁵, dont trois au moins sont maintenant dépassées : le dérèglement climatique, les modifications de la biodiversité et l'accumulation d'azote [110].

Les deux premières de ces limites ont des conséquences médicales bien identifiées. D'autres facteurs ne sont pas loin d'avoir également atteint leurs limites : augmentation de la quantité de phosphates déversée dans l'océan, ozone stratosphérique, acidification de l'océan, augmentation de la consommation d'eau douce, diminution du pourcentage de terres arables et déforestations, augmentation de la concentration atmosphérique en particules polluantes, pollutions chimiques (organiques, plastiques, endocrines, métaux lourds, déchets nucléaires) et en particulier les pollutions marines.

Dans ce contexte, le changement climatique est un risque, indiscutable, mais c'est surtout un indicateur qui ne peut être dissocié des autres modifications. Ce changement inclut non seulement le réchauffement global mais aussi l'augmentation de fréquence et d'intensité des événements extrêmes qui en dépendent, comme les vagues de chaleur et de froid, les inondations et précipitations excessives, les sécheresses et l'intensité des cyclones ; tous ont aussi de multiples conséquences sur la santé publique.

Les modifications de la biodiversité sont, elles aussi, étroitement liées à celles du climat dont elles dépendent en partie. La biodiversité des eucaryotes pluricellulaires (animaux, végétaux et champignons) diminue rapidement. Elle peut être spectaculaire au niveau de certaines espèces animales. Cette baisse n'a qu'une incidence médicale relativement modeste dans nos pays – avec effet de dilution au niveau des vecteurs [123] – mais l'épuisement des forêts et des stocks halieutiques peut conduire des populations à la famine (Haïti, Madagascar).

Grâce aux nombreuses études faites sur deux écosystèmes microbiens – tube digestif humain [124] et sol [125, 126] –, il semble que la biodiversité des procaryotes (bactéries surtout) et des virus [127] change aussi avec un impact préoccupant sur l'incidence de certaines maladies [128], qui devraient faire l'objet

14. Voire, dans une même ville, dépendent du niveau de vie. Une étude d'Olivier Cha (présentée à l'Académie nationale de médecine dans sa séance du 05/02/2013) a montré que la durée de vie moyenne des personnes sans domicile fixe, population vulnérable entre toutes, était à Paris de 47,6 ans, soit 35 ans de moins que la durée de vie moyenne dans cette ville et que, dans cette population particulière, les infections étaient la cause prédominante de mortalité (la tuberculose y était notamment trente fois plus fréquente que dans la population générale).

15. A. J. McMichael [78] parle même d'un « *nouveau syndrome* » associant démographie planétaire, impacts environnementaux systémiques, urbanisation excessive, consumérisme, augmentation des inégalités sociales.

d'études plus approfondies. Parmi les autres facteurs en interaction potentielle avec le changement climatique, il faut citer les pollutions par les nouveaux agents chimiques mis en circulation, herbicides et pesticides¹⁶ notamment, et l'usage des antibiotiques au sens large, qui sélectionnent certaines propriétés bactériennes et virales, à l'origine de nouvelles souches et d'épidémies modernes.

Risques émergents

Rayonnement solaire

Le premier des risques est celui directement généré par l'élévation thermique et l'ensoleillement. Le rayonnement solaire, surtout quand il est excessif lors des vagues de chaleur, peut affecter directement la santé d'au moins deux manières : soit, lors des vagues de chaleur, en augmentant la température corporelle au-delà des limites tolérées par le système nerveux central ; soit en favorisant, par sa composante UV, la survenue de mélanomes ou d'autres types de cancers cutanés.

Pollutions atmosphériques

Ces pollutions sont, selon l'OMS, responsables de plus de deux millions de décès prématurés dans le monde. Les principaux polluants atmosphériques sont, d'une part, les particules en suspension et, d'autre part, des gaz tels que le SO_2 , le CO, l'ozone¹⁷, les oxydes d'azote NO_2 et NO (la part du plomb relargué dans l'atmosphère a diminué en France depuis son interdiction dans les étapes de production de l'essence). Il faut associer les effets négatifs de l'ozone sur les rendements et la qualité des récoltes. Les particules fines de diamètre inférieur à $2,5 \mu\text{m}$ de diamètre (PM 2,5) et les particules ultrafines ($< 0,1 \mu\text{m}$)¹⁸, surtout en zone urbaine, sont associées à une augmentation de la morbidité et de la mortalité respiratoire et cardiovasculaire (infarctus du myocarde, AVC, arythmies). Cette pollution agit plus comme un catalyseur des accidents ischémiques que comme un agent de risque à long terme. Ce type de pollution est aussi un facteur de mortalité respiratoire (bronchite et asthme) et de la survenue de cancer du poumon. PM 2,5 et ozone varient généralement de pair. Et, même si elle est associée à d'autres gaz d'origine anthropique tels que les oxydes d'azote, la production d'ozone est fortement corrélée aux changements de climat, alors que la pollution particulaire dépend plus fortement d'autres facteurs non climatiques, pour la plupart anthropogéniques.

16. On regroupe surtout sous ce terme les insecticides (2 100 tonnes vendues par an en France), les herbicides (26 800 tonnes) et les fongicides (36 920 tonnes). Ces produits font l'objet d'une réglementation particulière, nationale et européenne, et environ trois cents d'entre eux sont autorisés en France [129].
17. Plusieurs analyses importantes ont démontré une augmentation significative de la mortalité journalière à partir d'une concentration d'ozone supérieure à 10 ppm (particules par million en volume). En Europe, le seuil de 35 ppm a été pris comme limite au-delà de laquelle des mesures doivent être prises, le seuil de 50 ppm est considéré comme alarmant. La concentration en ozone est responsable d'environ 20 000 décès prématurés en Europe, et on estime que la mortalité croît de 0,22 % pour une élévation journalière de huit heures de 5 ppm de l'ozone. Globalement, l'une des données solidement établies est l'existence d'une relation positive complexe entre la concentration en ozone de surface et les mortalités globales et cardiovasculaires [130, 131].
18. Un des composants majeurs de ces particules provient de l'usage du diesel, mélange complexe longtemps subventionné en France, dont l'effet délétère est, en partie, majoré par les changements climatiques. Le diesel, comme nombre de polluants chimiques générés par l'activité industrielle, est potentiellement cancérigène [132]. Ces particules favorisent les maladies cardiovasculaires et l'asthme, mais ont aussi une incidence sur le développement fœtal.

Allergènes Le dérèglement climatique, en modifiant les impacts saisonniers et la synchronisation des espèces, peut être responsable de l'apparition précoce des pollens et des spores fongiques. Il agit aussi en augmentant la concentration en allergènes de chaque grain de pollen et en changeant la distribution de nombreuses plantes allergisantes. Le réchauffement climatique est responsable de ces changements en modifiant la phénologie des plantes du fait de printemps à la fois précoces et prolongés, mais l'effet du réchauffement dépend aussi de la température de l'hiver qui a précédé et de la concentration en CO₂ [132, 134].

Risques toxiques La grande majorité des pollutions terrestres et aquatiques ne sont pas directement d'origine climatique mais leur diffusion en dépend fortement. Le rapport 2010 du NIEHS (*National Institute for Environmental Health Sciences*) [135] souligne les risques, mal évalués, que constituent (i) le transfert dans l'atmosphère de composés cancérogènes volatils ou semi-volatils lors des vagues de chaleur, (ii) la diffusion, à l'occasion de précipitations accrues ou d'inondations, de substances chimiques toxiques jusque-là localisées dans des espaces plus restreints.

En France, l'InVS a lancé en 2014 l'étude épidémiologique transversale Esteban¹⁹ sur un échantillon de cinq mille personnes, visant à identifier les niveaux d'imprégnation des Français à une centaine de substances potentiellement délétères pour la santé. Par ailleurs, l'étude prospective Elfe²⁰, lancée en 2012, présente un objectif comparable mais cible une population de dix-huit mille enfants suivis depuis leur naissance.

Pathogènes De nombreuses études microbiologiques ont montré combien les changements environnementaux, climatiques en particulier, pouvaient modifier et rendre imprévisibles les évolutions d'espèces microbiennes. Plusieurs listes, concordantes, d'agents capables de causer des infections chez l'homme ont été publiées. De récents travaux [136, 30] ont identifié plus de 1 400 espèces pathogènes chez l'homme, la majorité d'origine zootique (bactéries, rickettsies, helminthes, virus et prions, champignons, protozoaires...) et dont 10 à 20 % sont considérées comme émergentes. L'augmentation des échanges et de la densité de la population humaine constitue un autre facteur émergent favorisant la diffusion de ces agents pathogènes. L'apparition de la dengue autochtone ou du chikungunya en territoire métropolitain et l'évolution des épidémies actuelles aux Antilles et en Guyane, au regard de la propagation de leur vecteur, tout comme l'augmentation de l'incidence des dysenteries à *Vibrio* plus au nord [figure 29] sont les exemples actuels de ces interactions.

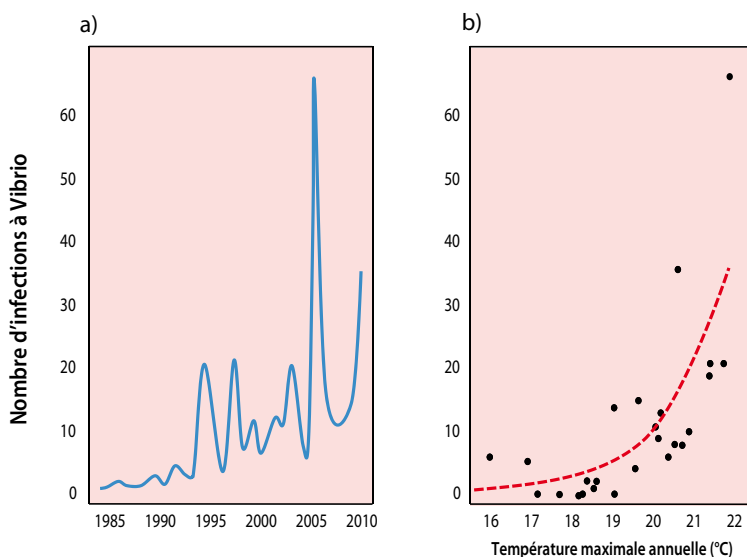
Cette élévation multifactorielle des infections à *Vibrio* dépend des blooms zooplanctoniques dans les milieux marins côtiers, thermodépendants et saisonniers, autant que des facteurs anthropiques liés notamment à l'augmentation de la densité démographique sur les rives baltiques.

19. Étude de santé sur l'environnement, la biosurveillance, l'activité physique et la nutrition.

20. Étude longitudinale française depuis l'enfance.

Figure 29

Évolution de 1985 à 2010 du nombre d'infections à *Vibrio* selon la température de surface en mer Baltique



Évolution du nombre d'infections à *Vibrio* dans les pays situés autour de la mer Baltique (a), en fonction de la température marine de surface (b).

Source : adapté de Baker-Austin C., 2013 [137].

Rendements agricoles et ressources halieutiques

Le dérèglement climatique est à l'origine de sécheresses et d'une baisse globale des rendements agricoles, dont le retentissement sur la santé — le degré de nutrition — a été maintes fois documenté. Les conséquences de ces déficits agricoles sont, bien évidemment, très variables selon le degré de développement et d'organisation du pays et dépendent de nombreux autres paramètres, de nature environnementale, socioéconomique et politique en particulier. L'effondrement des ressources halieutiques et la détérioration des fonds marins sont des données bien établies et ne sont pas la conséquence de la seule baisse de la biodiversité ; leurs conséquences sont considérables, en particulier pour l'apport en nutriments dont la mer est la seule origine. L'accroissement du nombre de zones anoxiques au niveau mondial (« *dead zones* »), imputable à l'activité humaine, en est une. Ces risques peuvent être qualifiés de secondaires [tableau 1, p. 65] [78].

Épidémiologie et indicateurs nouveaux

L'activité humaine contemporaine a généré de nouveaux équilibres sanitaires. Certains, aux effets positifs comme l'augmentation de la durée de vie, comme d'autres, tels que l'augmentation de la population ou l'urbanisation, peuvent être qualifiés d'anthropogéniques. D'autres sont des conséquences directes plus problématiques des changements environnementaux ou des modifications de la biodiversité associés à l'activité humaine. Un classement tient compte de ces fluctuations (même s'il en sous-estime l'un des facteurs centraux : le niveau de vie)²¹. La réduction des rendements agricoles sera, par exemple, l'une des conséquences directes du réchauffement climatique [138], mais elle touchera sans doute le paysan ariégeois avant l'industriel parisien. Il en va de même, à l'échelle planétaire, pour la plupart des autres risques liés à l'anthropisation.

Fluctuations saisonnières de la morbi-mortalité

Les variations saisonnières ont une influence directe sur la mortalité et la morbidité. Les maladies cardiovasculaires et pulmonaires sont, par exemple, très dépendantes des saisons. Par ailleurs, les vagues de chaleur peuvent augmenter de façon dramatique la mortalité en raison de l'inadaptation de nos systèmes nerveux centraux, qui ne peuvent supporter des températures trop élevées. Ces variations sont analysées en France par l'InVS et le Centre d'épidémiologie sur les causes médicales de décès (CépiDc) de l'Inserm [139-141]. Il faut y ajouter les rapports de l'Onerc [48], [67], [142] et celui du *Department of Health* du Royaume-Uni [143].

21. Une étude du cabinet britannique d'analyse des risques Maplecroft, parue le 30 octobre 2013, définit un index de vulnérabilité au changement climatique. L'étude identifie soixante-sept pays comme les plus exposés aux événements climatiques. De façon peu surprenante, les dix pays les plus exposés sont des pays comme le Bangladesh, Haïti... qui appartiennent au groupe des pays sous-développés essentiellement de l'hémisphère Sud. Le dernier cyclone (Phallin) qui ait touché l'Inde a détruit 1 million de tonnes de riz et 4 milliards de dollars d'infrastructures. Inversement, les pays à moindre risque sont tous situés dans l'hémisphère Nord, la France étant 164^e et les États-Unis 158^e (Audrey Garric, supplément Géopolitique du *Monde*, 7 novembre 2013, p. 7).

Globalement, il existe une relation statistique très forte entre mortalité et température externe. La relation a la forme d'une courbe en U avec une mortalité hivernale plus élevée fin janvier, un pic estival fin juillet — qui se renforce avec les vagues de chaleur (à la fois plus fréquentes et plus intenses depuis quelques années) — et un optimum thermique variable selon la région, son altitude et sa latitude (il se situe entre 20,6 et 23,6 °C à Paris) [140].

Mortalité hivernale

Au cours de l'année, la mortalité quotidienne oscille selon un cycle avec un pic hivernal, plus accentué dans les régions tempérées [144]. Une analyse détaillée des causes de cet excès a montré qu'en dehors de la grippe et des infections, il était linéairement corrélé à la mortalité cardiovasculaire et plus spécifiquement à son origine coronarienne [145] et ses deux corollaires : mortalité par insuffisance cardiaque [146] et par accident vasculaire cérébral [147].

L'impact du réchauffement climatique global sur la mortalité hivernale est, pour l'instant, sujet à discussion, soit que le réchauffement affecte peu cette période, soit que les variations climatiques attendues soient plus brutales [144].

La périodicité de l'infarctus du myocarde est, par exemple, modifiée par la survenue d'événements climatiques violents, comme cela a été le cas lors du cyclone Katrina à La Nouvelle-Orléans. Cela laisse envisager un changement dans la périodicité des infarctus du myocarde en cas d'événements climatiques extrêmes répétés [148].

Mortalité estivale

Les vagues de chaleur

La mortalité augmente aussi l'été, sur une plus courte période, de fin juillet à début août, selon l'importance de l'élévation thermique. Les vagues de chaleur sont une donnée récente, illustrée dramatiquement durant l'été 2003 en France. D'autres vagues ont été identifiées en 1975, 1976, 1983, 1990 et 2001, accompagnées à chaque fois d'une surmortalité, mais aucune de l'importance de celle de 2003. La vague de chaleur qui s'est produite entre le 4 et le 19 août 2003 s'est accompagnée d'une surmortalité spectaculaire corrélée à la fois à la température maximale diurne et à la température minimale nocturne. Le lien entre les vagues de chaleur et la surmortalité est documenté dans de nombreux autres pays, comme les États-Unis (Chicago, 1995) ou la Russie (2010). La surmortalité dépend de la durée de l'exposition, de l'existence d'îlots de chaleur urbains et des facteurs de vulnérabilité individuels (âge, isolement, niveau économique, maladies associées, capacités d'atténuation).

L'analyse confirme que la hausse des décès lors de la canicule de 2003 fut particulièrement élevée pour des causes directement liées à la chaleur (coup de chaleur, déshydratation). Mais la plupart des autres causes de décès furent également en excès lors de cette vague²², soulignant l'importance des facteurs

22. Sur les 15 000 décès en excès, 3 306 décès ont été causés par des coups de chaleur ou une déshydratation, 3 004 étaient d'origine vasculaire, 1 365 d'origine respiratoire et 1 001 d'origine neurologique [21].
Le coup de chaleur est un syndrome caractérisé par l'élévation de la température centrale au-delà de 40 °C.
Il associe confusion mentale, délire, convulsions et/ou coma, et engage directement le pronostic vital.
La température extrême supportable par un organisme humain est d'environ 42 °C pendant une à huit heures.
Au-delà de 49 °C apparaissent en quelques minutes une coagulation des protéines, une liquéfaction des lipides membranaires et des nécroses cellulaires.

de vulnérabilité tels que l'âge, l'isolement et les comorbidités. Une population âgée, fragile et à faible capacité d'adaptation sera d'autant plus à risque dans ces conditions dégradées.

La démonstration de la relation température-mortalité durant l'été 2003 a conduit à la mise en place d'un système d'alerte, le Plan national canicule [Annexe 1, p. 128], validé par des études *a posteriori*. Ce plan a notamment été activé entre les 11 et 28 juillet 2006 lors de la vague de chaleur qui a mis en alerte soixante-neuf départements pendant dix-huit jours. Il a sérieusement diminué la vulnérabilité de la population et réduit le nombre de décès attendus sur cette période [140, 141].

Mesures préventives

Le Plan national canicule a pour objectif « *la prévention et la gestion de crise afin de réduire les effets sanitaires d'une vague de chaleur* » analogue à celle qui a touché notre pays en 2003. En 2006, la France a connu une autre vague de chaleur importante. Une étude menée conjointement par l'InVS et l'Inserm a permis de démontrer son efficacité puisque l'excès de mortalité observé en juillet 2006 a été trois fois moins important (2 000 au lieu de 6 500) que ce que l'on aurait pu attendre au regard des modélisations antérieures. Ce résultat relève essentiellement de l'information des citoyens et des actions de prévention et de gestion de ces risques depuis 2003, à tous les niveaux et désormais à celui des agences régionales de santé (ARS) [Annexe 1, p. 128].

Une affirmation répandue est que la climatisation généralisée permettrait d'éviter des drames comme celui de 2003. L'Agence française de sécurité sanitaire environnementale (Afsse) a publié un rapport sur ce sujet dont on peut tirer certains enseignements [149]. Lors de vagues de chaleur, la climatisation ne peut en effet que compenser des erreurs de conception et de gestion d'un bâtiment. Une évolution des concepts architecturaux concerne en premier lieu les constructions neuves, mais aussi la rénovation du parc existant. Il faut mettre en œuvre une politique de gestion des ouvrants et, d'abord, utiliser les locaux naturellement rafraîchis et assécher les pièces humides pour faciliter l'évaporation et la transpiration. Si on ne peut faire autrement que de climatiser, il faut alors dimensionner l'installation pour une utilisation économe à long terme, avec des appareils pouvant fonctionner au-delà de 35 °C, prévoir dès la construction les passages d'air et de fluides correctement dimensionnés et ne pas faire descendre la température trop bas (une température de 7 °C de moins que la température extérieure est acceptable en période de canicule). Il faut enfin prévoir l'entretien de ces installations, qui, s'il est mal fait, peut générer des risques infectieux et allergiques ainsi qu'une pollution sonore.

Un nouveau paysage médical

L'activité humaine a créé un nouveau paysage et le réchauffement climatique n'est, bien évidemment, pas seul en cause dans ces bouleversements. Deux rapports sur le sujet, l'un qui concerne les États-Unis [135], l'autre le Royaume-Uni [143], sont particulièrement informatifs. Tous deux soulignent la variété des impacts directs spécifiques des changements climatiques actuels sur les grands secteurs de la santé. Encore faut-il, avant de parler de maladies émergentes, faire un état des lieux.

Les deux transitions épidémiologiques récentes

Ce qu'on appelle « transition épidémiologique » définit d'abord un moment dans l'histoire de la santé : celui où, grâce au contrôle de certaines maladies infectieuses, la mortalité infantile s'effondre et la durée moyenne de vie augmente. Ce moment est mesurable dans un espace géographique précis, les pays développés européens et nord-américains, à partir du milieu du XIX^e siècle. Cette transition apparaît actuellement dans certains pays émergents.

Depuis une cinquantaine d'années, le paysage médical contemporain s'est à nouveau modifié de façon considérable du fait de l'augmentation de la durée de vie et de l'apparition d'un groupe majeur d'affections : les maladies dégénératives, liées à l'âge, principalement dues aux conséquences logiques de l'étape précédente. On peut ainsi définir une « seconde transition épidémiologique ». D'une part, de nombreux risques et de nombreuses affections peuvent aujourd'hui être considérés comme émergents, c'est-à-dire que leur incidence augmente actuellement de façon significative par rapport à la situation épidémiologique habituelle dans le même espace géographique. D'autre part, dans un nombre croissant de pays, la prévalence des maladies chroniques non transmissibles augmente et celle des maladies transmissibles diminue [150].

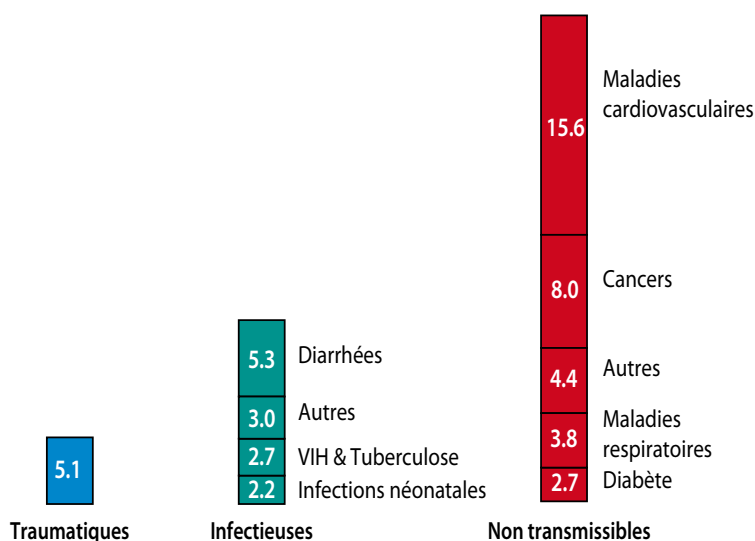
Les maladies non transmissibles (cancers, maladies cardiovasculaires, métaboliques et respiratoires chroniques) ont causé deux fois plus de morts dans les dernières années que les maladies infectieuses, pour un total annuel de 52,8 millions de décès [figure 30].

Les questions qui se posent sont de comprendre ce que ces maladies chroniques ont à voir avec l'activité humaine et si elles subiront aux cours du XXI^e siècle les conséquences des changements climatiques importants attendus, mais aussi de savoir si les causes majeures précédentes de mortalité (maladies infectieuses transmissibles) ne seront pas affectées plus largement encore par les effets synergiques de tous ces changements et, conjointement aux impacts économiques, ne redeviendront pas les causes premières altérant la santé humaine.

Après un état des lieux indispensable, répondre à ces demandes reste en pratique difficile pour au moins deux raisons : d'une part, les affections émergentes dépendent fortement du niveau de vie, lequel varie d'une région à l'autre ; d'autre part, l'épidémiologie est une science récente et, si nous possédons des données solides concernant l'état des lieux actuel, ces données peuvent s'avérer moins complètes pour le début du dernier siècle. S'ajoutent à cela les hypothèses et les scénarios du futur, lesquels dépendront des modèles climatiques et économiques retenus.

Figure 30

Principales causes de décès dans le monde (en millions de décès)



Source : adapté de Lozano R., 2012 [151].

La dernière transition épidémiologique est survenue à des moments différents selon les pays ou les catégories sociales. Yusuf *et al.* [152] ont proposé un modèle à cinq stades, décliné pour les maladies cardiovasculaires ; l'histoire rejoignant la géographie, chacun d'entre eux correspond à l'état d'une région donnée [Tableau 3, p. 78]. (i) Le premier stade correspond à une période ou à une région où prédominent dénutrition et infections ; c'est actuellement le cas de nombreux pays de l'Afrique subsaharienne et de régions au début de leur développement. (ii) Le second est celui dans lequel les problèmes infectieux et nutritionnels commencent à régresser et où les problèmes cardiovasculaires apparaissent, c'est le cas de la Chine actuelle. (iii) Si l'espérance de vie continue d'augmenter, les problèmes cardiovasculaires deviennent alors prédominants. C'était le cas de la France il y a cinquante ans, c'est aussi celui de l'Inde urbaine actuelle (les estimations de 1990 à 2020 prévoient ainsi un accroissement de mortalité de 48 % dans les pays développés et de 127 % en Inde). (iv) Du fait de campagnes préventives, les maladies cardiovasculaires régressent partiellement. (v) En raison d'une réapparition de maladies infectieuses, certains pays, comme la Russie, retrouvent une espérance de vie faible après avoir connu l'acmé du stade 4. Un travail comparable a été publié pour le cancer [153].

Tableau 3

Les cinq étapes de la transition épidémiologique par rapport aux maladies cardiovasculaires

Stades sanitaires de développement	Mortalité cardio-vasculaire	Facteurs de risques cardiovasculaires	Exemples régionaux
Famines et infections	5 - 10 %	Maladies cardiaques d'origine infectieuse	Afrique subsaharienne, Inde rurale
Pandémies récurrentes	10 - 35 %	Maladies cardiaques d'origine infectieuse + hypertension artérielle	Chine
Maladies dégénératives en partie sous contrôle	5 - 65 %	Maladies coronariennes, AVC, obésité, diabète	Inde urbaine, Europe de l'Est
Maladies dégénératives issues de l'activité humaine	< 50 %	AVC, maladies coronariennes à un âge avancé	Europe, États-Unis
Bouleversements sociaux, régression des indicateurs de santé publique	35 - 55 %	Réémergence de cardiopathies d'origine infectieuse coexistant avec les causes précédentes	Russie

Source : d'après Yusuf S. *et al.*, 2001 [152].

En France, l'état des lieux est publié régulièrement²³. L'espérance de vie moyenne en France est actuellement de 79,2 ans pour les hommes et de 85,4 ans pour les femmes. La durée de vie sans incapacité grave a continué à augmenter jusqu'en 2000, particulièrement chez les personnes très âgées et la différence hommes-femmes continue de se réduire. La cause majeure de mortalité est maintenant le cancer (29 % de la mortalité en 2010), suivi par les affections cardiovasculaires (26 %) [154]. Parmi les principales causes de mortalité, celles qui ont régressé de la façon la plus spectaculaires sont les affections cardiovasculaires (–43 % chez les hommes) et, en particulier, les cardiopathies ischémiques et les accidents vasculaires cérébraux. La mortalité par cancer a également régressé (en taux standardisés par âge : de –23 % chez les hommes et de –12 % chez les femmes), mais de façon moins importante, cette baisse ayant surtout porté sur les cancers d'origine infectieuse [155]. Ces régressions résultent de l'activité humaine dans ce qu'elle a de bénéfique au niveau de la prévention et du traitement.

23. Insee. http://www.insee.fr/fr/themes/tableau.asp?reg_id=0&ref_id=NATnon02229

Maladies émergentes

Plusieurs maladies importantes émergent au niveau mondial ; elles sont pratiquement toutes des conséquences de l'activité humaine actuelle²⁴. On notera que les deux listes, celle des risques (voir tableau 2, p. 66) et celle des affections émergentes, ne coïncident pas totalement (cette distorsion est en partie due au fait que les causes de cancers sont nombreuses et diverses et, pour beaucoup, inconnues).

Maladies liées à l'âge

L'âge reste de loin le risque premier. Quand il s'accroît, de nombreuses maladies augmentent exponentiellement à mesure que s'accélère le déclin des capacités physiologiques [100]. La liste des maladies liées à l'âge est longue et comprend la majorité des maladies cardiovasculaires, la grande majorité des cancers (colon, poumon, foie, prostate, sein) et les maladies neurodégénératives (dont la maladie d'Alzheimer, dans le cadre nosologique plus vaste des démences séniles²⁵) [tableau 4, p. 80].

L'incidence du cancer, des maladies cardiovasculaires et des maladies neurodégénératives augmente exponentiellement au cours de la vie²⁶, mais l'évolution de l'incidence de ces trois groupes d'affections n'est pas la même depuis une vingtaine d'années. L'incidence annuelle globale des cancers augmente avec de grandes disparités selon le type ; l'incidence des maladies neurodégénératives augmente en fonction de l'augmentation de la durée de vie ; celle des manifestations de la maladie athéroscléreuse a, au contraire, tendance à diminuer dans tous les pays développés [155, 158].

L'incidence quasi explosive des maladies neurodégénératives pose le problème du ou des risques en cause. Des éléments nouveaux, toxiques ou infectieux et liés aux changements environnementaux actuels, pourraient jouer un rôle additionnel [159, 160]. Il conviendra d'étudier les impacts spécifiques des changements climatiques et environnementaux sur ces pathologies, en plus de l'effet de vulnérabilité lié à l'âge et aux diminutions de capacités déjà mentionnées.

-
24. Les conséquences des inondations dues à l'accroissement des précipitations ou à l'élévation du niveau des mers ne sont pas à proprement parler des maladies, mais les inondations, même dans des pays comme le nôtre, sont de plus en plus fréquentes et importantes, et peuvent être la cause d'une mortalité non négligeable, surtout chez les personnes âgées [156].
 25. Les démences sont également en constante augmentation. Le cadre nosologique est sûrement très hétérogène, il est en cours de décryptage [157].
 26. En 2011, 106 301 décès et 211 743 nouveaux cas de cancers ont été diagnostiqués chez les sujets âgés de plus de 65 ans.

Tableau 4

Évolution récente de l'incidence des principales maladies chroniques non transmissibles liées à l'âge en France

Diabète de type 2 et obésité	Le diabète de type 2 concerne deux millions de personnes en France, soit un peu plus de 3 % de la population. L'incidence annuelle du diabète de type 2 (qui représente la très grande majorité des diabétiques) est de l'ordre de 100 000 nouveaux cas par an, et il n'existe pas de données précises concernant l'évolution de cette incidence. La prévalence de l'obésité (définie par un indice de masse corporelle supérieur à 30 kg/m ²) augmente : elle est passée de 8,5 % en 1997 à 14,5 % en 2009. L'élévation de l'incidence de l'obésité chez l'enfant laisse également présager une augmentation prochaine du diabète de type 2 chez l'adulte, avec ses conséquences cardiovasculaires. L'ensemble de ces données donne à penser que la réduction de l'incidence des manifestations cliniques de l'athérosclérose pourrait n'être que provisoire.
Insuffisance cardiaque	L'analyse de l'insuffisance cardiaque en France montre une augmentation des hospitalisations du fait du vieillissement de la population. Plusieurs études ont montré que ces taux augmentaient en raison notamment des pathologies retardées par l'amélioration thérapeutique des années 1980-1990 [161]. On peut s'attendre à ce que de tels effets renforcent la fragilité de larges sous-groupes de la population française en cas de contraintes majeures, d'ordre économique ou climatique.
Maladies neurodégénératives	L'incidence des affections neurodégénératives croît aussi exponentiellement avec l'âge, ce qui en fait un groupe d'affections émergentes majeur. À 75 ans, la prévalence de la maladie d'Alzheimer est d'environ 13 % chez les Français et de 20 % chez les Françaises. La distinction entre maladie d'Alzheimer et démences (d'origine vasculaire ou non) n'est toujours pas claire dans les registres. De ce fait, il est pour le moment préférable de parler de prévalence des démences. Après 85 ans, celle-ci est de 38 % chez les femmes et de 24 % chez les hommes. Des projections pour 2030 ont été faites, et si la durée de vie augmente encore de 3,5 années chez les hommes et de 2,8 années chez les femmes d'ici quinze ans, alors on peut s'attendre à une augmentation des démences d'environ 75 %.
Cancers	Bien que l'incidence de certains cancers ait diminué, l'incidence annuelle de l'ensemble des cancers chez les sujets âgés de plus de 65 ans a globalement augmenté de 1980 à 2005, passant de 278 à 392 cas pour 100 000 chez les hommes et de 176 à 254 cas pour 100 000 chez les femmes (chez l'enfant âgé de moins de 15 ans, l'incidence n'a pas augmenté : 1 700 nouveaux cas par an entre 2000 et 2008).

Sources : INCa, 2012 [155] ; de Peretti C., 2012 [158] ; Danaei G., 2011 [162] ; Gallez C., 2005 [163]²⁷ ; Aouba H., 2012 [164] ; Jacqmin-Gadda A., 2013 [157].

27. Ce rapport souligne le coût croissant de ce groupe d'affections et détaille les incertitudes diagnostiques auxquelles on a fait allusion. On y trouvera également une excellente, quoique déjà ancienne, mise au point sur les essais thérapeutiques.

Cancers

Les cancers de la peau sont et resteront fortement liés au rayonnement UV (surtout UV-B, pic autour de 310 nm) et aux risques dus à la surexposition. De très nombreuses études ont démontré le rôle déterminant du rayonnement solaire dans la genèse des deux types de carcinomes cutanés avec un effet cumulatif (risque relatif de 2 à 3). Il en est de même pour les mélanomes, qui sont plus liés à des ensoleillements importants mais intermittents (avec, là aussi, un risque relatif deux fois supérieur) [165]²⁸.

L'augmentation de l'incidence des cancers de la peau (incluant le mélanome, dont l'incidence a été multipliée par trois entre 1980 et 2005) est une donnée qui n'est plus discutable (en 2011, 9 780 nouveaux cas et 1 620 décès étaient dus à ce groupe d'affections). En France, les cancers de la peau ont augmenté de 45 % pour les hommes et de 19 % pour les femmes entre 1990 et 2010 [155]. La relation entre l'exposition aux UV et les cancers de type carcinome épidermoïde est quasi linéaire, celle qui unit le rayonnement au mélanome est plus complexe et fait intervenir le type de peau [166].

Pour les autres cancers, le sujet comporte de nombreuses incertitudes [155, 167], en particulier dans leur relation avec l'environnement²⁹. La question est bien évidemment de savoir si l'augmentation globale de l'incidence des cancers est due au seul vieillissement de la population ou s'il existe d'autres facteurs en cause. On peut obtenir des informations en analysant les profils évolutifs d'incidence des différents cancers en France depuis 2002. En plus des cancers cutanés, les plus fréquents des cancers dont l'incidence ait augmenté significativement sont, en 2011, les cancers de la prostate, du sein, du rein, de la thyroïde et du poumon, avec d'importantes différences selon le sexe. Leur rapport respectif aux changements climatiques est peu étudié dans la littérature, ce qui, en dehors du vieillissement des populations, ne permet pas d'anticiper les fluctuations possibles, dans un sens ou dans l'autre.

Le lien entre maladies émergentes à incidence croissante et facteurs infectieux, toxiques ou alimentaires nouveaux a fait l'objet de nombreuses études, en particulier au Centre international de recherche sur le cancer (Circ), à l'Inserm et à l'Institut national du cancer (INCa) [167].

28. Les travaux de Lucas R.M. font le point sur la question. En 2008, les UV sont encore un problème médical relativement mineur en termes de journées d'immobilisation, mais la liste est assez longue : aux affections précitées, il faut en effet encore ajouter la cataracte corticale, le pterygium, la kératose solaire, la réactivation de l'herpès labial et, probablement, certains déficits immunologiques.

29. Selon l'INCa [155], on peut estimer que l'incidence des cancers pédiatriques n'a pas changé, mais ces cancers, sur le plan physiopathologique, sont une classe très spéciale, et sont rares.

Maladies infectieuses émergentes

Le réchauffement climatique et les modifications de la biodiversité induites par l'activité humaine ont des effets directs et immédiats sur le paysage infectieux auquel est confrontée notre espèce [30]. La distribution géographique des bactéries pathogènes dans les eaux de surface, des moisissures dans les milieux aériens, est en train de se modifier largement [52], de même que la densité des cyanobactéries suite à la perturbation des cycles de l'azote³⁰. Mais d'autres facteurs sont en cause : la diffusion des transports³¹, la déforestation, l'usage des antibactériens de tout genre ; et les inégalités au sein d'un continent ou d'un pays, d'une région ou d'une catégorie sociale à l'autre sont autant de facteurs intriqués qu'il convient de prendre en compte [136, 143].

Plusieurs études portant sur la dengue ou le paludisme ont commencé à modéliser les interactions hôte-vecteur-agent pathogène-habitat, avec effets de seuil, ou la capacité d'extension du vecteur dans les territoires européens, à partir des données observées sur des périodes de plusieurs années [168] [figure 31]. Plusieurs variables bioclimatiques et écologiques ont été identifiées. Pour le paludisme, les précipitations mensuelles, les densités de population, l'élévation de température participent à des degrés divers à la récurrence des épisodes cycliques. Mais les réflexions sur les rapports entre changements climatiques et maladies infectieuses ont évolué et le schéma actuel est beaucoup plus complexe [168, 169] [figure 32, p. 84].

L'extension d'*Aedes albopictus* sera principalement occidentale autour du 45° parallèle Nord [figure 32a], mais les plus grands changements [figure 32b] concerneront les régions septentrionales, qui verront le moustique interférer potentiellement avec tous les cycles actuels.

L'activité de l'homme a facilité la dissémination de nouveaux agents pathogènes et leur survenue dans de nouveaux pays ou chez de nouveaux hôtes pour au moins trois raisons : la création par l'homme de nouveaux paysages forestiers ou agricoles, les modifications du mode de contact entre hommes et animaux sauvages ou domestiques, et les changements dans les pratiques de santé, comme le contrôle des vecteurs ou la sélection de souches résistantes aux antibiotiques [136].

Entre 1940 et 2004, environ trois cents maladies infectieuses nouvelles sont apparues chez l'homme dans le monde. Cela comprend des agents pathogènes qui ont évolué sous la pression d'une thérapeutique, du fait d'un changement d'hôte (sida ou symptôme respiratoire aigu sévère [SRAS]) ou d'un changement géographique (virus du *West Nile*). Il existe une relation positive forte entre latitude et richesse en agents pathogènes [170], et une relation négative entre le niveau socioéconomique et la biodiversité, source constante de résilience.

30. Voir le programme de l'Agence nationale de la recherche ANR : JCJC - SVSE 7 - Biodiversité, évolution, écologie et agronomie 2011. Projet Phycocyano.
http://www.agence-nationale-recherche.fr/projet-anr/?tx_lwmsuivibilan_pi2%58CODE%5D=ANR-11-JSV7-0014
(consulté le 03/03/2015).

31. Facteur extrêmement important en milieu marin (transports maritimes et ballasts).

Figure 31

Distribution européenne d'*Aedes albopictus* en 2011 et en 2015

Décembre 2011

- Indigène
- Présence récente
- Absent
- Pas de donnée
- Inconnu

Archipels

- Les Açores (P)
- Iles Canaries (E)
- Madeire
- Svalbard/Jan Mayen (No)

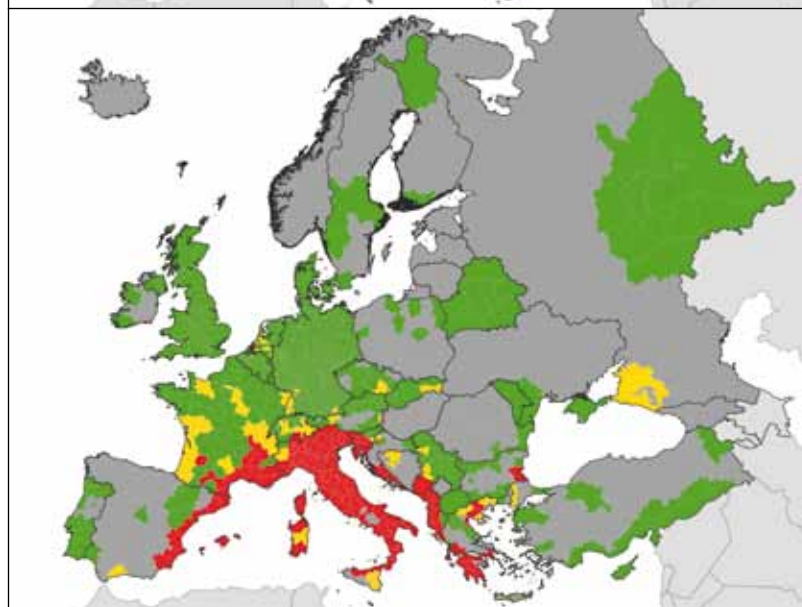


Janvier 2015

- Présent
- Introduit
- Absent
- Pas de donnée
- Inconnu

Archipels

- Les Açores (P)
- Iles Canaries (E)
- Madeire
- Svalbard/Jan Mayen (No)

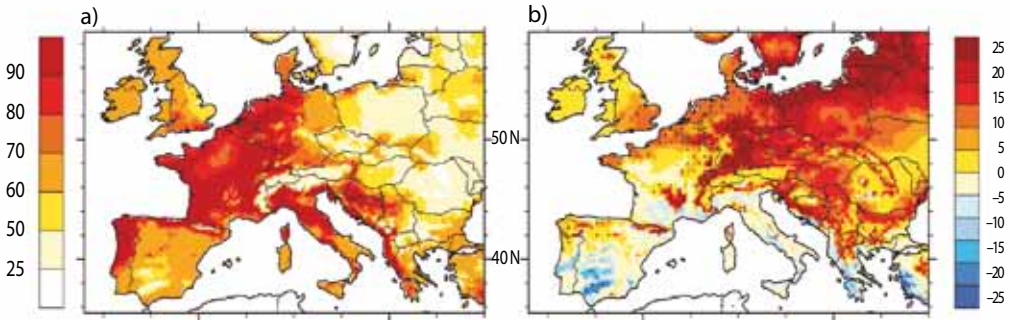


Dans les régions en rouge, l'espèce a été observée dans au moins une municipalité de la région administrative considérée sur les cinq dernières années. Dans les régions en vert, l'espèce n'a pas été observée sur cette période. Régions en gris : absence de données.

Source : selon les observations du Centre européen pour la prévention et le contrôle des maladies (ECDC / Projet VBORNET) ; adapté de Caminade C., 2012 [168].

Figure 32

Compabilité climatique future (2030-2050) de l'extension européenne d'*Aedes albopictus*



Modélisation de la compabilité climatique future (2030-2050) de l'extension territoriale européenne d'*Aedes albopictus* (en %, à gauche) et changements par rapport aux moyennes 1990-2010 (en %, à droite) selon les modèles climatiques RCM et les interactions avec les cycles de développement de l'espèce.

Source : adapté de Caminade C., 2012 [168].

Or les virus, comme les bactéries, sont capables de sélectionner des mutations sous l'influence de facteurs externes comme le réchauffement climatique à divers stades de leur développement. Au cours de la deuxième moitié du XX^e siècle, de nombreux virus émergents ont gagné des nouvelles régions géographiques et cette évolution continue. C'est le cas des arboviroses, longtemps considérées comme essentiellement tropicales. Les changements climatiques et la dispersion des moustiques vecteurs pourraient fournir une explication partielle de l'extension de ces maladies hors de la zone tropicale. Ainsi la dengue n'a cessé de s'étendre en Martinique et en Guadeloupe, le virus chikungunya est apparu en métropole, tandis que le virus Lloviu, proche du virus Ebola, a déjà été identifié parmi les chauves-souris d'Espagne [171]. Les changements climatiques ne sont pas les seuls responsables du phénomène [172] mais ils y contribuent de façon certaine.

Analyse des effets par domaine

Fort de ces constats climatiques, l'analyse de chacune des actions du PNACC doit se faire selon une grille d'évaluation élaborée dans un contexte précis. La définition de ces contextes doit permettre d'aborder l'ensemble des questions suivantes :

■ À quel horizon les conséquences peuvent-elles survenir ?

- Les effets attendus sont-ils dans la durée du PNACC ou à un horizon de vingt ans, trente ans ou plus ?

■ Quel cadre économique de référence doit-on prendre en compte ?

- Celui d'aujourd'hui si les effets sont attendus sur une courte période de temps (délai du PNACC), hypothèse d'une croissance moyenne ou prise en compte d'autres scénarios (voir les travaux de la direction du Trésor et du Commissariat à la stratégie et à la prospective : *France 2030 : cinq scénarios de croissance*³², dont « un scénario "Au fil de l'eau" avec prolongation des tendances de reprise molle telles qu'elles se dessinent actuellement ») ?
- Ou adopter un scénario plus sombre en réfléchissant aux conséquences possibles sur la santé des populations et les systèmes de santé³³ ?

32. « Ces scénarios se traduisent par des taux de croissance moyens pour la période 2010-2030 qui vont de 1,6 % pour le scénario "Noir", encore très optimiste, à 2,3 % pour le scénario "Croissance soutenue et soutenable et marché du travail plus efficace". Ils débouchent sur des rythmes de croissance distincts sur le long terme. » Dans le contexte actuel de stagnation, et sans les souhaiter pour autant, on imagine aisément des scénarios aux taux plus « noir que noir » : panne définitive de croissance puis déclin, ce que n'hésitent plus à évoquer des spécialistes tels que Larry Summers, ancien secrétaire au Trésor américain, peu suspect d'entonner joyeusement les couplets de la décroissance.

33. Transformer les modèles. Forum de l'économie positive. Le Havre, 26 septembre 2014.
<http://positiveeconomy.co/fr/video/transform-society/>
<http://positiveeconomy.co/fr/nos-videos/?videos=0&event=217&sort=0>
<http://positiveeconomy.co/fr/video/lets-imagine-world-tomorrow/> (consulté le 07/07/2015)

■ **Quel cadre sociétal et quelles tendances sociodémographiques ?**

- Urbanisation, individualisme, internationalisation...
- Il faut alors intégrer les facteurs de vulnérabilité tels que le vieillissement des populations dans l'anticipation de marges d'adaptation plus réduites, et les mettre plus en avant notamment par le biais de leur impact possible sur la croissance (qui est estimée à - 1 % par an en 2025) [173].

■ **Quel état de l'environnement ?**

Pour cette question, s'appuyer sur une sélection d'études réalisées [15, 16, 174-177].

Cadre

Pour structurer la réflexion, il faut partir dans un premier temps de l'élaboration de schémas d'interactions directes, permettant d'anticiper la nature des effets du changement climatique sur la santé humaine par les :

- paramètres climatiques susceptibles d'être modifiés par les changements en cours ;
- modifications des milieux ;
- modifications des facteurs biotiques ;
- impacts sur les activités humaines ;
- impacts sur les polluants d'origine humaine ;
- impacts sur les déterminants de santé ;
- impacts sur les morbi-mortalités globale et spécifiques.

Les effets combinés doivent être également pris en compte (effet du dérèglement climatique sur la pollution, effet de la pollution sur les végétaux, effet des altérations du couvert végétal sur la santé animale, impacts sur la santé humaine...) pour aboutir à une meilleure anticipation des interactions.

Évaluation des effets sanitaires des actions du PNACC

Chaque action du PNACC peut être analysée à l'aide du schéma préalablement décrit. Chaque élément de la chaîne logique constitue alors une porte d'entrée dont le sens de lecture peut être double afin de prendre en compte les effets rétroactifs.

A cette occasion :

- 1) les éléments analysés devront être géolocalisés et datés, l'analyse peut être différente sur plusieurs aspects, entre métropole et TOM, entre Nord et Sud, entre montagne et littoral ;
- 2) le degré d'incertitude devra être précisé [178] concernant la survenue des effets. Le risque est-il :
 - démontré et quantifiable (incertitude quantifiable par rapport à la littérature scientifique) ;
 - posé à partir d'hypothèses à vérifier (incertitude pouvant être déterminée qualitativement, à dire d'expert) ;
 - soupçonné, mais à interroger (on en est au premier stade de la réflexion) ;
 - radical : on ne sait s'il sera même un jour possible de le savoir ;
- 3) l'ampleur des effets sur la santé devra être mesurée : effectifs et localisation des populations concernées pour tenir compte des spécificités (métropoles, DOM-TOM, villes, zones rurales, bords de mer...) ;
- 4) la nature et l'état de la population et de la société, cibles de l'action, devront être précisés :
 - a. cible : population générale, sujets fragiles (enfants, personnes âgés), travailleurs ;
 - b. résilience de la population et des systèmes ;
 - c. vulnérabilité des groupes et des milieux ;
- 5) les effets modulateurs d'autres événements, lorsque des effets combinés peuvent augmenter ou atténuer les impacts anticipés, devront être pris en compte ;
- 6) les systèmes de surveillance possibles à mettre en place (épidémiologiques, biomarqueurs...) devront être intégrés afin de piloter les actions ou de permettre l'actualisation des mesures d'ajustement ;
- 7) enfin, les moyens d'actions sur le terrain et les possibilités pratiques de mise en œuvre seront également évalués.

Analyse des actions et mesures du PNACC

Le PNACC a mis en place certains éléments de stratégie dont il prévoit d’apprécier les effets directs et indirects. L’analyse des effets sanitaires possibles des actions planifiées vise à identifier les mesures nécessitant une évaluation plus approfondie.

Dans les tableaux présentés ci-après, seules les actions avec impacts prévisibles sont retenues et analysées.

1. Agriculture, aquaculture

Concernant l’agriculture, et en réponse à la question : « *Les mesures et actions ci-dessous sont-elles de nature à entraîner des conséquences sanitaires majeures en France dans les prochaines décennies ?* », huit actions et treize mesures sont ciblées par le schéma d’analyse précédemment décrit. Des exemples d’évaluation et de recommandation seront donnés. Pour chaque action ou mesure, les effets primaires, les interactions potentielles et les impacts secondaires pourront être détaillés par la suite.

La question primordiale reste de comprendre les effets des changements climatiques (CC) sur les pratiques et productions agricoles et aquacoles ; notamment les effets potentiels sur les quantités et la qualité des produits alimentaires. Les effets sanitaires de l’utilisation des pesticides — comme celle des antibiotiques sur l’augmentation des résistances — ou de l’accumulation de composés azotés et de phosphates doivent être intégrés en condition climatique sèche (élévation des températures) ou humide (augmentation des précipitations avec effets de « lavage » des sols). Les conséquences du développement de végétaux mieux adaptés à la sécheresse (mais possiblement moins denses et moins nutritifs) pourraient aussi modifier l’offre alimentaire.

AGRICULTURE		
Action n° 1	Poursuivre l’innovation par la recherche, le retour d’expérience et faciliter le transfert vers les professionnels et l’enseignement	<i>Les changements climatiques modifieront, dans tous leurs aspects (sécheresse, inondations...), l’offre proposée par les producteurs. Le premier niveau d’évaluation et de recherche devrait porter sur la relation entre climat et productions agricoles, avec des effets potentiellement très importants sur les volumes et la qualité sanitaire [138]. Le second portera sur la relation entre climat et pratiques agricoles visant à développer une agriculture de proximité. Les conséquences nutritionnelles du développement de végétaux mieux adaptés à la sécheresse doivent par exemple être anticipées ; de même que les effets sanitaires de l’utilisation des phosphates et de l’azote, des pesticides et des nouveaux agents chimiques, qui doivent être évalués dans le nouveau contexte climatique³⁴ (températures, précipitations, impacts sur les nappes phréatiques), économique et démographique pour anticiper en quoi cela retentira, directement et indirectement, sur la santé humaine et animale, et identifier nos moyens de contrôle.</i>

AGRICULTURE		
Mesure 1.2	Intégrer l'adaptation au changement climatique dans les contrats d'objectifs (CO) et les programmes de recherche engagés sur la période 2011-2015	<i>Améliorer la compétence collective sur les thèmes de sécurité sanitaire (maladies végétales, animales, effets en chaîne sur l'alimentation).</i>
Mesure 1.3	Faciliter l'innovation et le transfert de connaissances en favorisant la concertation entre agriculteurs, acteurs du développement agricole, recherche fondamentale et appliquée	<i>Approfondir les questions de gestion de l'eau (impact sur la température et l'étiage des rivières), de densification urbaine, des méthodes de refroidissement (confort d'été).</i>
Action n° 2	Promouvoir l'aménagement du territoire au regard des vulnérabilités locales et des nouvelles opportunités	
Mesure 2.1	Intégrer l'adaptation au changement climatique dans les politiques agricoles régionales	
Mesure 2.2	Améliorer la mise en œuvre des objectifs de réduction de la consommation des espaces agricoles dans les politiques de planification de l'urbanisme	<i>Les interactions potentielles sont nombreuses, en particulier avec les domaines de la biodiversité, les enjeux de l'occupation des sols ou des polluants.</i>
Mesure 2.3	Faciliter l'innovation et le transfert de connaissances en favorisant la concertation entre les agriculteurs, les acteurs du développement agricole et la recherche fondamentale et appliquée	<i>Approfondir en particulier les questions de gestion de l'eau (impact sur la température et l'étiage des rivières et des fleuves...), de densification urbaine, ou des techniques de refroidissement (confort d'été).</i>
Action n° 3	Adapter les systèmes de surveillance et d'alerte aux nouveaux risques sanitaires	<i>Ces mesures peuvent renvoyer à une gestion intégrée ville-espace agricole, notamment des systèmes aquatiques, en raison d'évolutions climatiques différentes. Elles auront aussi un impact important sur notre degré de préparation, notamment face à de futures épidémies.</i>
Mesure 3.1	Renforcer l'expertise sur les vecteurs	<i>Exemples d'impact : dengue, chikungunya, filovirus. Développer des plans de lutte contre les vecteurs en tenant compte de l'urbanisation et du bâti.</i>
Mesure 3.2	Renforcer l'étude des interactions entre changement climatique, biologie des plantes et santé	

34. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/REACH,30375.html>

AGRICULTURE		
Mesure 3.3	Renforcer la structuration des dispositifs de surveillance des maladies animales	
Mesure 3.4	Renforcer la structuration des dispositifs de surveillance des maladies végétales	
Action n° 4	Gérer les ressources naturelles de manière durable et intégrée pour réduire les pressions induites par le changement climatique et préparer l'adaptation des écosystèmes	
Mesure 4.1	Favoriser dans les politiques publiques une gestion des ressources naturelles limitant les impacts du changement climatique	
Mesure 4.4	Optimiser le stockage de l'eau	<i>Le problème impose de définir ici les conditions de l'optimisation : stocks en quantité (augmentation de réserves d'eau de surface) ? en qualité ? au profit ou au détriment de quelles utilisations ?</i>
Action n° 5		
Gérer les risques inhérents à la variabilité et au changement du climat en agriculture		

AQUACULTURE		
Action n° 1	Adapter la filière conchylicole française à la problématique du changement climatique	<i>Anticiper notamment les interactions avec les systèmes de transport (pour les échanges de naissains) ; retravailler la question des triploïdes et les bases biologiques (génétiques, physiologiques ou pathologiques) dans les écloséries.</i>
Action n°s 2 et 3	Adapter la filière piscicole à la problématique du changement climatique	<i>Associer la recherche zootechnique aux questions de diversification piscicole, intégrant les questions de plus grande résilience de ces systèmes. Proposer une approche écosystémique des pêches et de l'aquaculture dans un contexte de changement global (élévation des températures et de l'acidité océanique ; migration des espèces d'intérêt halieutique...). Cette préservation de la biodiversité permet de conserver des écosystèmes productifs et empêchent l'émergence de certaines composantes indésirables (virus, anoxies, méduses,...)</i>

2. Énergie, industrie et transports

Concernant les secteurs de l'énergie, de l'industrie et des transports, quatre actions et six mesures du plan sont susceptibles d'entraîner des conséquences sanitaires en France dans les prochaines décennies, avec des effets principalement indirects. En effet, en dehors des situations de pénurie liée à une raréfaction accélérée des ressources ou de difficultés d'approvisionnement d'ordre géopolitique (pétrole, gaz, uranium), cette thématique pourrait ne produire que peu d'effets sanitaires directs. Le principal effet (l'élévation thermique globale et ses conséquences sanitaires) envisagé ici est indirect et lié à la combustion des énergies fossiles, certes à l'échelle mondiale, mais néanmoins toujours au cœur de la politique énergétique et de transport du pays. Les tentatives de réduire la production de CO₂ — soit par enfouissement, soit par réutilisation — sont encore à l'étude et ne confirment pas à ce jour l'espoir d'une mise en œuvre simple à l'échelle mondiale.

ÉNERGIE		
Action n° 2	Favoriser le recours à des équipements de refroidissement plus efficaces ou utilisant des sources d'énergies renouvelables ou de récupération	<i>Si le développement technique de tels systèmes nécessite encore plusieurs étapes, certains risques sanitaires pourraient être liés aux systèmes de climatisation (par défaut de maintenance avec risque bactérien — légionelloses notamment — ou par défaut d'efficacité en période caniculaire, lié à de possibles ruptures de production énergétique).</i>
Action n° 3	Mettre à disposition les données hydrologiques et climatiques	<i>Impact positif attendu mais, là encore, il convient d'anticiper les conditions de l'utilisation (au profit ou au détriment de qui et de quoi ?). La question du partage de la ressource en situation de très forte contrainte (besoin de refroidissement des centrales, besoins agricoles, alimentation en eau potable, eaux « de loisirs » sur des rivières au débit faible) s'est déjà posée en 2003 et doit être reconsidérée dans les conditions plus contraignantes attendues au milieu du siècle.</i>

TRANSPORTS		
Action n° 2	Etudier l'impact du changement climatique sur la demande de transport et les conséquences sur la réorientation de l'offre de transport	<i>Anticiper la résilience de ces interactions et leurs impacts sur les morbidités spécifiques en condition de contrainte énergétique (approvisionnements...).</i>
Mesure 2.2	Étudier le lien entre politique d'aménagement de la ville et transports urbains	

TRANSPORTS		
Actions n ^{os} 3 et 4	Réaliser des études de vulnérabilité pour les réseaux de transport terrestre, maritime et aéroportuaire	<i>Impact positif attendu sur l'organisation des prises en charge en cas de rupture des systèmes de transport. Anticipation nécessaire sur les plans et systèmes de recours (voir Annexe 1, p. 125). Tenir également compte des effets importants du délestage en mer (ballasts des gros cargos) sur l'environnement et la biodiversité.</i>

- 3. Urbanisme et tourisme** Concernant les secteurs de l'urbanisme et du tourisme, cinq actions et six mesures du plan apparaissent susceptibles d'entraîner des conséquences sanitaires en France dans les prochaines décennies, avec des effets principalement indirects, de même nature que pour l'énergie, l'industrie et les transports.

URBANISME		
Action n ^o 1 Mesure 1.2	Faire prendre en compte les risques et les effets liés au changement climatique dans les documents d'urbanisme	<i>Impact positif attendu sur les populations précaires ou vulnérables.</i>
Action n ^o 3	Lutter contre la canicule en ville et limiter l'effet d'îlots de chaleur	<i>Impact majeur sur les populations les plus vulnérables.</i>
Action n ^o 4	Agir pour le confort du bâti en contexte de hausse globale des températures (recherche et réglementation sur le confort d'été, qualité de l'air intérieur)	<i>Le lien avec le domaine 2. Energie, industrie et transports (dont l'action n^o 2, mesure 2) doit intégrer les contraintes de systèmes de ventilation et de climatisation peu consommateurs d'énergie. Par ailleurs, les études sur la qualité de l'air intérieur doivent se faire en interaction avec le Plan national santé environnement (PNSE), plus sensibilisé aux questions climat santé [chapitre V, p. 107].</i>

TOURISME		
Action n ^o 1	Promouvoir et développer une offre de tourisme itinérant à vélo	<i>Les actions n^o 1 et n^o 2 doivent s'entendre dans le cadre du développement des mobilités actives avec leurs effets bénéfiques sur la santé (Plan national de prévention par l'activité physique et sportive (PNAPS) [179] et recommandation du 26 novembre 2013 adoptée par le Conseil européen³⁵). Pour la mesure 2.2 quelques doutes persistent quant à l'acheminement « propre » vers les sites dédiés à ces pratiques.</i>
Action n ^o 2 Mesure 2.2	Rénover l'image du ski nordique et de randonnée	

35. Bénéfices sanitaires de l'activité physique ou sportive, COM (2013) 603 final, 26 novembre 2013. Disponible sur http://ec.europa.eu/sport/news/2013/20131129b_en.htm (consulté le 03/03/2015).

4. Ressources en eau

RESSOURCES EN EAU		
Action n° 1	Améliorer nos connaissances des impacts du changement climatique sur les ressources en eau et des impacts de différents scénarios possibles d'adaptation	
Mesure 1.1	Identifier, à l'aide d'une étude nationale (métropole et DOM) — Explore 2070* — les coûts et risques associés à différents scénarios climatiques, démographiques et socioéconomiques à l'horizon 2070	<i>On ne peut qu'imaginer un impact positif d'une telle mesure, au cœur de la stratégie de prévention sanitaire du PNACC. Néanmoins, toutes les conséquences de ces actions dépendront du degré de sensibilité de la santé humaine à l'état des milieux aquatiques, qui, s'il reste en général fort, peut considérablement varier sur certains aspects.</i>
Mesure 1.3	Cartographier la vulnérabilité des masses d'eau souterraine vis-à-vis du changement climatique	<i>Plus que la vulnérabilité, c'est aussi le recensement des masses d'eau souterraine et la mesure de leur renouvellement, selon les taux de prélèvements humains, leurs vitesses de recharge autant que de dégradation (pollutions), qui conditionneront l'utilisation pérenne de telles ressources.</i>
Mesure 1.5	Acquérir de nouvelles connaissances à l'échelle des grands bassins hydrographiques, notamment par une modélisation des hydrosystèmes intégrant les impacts du changement climatique	<i>Le système de repérage de zones de pollution potentielle des eaux (et leurs risques propres) en sera facilité.</i>
Action n° 2	Se doter d'outils efficaces de suivi des phénomènes de déséquilibre structurel, de rareté de la ressource et de sécheresse dans un contexte de changement climatique	
Mesure 2.2	Optimiser les réseaux de suivi existants (météorologique, hydrologique, température de l'eau) pour renforcer notre capacité de vigilance et d'alerte sur l'état des milieux aquatiques et adapter les usages aux ressources disponibles, DOM compris	<i>Le suivi de la ressource en eau, à moyen et long termes, reste une mesure fondamentale, en particulier si les cas d'élévation thermique brutale se multiplient (avec augmentation de l'incidence des événements extrêmes).</i>

* Simulation climatique réalisée à partir du modèle Arpège-climat pour les Antilles, la Réunion et la Guyane.
Simulation utilisée pour le V^e rapport du GIEC.

RESSOURCES EN EAU		
Action n° 3	Développer les économies d'eau et assurer une meilleure efficacité de son utilisation : économiser 20 % de l'eau prélevée, hors stockage d'eau d'hiver, d'ici 2020	<i>Ce dernier point sera fondamental pour anticiper un risque sanitaire lié aux erreurs d'interconnexion des circuits de récupération/réutilisation ou à l'insuffisance de retraitement des eaux usées ou récupérées.</i>
Mesures 3.1 et 3.2	Promouvoir, en particulier dans les régions déficitaires, les économies d'eau dans tous les secteurs et pour tous les usages, récupérer les eaux de pluie et réutiliser les eaux usées pour l'irrigation de cultures ou d'espaces verts	
Mesure 3.3	Dans le secteur de l'énergie, améliorer les performances en termes de prélèvements et de consommations d'eau des centrales nucléaires existantes et à venir	<i>Perspective essentielle à l'horizon des trente à cinquante prochaines années en particulier lorsque les systèmes de refroidissement des centrales nucléaires vieillissantes (en bord de Loire, par exemple) se trouveront de plus en plus souvent confrontés au risque d'un débit insuffisant des rivières alors que les centrales devront répondre à une demande énergétique croissante (systèmes de climatisation électriques) en période de canicule.</i>
Mesure 3.4	Optimiser le stockage de l'eau et mettre en œuvre la création de retenues de substitution dans le respect des contraintes environnementales ainsi que des mesures d'optimisation de l'efficacité de l'utilisation de l'eau	<i>Selon les techniques choisies, soutenues et acceptées par les populations, le risque de prolifération vectorielle lié à ces retenues n'est sans doute pas différent des systèmes actuellement requis.</i>
Action n° 4	Accompagner le développement d'activités et d'occupation des sols compatibles avec les ressources en eau disponibles localement	
Mesure 4.2	Optimiser et envisager, lorsque cela s'avère utile, la création de stockage d'eau, notamment par la substitution d'un prélèvement hivernal à un prélèvement pendant la période d'été	
Mesure 4.3	Développer des filières économes en eau dans le secteur agricole	
Action n° 5	Renforcer l'intégration des enjeux du changement climatique dans la planification et la gestion de l'eau, en particulier dans les prochains programmes d'intervention des agences de l'eau (2013-2018) et les prochains schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (2016-2021)	

5. Biodiversité

Les interactions avec la gestion des forêts (déforestation et destruction du couvert) sont désormais en cause pour expliquer le changement des conditions d'habitat des chauves-souris et leur mobilité, à l'origine — avec d'autres facteurs — de la récente épidémie d'Ebola. Même si la France ne sera pas directement concernée dans les prochaines années, cet exemple montre à quel point l'expansion de notre espèce, et de ses pratiques, est loin d'avoir révélé toutes ses conséquences.

BIODIVERSITÉ		
Action n° 1	Intégrer les enjeux de la biodiversité liés à l'adaptation au changement climatique dans la recherche et l'expérimentation	<i>Modification vectorielle, déplacements d'espèces microbiologiques, conséquences immunologiques... : de très nombreux facteurs qui touchent à la biodiversité impactent et impacteront la santé humaine. En conséquence, la capacité à promouvoir la recherche en ce domaine aura des effets considérables.</i>
Mesure 1.1	Inscrire, dans les contrats d'objectifs des grands organismes de recherche, les recherches portant sur l'interaction entre changement climatique, changements d'usages et biodiversité, sur les services écosystémiques et les adaptations qui en découlent	<i>Même si l'on ne mesure pas encore précisément les multiples effets d'une diminution de la biodiversité sur la santé humaine, la connaissance théorique des propriétés des systèmes, en particulier l'accroissement de leur résilience à mesure de leur diversité, incite à multiplier les actions renforçant ces liens et donc à restaurer, par ce biais, nos systèmes d'adaptation au changement climatique.</i>
Mesure 1.5	Renforcer la recherche sur la modélisation de la biodiversité notamment sous l'effet des changements environnementaux, intégrant la dimension socioéconomique	<i>Cette mesure doit contribuer à mieux comprendre les grands cycles des systèmes terrestres et aquatiques en intégrant leurs perturbations anthropogéniques et tenter, comme l'a fait le GIEC pour les scénarios climatiques, d'anticiper des comportements médians possibles des sociétés humaines (c'est aussi l'un des objectifs de l'IPBES ³⁶).</i>
Action n° 2	Renforcer les outils de suivi et prendre en compte les effets du changement climatique sur la biodiversité	
Mesures 2.1 et 2.4	Renforcer le dispositif de suivi des espèces et cartographier leurs habitats en France métropolitaine et outre-mer, pour suivre leurs changements de répartition et de surface	<i>Étape essentielle : en trente ans, le recul d'environ 20 % des espèces d'oiseaux communs en Europe (– 420 millions) en raison d'une réduction des surfaces non labourées, de l'arrachage des haies, de l'utilisation de pesticides enrobés et de la chasse (7 millions d'oiseaux par an) anticipe un risque certain sur la dispersion des graines (limitant l'adaptation végétale par changement des aires de répartition), la pollinisation et la prolifération de certains insectes.</i>

36. Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques.

BIODIVERSITÉ		
Mesure 2.6	Disposer d'indicateurs robustes et régulièrement mis à jour des effets du CC sur la biodiversité	<i>Des directives européennes (Good Environmental Status, GES) définissent onze descripteurs de « l'état de santé » des océans.</i>
Action n° 3	Promouvoir une gestion intégrée des territoires en prenant en compte les effets du changement climatiques sur la biodiversité	<i>Les impacts doivent s'envisager en raison d'une grande proximité entre qualité des milieux, qualité de vie et santé (y compris mentale) pour l'ensemble des habitants (loisir, cadre de vie) comme des visiteurs (tourisme), à cause notamment des relations climat-biodiversité-santé, directes ou indirectes.</i>
Mesure 3.2	Prendre en compte le changement climatique dans la création d'aires protégées	
Action n° 4	Intégrer l'adaptation au changement climatique dans les stratégies et les plans mis en œuvre par l'Etat pour préserver la biodiversité	
Mesure 4.1	Instaurer une veille scientifique portant sur l'état des connaissances disponibles des impacts du changement climatique sur la biodiversité	
Mesure 4.2	Intégrer la prise en compte du changement climatique dans l'élaboration des stratégies et des plans d'action pour la protection des espèces et la lutte contre les espèces exotiques envahissantes	<i>La lutte contre les vecteurs (ex. : Aedes albopictus) et les mesures de protection contre leur extension se nourrissent de ces stratégies de prévention.</i>

6. Forêt

FORÊT		
Action n° 1	Poursuivre et intensifier la recherche-développement sur l'adaptation des forêts au changement climatique	
Mesure 1.2	Axe stratégique R&D sur l'adaptation aux CC à intégrer dans les contrats d'objectifs des instituts forestiers	
Action n° 2	Collecter les données écologiques, organiser le suivi des impacts écosystémiques	<i>Les changements attendus sont ici majeurs quant à la qualité des espaces naturels [180] et à leur impact sur la santé des Français pour des raisons similaires à celles concernant les enjeux de la biodiversité. La capacité à promouvoir la recherche en ce domaine aura des effets considérables, à brève et surtout à longue échéance.</i>
Action n° 3	Favoriser la capacité d'adaptation des peuplements forestiers et préparer la filière bois au changement climatique	<i>L'impact est plutôt indirect et à visée économique. Cependant l'enjeu des conditions de travail ne doit pas être négligé, en particulier dans une filière frappée par l'importance des restructurations, avec des effets psychopathologiques qui rappellent ceux des bouleversements de l'espace agricole et de la mécanisation sur la santé des agriculteurs au cours du XX^e siècle.</i>
Mesure 3.3	Conserver, adapter et diversifier les ressources génétiques forestières	
Action n° 4	Préserver la biodiversité et les services rendus par la forêt face aux risques naturels	
Action n° 5	Anticiper et gérer les événements climatiques extrêmes	
Mesures 5.1 et 5.2	Améliorer la couverture des sylviculteurs contre les aléas climatiques, <i>via</i> le développement de systèmes assurantiels, et élaborer des plans de gestion de crise pour les différents événements extrêmes	<i>L'impact sur la filière et les mesures de prévention du suicide ne doivent pas être négligés dans ce cadre.</i>

7. Risques naturels

RISQUES NATURELS		
Action n° 1	Développer la connaissance (aléas, enjeux, méthodes) dans les zones sensibles	L'amélioration de la connaissance conduit certes à des politiques de prévention qui réduisent le risque des personnes et des infrastructures, répondent aux aléas naturels et facilitent leur réparation. Cependant le problème est ici d'envisager aussi une adaptation dans le contexte d'une baisse généralisée et massive des moyens économiques de préparation, en période de récession forte... Par ailleurs, l'appréciation de ces impacts doit être conçue dans le cadre méthodologique général décrit au chapitre II (p 53). avec l'ensemble de leurs effets, forts et faibles.
Mesure 1.1	Consolider la connaissance des submersions marines extrêmes et évaluer les impacts du changement climatique sur les aléas côtiers	Les problèmes de santé à évaluer ici consistent à prévoir le nombre potentiel de décès associés à chacun des types d'événements extrêmes (en augmentation) mais aussi à comprendre et anticiper le niveau de stress induit par les dommages causés aux biens primaires des survivants, tels que la pérennité de l'habitat face à la submersion ou celle des fondations face à l'altération des sols.
Mesure 1.2	Comprendre les phénomènes de retrait-gonflement des sols argileux et les mouvements gravitaires, en lien avec les modifications climatiques	
Mesure 1.3	Consolider la connaissance des risques d'inondation et évaluer les impacts du changement climatique à l'échelle des grands bassins hydrographiques	
Mesure 1.4	Inventorier les mesures de prévention des inondations et développer un outil d'aide à la décision	
Mesure 1.5	Améliorer la compréhension de l'activité avalancheuse et de son évolution	
Mesure 1.6	Développer la connaissance de l'évolution cyclonique ultramarine	
Mesure 1.7	Élaborer des outils méthodologiques pour évaluer les effets dominos potentiels et les configurations défavorables liés aux risques naturels	
Action n° 2	Maintenir et développer la base de données interministérielle sur les incendies de forêt en France et en faciliter l'accès au public	
Mesure 2.2		
Mesure 2.3	Consolider la cartographie des zones potentiellement sensibles aux incendies de forêt d'été à moyen terme	
Mesure 2.6	Cartographier les risques d'inondation pour les territoires à risque important d'inondation, dans le cadre de la mise en œuvre de la directive européenne Inondation	

RISQUES NATURELS	
Action n° 3	Généraliser les notions de vigilance et d'alerte, et les dispositifs associés, et systématiser le retour d'expérience
Mesure 3.2	Prévoir une extension de la vigilance météorologique à l'aléa « vague/submersion »
Action n° 4	Prendre en compte l'impact du changement climatique sur les risques naturels dans la maîtrise de l'urbanisation
Mesure 4.1	Prendre en compte des impacts potentiels du changement climatique dans les documents d'urbanisme de type SCOT/PLU
Mesure 4.2	Intégrer le changement climatique dans les documents d'information réalisés par l'État en vue de l'élaboration par les maires de leur document d'information communal sur les risques majeurs (Dicrim)
Mesure 4.3	Préciser les modalités de révision des plans de prévention des risques naturels (PPRN) pour prendre en compte les impacts du changement climatique, à l'occasion de la définition réglementaire des aléas de référence
Mesure 4.4	Prendre en compte l'impact du changement climatique sur le niveau de la mer dans la révision de la doctrine relative aux plans de prévention des risques littoraux
Mesure 4.5	Prévoir, dans le cadre de la mise en œuvre de la directive Inondation, un volet stratégique « adaptation au changement climatique » dans les stratégies locales
Action n° 5	Réduire la vulnérabilité, améliorer la résilience et l'adaptation au changement climatique
Mesure 5.1	Proposer des méthodes d'adaptation des ouvrages de protection présents sur le littoral
Mesure 5.6	Développer un outil méthodologique pour évaluer la robustesse (résilience) des territoires face aux aléas naturels

8. Littoral et montagne

LITTORAL		
Action n° 1 et 2	Adopter une stratégie nationale de gestion du trait de côte, développer les réseaux d'observation du littoral et développer la connaissance du littoral : le milieu, les phénomènes naturels, l'évolution physique et anthropique	<i>L'appréciation de l'effet d'aléa côtier, de l'évolution du trait de côte, comme la cartographie des zones de montagne exposées, doit être également incluse dans le cadre méthodologique du chapitre II (p. 53).</i>
Mesure 2.4	Étudier la vulnérabilité physique du littoral français aux aléas côtiers (érosion et submersion) dans un contexte de changement climatique : comparaison de l'état actuel (2010) et futur (2070)	<i>Au terme choisi, les effets concernent les îles et régions de très faible élévation (polders, lagunes...) et les régions ayant déjà connu des reculs littoraux lors d'événements tempétueux récents. L'évaluation de l'impact sanitaire devra aussi tenir compte des déplacements des populations à risque depuis ces régions submersibles.</i>
Action n° 4 Mesure 4.1	Calculer les enjeux « population » et « logements » sur le littoral	

MONTAGNE		
Action n° 2 Mesure 2.3	Sensibiliser et éduquer les populations au changement climatique	
Action n° 3	Risques naturels	Idem actions n° 1 et n° 2 Littoral
Mesure 3.1	Généraliser la cartographie des zones exposées aux aléas pour chaque massif	
Action n° 4 Mesure 4.1	Calculer les enjeux « population » et « logements » sur le littoral	
Mesure 4.2	Établir un état des lieux précis de la vulnérabilité des communes de montagne au changement climatique	Inclure l'impact économique, au regard de projets de développement qui n'auraient pas tenu compte de ces modifications (réduction de l'enneigement notamment).

9. Information

INFORMATION		
Action n° 1	Renforcer la communication envers le grand public, les élus et les entreprises par le maximum de moyens	<i>L'éducation, la formation et l'information, points premiers des possibles changements individuels de comportement, doivent reposer sur une analyse des interactions de second ordre incluant les effets sanitaires. De même, la sensibilisation des décideurs doit pouvoir tirer parti d'une meilleure compréhension de ces effets et de ces interactions.</i>
Mesure 1.5	Assurer une présence sur les événements traitant du changement climatique et de l'adaptation, et ouverts au public	
Mesure 2.1	Intégrer une dimension « adaptation » dans les actions et outils de communication existants ou à venir	
Action n° 4 Mesure 4.1	Renforcer la sensibilisation des décideurs politiques	<i>Pour tous ces acteurs, mesures 4.1, 4.2 et 4.3.</i>
Mesure 4.2	Définir et diffuser aux services de l'Etat les principes et méthodologies de l'adaptation	<i>La question de l'acceptation des faits autant que celle des marges encore accessibles doit intégrer la totalité des conséquences envisageables [106, 181].</i>
Mesure 4.3	Diffuser les principes et méthodologies de l'adaptation aux collectivités	
Mesure 4.4	Faire connaître les bonnes pratiques	

10. Éducation, formation

ÉDUCATION, FORMATION		
Action n° 1	Mettre à disposition des ressources pédagogiques pour la communauté éducative	<i>Insister sur la formation de tous, et notamment des élites, dès le plus jeune âge, aux problèmes environnementaux. Par ailleurs, et dans le partage de nos ignorances, il sera essentiel de faire le bilan de nos abus d'interprétation et l'inventaire de nos incertitudes, de définir les limites de nos compétences et de mesurer l'étendue des questions irrésolues. Cette approche pourrait peut-être éviter les propos trop rassurants et les simplifications abusives</i>
Actions nos 2 et 3	Affiner et faire connaître les impacts de l'adaptation au changement climatique dans chacune des filières étudiées dans le cadre des métiers de l'économie verte et intégrer dans ce plan le champ des professionnels de santé – publique, environnementale ou de santé au travail – pour les sensibiliser aux questions d'adaptation au changement climatique	<i>La création d'écoles thématiques transverses pourraient être pensées dans chacun des domaines avec, par exemple, l'introduction des aspects sanitaires dans les mastères en sciences de l'environnement, et des notions de climat et de biodiversité dans les formations en santé.</i>

11. Recherche

RECHERCHE		
Action n° 1	Améliorer la connaissance du climat et de ses impacts	<i>Les études des interactions du climat avec chacun des domaines de 1 à 8 seront à développer afin d'anticiper les impacts sanitaires potentiels [domaine santé, p. 104]. Le changement climatique modifiera notamment l'offre nutritionnelle. La recherche sur les relations entre climat, pratiques et productions agricoles doit être renforcée. Le recours aux nouveaux agents ou espèces sera aussi évalué selon les perspectives climatiques, économiques, énergétiques et démographiques, afin d'anticiper en quoi ils retentiront, directement ou indirectement, sur la santé humaine. Les problèmes de gestion des bassins versants et les impacts de la densification urbaine doivent être approfondis, de même que les modifications des contraintes vectorielles, les déplacements d'espèces microbiologiques, les recherches zootechniques et leurs conséquences potentielles, immunologiques ou sur les entérotypes. Toutes les recherches et mesures devraient envisager les moyens de maintenir une plus grande résilience des systèmes cibles.</i>

RECHERCHE		
Mesure 1.1	Évaluer la prévisibilité interannuelle à décennale à partir d'observations et modèles	Développer la modélisation intégrée (en s'inspirant des travaux du GIEC et de l'IPBES.
Mesure 1.5	Développer la recherche socioéconomique prospective	D'autant qu'elle peut conditionner la prise de conscience et la mobilisation.
Mesure 1.6	Mieux connaître et faire connaître les impacts de l'évolution du climat	Toutes ces mesures et le développement de solutions issues de la recherche devraient également tenir compte du programme Future Earth ³⁷ , voire s'y intégrer.
Action n° 2 Mesure 2.2	Utiliser les observations satellitaires pour le suivi de l'impact du changement climatique avec application au cycle de l'eau (dans sa composante continentale) et à sa gestion	Essentiel au progrès de l'adaptation, ce programme est encore insuffisamment développé en France. Ces actions et mesures devraient développer des méthodes et des solutions issues d'options véritablement interdisciplinaires.
Action n° 3	Développer les recherches thématiques	Développer l'écologie de la santé, discipline émergente, notamment sur le plan universitaire.
Mesure 3.1	Développer la recherche pour permettre de construire et/ou de faire évoluer des équipements/infrastructures acceptables	
Mesure 3.2	Développer la recherche sur la modélisation du climat des villes, sur le rôle de la géométrie des morphologies urbaines	
Mesure 3.4	Mettre en place une caractérisation des événements extrêmes	
Action n° 4 Mesure 4.1	Constituer un réseau d'experts thématiques sur l'adaptation au changement climatique	Éviter l'enkystement et valoriser l'interdisciplinarité. Les frontières se fondant dans la complexité, il conviendra de faire apparaître des organisations flexibles et une concertation plus régulière des points de vue.

37. Nouveau programme international sur dix ans de l'ICSU (Conseil international pour la science) avec l'ONU, l'Unesco et l'OMM (Organisation météorologique mondiale), entre autres, qui développera les connaissances permettant de répondre efficacement aux risques du changement global de nos environnements et de développer les solutions vers des comportements plus durables à l'horizon des prochaines décennies. Il mobilisera de très nombreux scientifiques et décideurs, et renforcera leurs partenariats.
<http://www.icsu.org/future-earth>

12. Financement et assurance

FINANCEMENT ET ASSURANCE	
Action n° 3	Mobiliser des ressources pour l'adaptation
Action n° 4 Mesure 4.1	Appuyer la mobilisation d'expertise spécialisée pour les petites collectivités locales
Action n° 6 Mesure 6.1	Moduler les primes d'assurance pour favoriser une meilleure responsabilisation des acteurs sur le risque effectivement encouru
Mesure 6.2	Renforcer la souscription de l'assurance habitation dans les DOM

13. Santé

FINANCEMENT ET ASSURANCE		
Action n° 1	Conforter la recherche en « santé-climat »	<i>De même que pour la recherche (domaine 10, Éducation, formation, p.102, l'ensemble des mesures proposées ici doit être intégré dans la conception plus large des interactions et permettre de développer une plus grande résilience face aux multiples contraintes en pleine croissance. Toutes sont associées à un très fort potentiel d'impact positif direct sur la santé des Français, à court, à moyen et à long termes.</i>
Action n° 2	Mettre en place ou renforcer la surveillance des facteurs de risque susceptibles d'être influencés par les aléas climatiques (événements extrêmes)	
Mesure 2.3	Surveiller les micro-organismes producteurs de toxines	<i>Quantifier la progression des vecteurs et hôtes réservoirs, anticiper par rapport aux variations similaires (biodiversité, température...). Voir domaine 5, biodiversité, p. 95.</i>
Action n° 3 Mesure 3.1	Créer une veille « santé-climat »	<i>Pérenniser un groupe interdisciplinaire santé-climat, axé sur les problèmes émergents en écologie de la santé</i>
Mesure 3.2	Risques sanitaires et ressources en eau	<i>Intégrer cette mesure dans le cadre large des interactions, en regard notamment des recommandations du domaine 4, ressources en eau, p. 93.</i>
Mesure 3.3	Renforcer la sécurité sanitaire des aliments	
Action n° 4	Développer des actions de prévention sanitaire prenant en compte les conséquences des événements extrêmes et adapter les systèmes de vigilance et d'alerte	
Mesure 4.2	Renforcer la gestion des risques professionnels induits par le CC climatique	<i>Sensibiliser notamment les acteurs de la santé au travail (domaine 14, gouvernance, p. 105).</i>

FINANCEMENT ET ASSURANCE		
Mesure 4.3	Adapter les outils du bâti et les installations techniques des établissements de santé et médicosociaux	<i>Anticiper également les éléments du bâti d'habitation liés à la question des îlots de chaleur (flux énergétiques, préservations hivernales...).</i>
Mesure 4.4	Prendre en compte le changement climatique dans les plans de prévention	<i>Les impacts de cette mesure rejoignent les questions abordées pour l'ensemble des objectifs des groupes de veille (HCSP, InVS...).</i>
Mesure 4.5	Cartographier les eaux superficielles à risque de dégradation de leur qualité en cas de température extrême	<i>Tenir compte des recommandations du domaine 4 ressources en eau (p. 93) et des spécificités des milieux (oultre-mer, urbains/ruraux...).</i>
Action n° 5	Sensibiliser et éduquer l'ensemble des acteurs par des actions ciblées de formation, d'information et de communication	
Mesures 5.2, 5.3 et 5.4	Mobiliser et éduquer le public et les acteurs à l'impact sanitaire CC (sécurité alimentaire incluse)	<i>Sur ses versants de communication et de formation, cette mesure aura également des impacts au-delà des recommandations des domaines :</i> • 1 agriculture/aquaculture (p. 88), • 4 ressources en eau (p. 93), • 9 Information (p. 101), • 10 Éducation/formation (p. 102), • et 13 Santé (p. 104).

14. Gouvernance, actions transversales et internationales

GOUVERNANCE		
Action n° 1 Mesure 1.3	Renforcer le cadre de cohérence interrégional pour les stratégies d'adaptation	
Action n° 2 Mesure 2.1	Diffuser et actualiser le guide d'analyse de la vulnérabilité des territoires	
Mesure 4.5	Cartographier les eaux superficielles à risque de dégradation de leur qualité en cas de température extrême	<i>Tenir compte des recommandations du domaine 4, ressources en eau, (p. 93) et des spécificités des milieux (oultre-mer, urbains/ruraux...).</i>

ACTIONS TRANSVERSALES		
Action n° 3	Prendre en compte, dans les études de danger, le changement climatique projeté sur la durée de vie des installations classées	<i>Interactions fortes avec le domaine urbanisme et tourisme (p. 92).</i>
Action n° 5	Renforcer la recherche sur l'adaptation dans le cadre des investissements d'avenir	<i>Interactions et conséquences en lien avec les indicateurs économiques.</i>

ACTIONS EUROPEENNES ET INTERNATIONALES		
Mesure 1.1	Participer aux travaux européens dans le cadre du Livre blanc sur l'adaptation	
Mesure 1.2	Appuyer la coopération régionale sur le fonctionnement hydrologique du bassin méditerranéen et ses évolutions	
Action n° 2	Renforcer la coopération internationale pour améliorer la connaissance du climat et des événements météorologiques et hydrologiques	<i>Cette mesure répond déjà en ce domaine à l'un des exemples les plus aboutis de coopération scientifique internationale avec l'organisation et la publication des travaux du GIEC. Cette coopération devrait aussi se réformer afin de limiter sa propre contribution à la production de gaz à effets de serre (organisation et transports vers le lieu des conférences internationales).</i>
Mesure 2.1	Contribuer à l'acquisition de connaissance du système hydrologique et climatique au niveau régional	
Mesure 2.3	Soutenir financièrement le GIEC	<i>Associer également les réflexions et productions de l'IPBES.</i>
Action n° 3	Renforcer la capacité des pays en développement pour la prévention des risques et des impacts socioéconomiques liés à la variabilité et au changement climatique	
Mesure 3.1	Appuyer la création de systèmes de vigilance face au changement climatique en Afrique	<i>Les zones tropicales et subtropicales seront potentiellement les plus touchées par la chute des captures de poissons (–20 % à –50 %) due aux migrations des stocks sous l'effet du CC. S'en suivront des problèmes de sécurité alimentaire qui auront des conséquences en terme de santé humaine par la réduction des apports en protéines dans ces régions [182].</i>
Mesure 3.2	Soutenir la prévision climatique saisonnière en Afrique de l'Ouest	
Mesure 3.3	Appuyer la gestion durable des terres et l'adaptation au changement climatique dans la région sahélienne	
Action n° 4	Appuyer l'adaptation au changement climatique en Afrique de l'Ouest dans les secteurs de l'eau et de l'agriculture	
Mesure 4.1		
Mesure 4.3	Appuyer la prise en compte de l'adaptation au changement climatique dans la gestion des aires protégées	
Mesure 4.4	Appuyer les actions de gestion efficiente de l'eau en milieu urbain	

Recommandations et arguments

Gouvernance et interdisciplinarité

- **Créer un groupe interministériel de suivi des mesures climat-santé et des indicateurs sanitaires dédiés à cette surveillance**

La nature et la qualité de cette concertation entre domaines jusque-là réservés sont fondamentales pour intégrer au plus haut niveau de gouvernance (i) les notions de non-linéarité des phénomènes et les lois de la complexité (une approche multiéchelle peut être un atout pour étudier ces conditions de récursivité), (ii) le travail nécessaire pour réduire l'incertitude (et non la supprimer), abandonner l'illusion du contrôle *a priori* des événements (en espérant que ce puisse être un objectif acceptable de gouvernance...), et (iii) la nécessité de piloter ce type d'action de grande ampleur de façon concertée à l'instar des dynamiques intergouvernementales telles que le GIEC et l'IPBES. L'impact de l'altération des cycles de l'azote sur la qualité des littoraux, ou l'effet des antibiotiques en médecine vétérinaire et humaine sur la progression des bactéries multirésistantes, soulignent la nécessité d'une politique centrée sur l'écologie de la santé en nous rappelant le chemin qu'il reste à parcourir entre la compréhension des interdépendances et l'efficacité de l'action préventive, entre la planification *ex ante* et le pilotage adaptatif.

- **Inscrire plus largement le suivi des interrelations climat-santé dans les objectifs des plans de santé publique (PNSE), dans la recherche et la tenue des indicateurs (Direction de la recherche, des études, de l'évaluation et des statistiques [Drees])**

&

- **Mettre en place un plan de gouvernance du très long terme, associant l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et techniques (OPECST)**

Compte tenu des impacts potentiels de long terme (dégradation des conditions de sécurité alimentaire, plafonnement puis réduction de l'espérance

de vie, extinction de l'espèce...), ces interdépendances — une fois définies et précisées par les travaux de l'épidémiologie, de l'écotoxicologie ou par la détermination des mécanismes fondamentaux — doivent bénéficier d'une surveillance et donc d'indicateurs du même ordre que ceux qui permettent de suivre l'évolution d'affections liées aux conditions environnementales dégradées. Jointes à la dégradation des paramètres économiques et à leurs conséquences sanitaires, elles viendront en effet s'ajouter à ces agresseurs séculaires. Les institutions les plus appropriées dans ces rôles de suivi doivent ainsi pouvoir étendre la portée et la temporalité de leurs objectifs.

Territorialité

- **Intégrer les facteurs de vulnérabilité, tels que le vieillissement des populations et leur niveau de résilience, dans l'anticipation de marges d'adaptation plus réduites**

La croissance des contraintes, d'une part, et des vulnérabilités, d'autre part, indique une résilience des populations probablement de plus en plus faible. Au moment où se découvrent simultanément tous nos plafonds, l'ensemble de ces fragilités doit être reconnu afin d'en anticiper les impacts communs. Que deviennent les centenaires les plus fragiles dans une économie en récession ? Comment prendre en charge les polypathologies lorsque les capacités d'accueil diminuent ? Quels choix nos sociétés sans croissance opéreront-elles entre un investissement dans leurs maladies rares, aux coûts de traitement de moins en moins accessibles, dans les insuffisances terminales issues des pathologies dégénératives plus communes (neurologiques, carcinologiques ou cardiovasculaires), ou dans leurs affections les plus rapidement agressives (par échanges microbiens de résistances adaptatives croisées) ?

- **Travailler sur l'architecture et les infrastructures, dans un contexte d'urbanisme et de santé, afin de réduire notamment les impacts les plus forts (conception et gestion des bâtiments, îlots de chaleur...)**

&

- **Réduire l'impact et l'utilisation des énergies carbonées, notamment par le biais du développement des mobilités actives en milieux urbain et rural**

Ces démarches devraient pouvoir tirer parti de l'environnement direct en développant les moyens de transport actifs (marche, vélo, transports autonomes non motorisés...) facilités par des plans de déplacement spécifiques depuis le domicile vers l'ensemble des lieux de vie : l'école, l'université ou l'entreprise, et intégrés dans les plans de déplacements urbains.

Le travail autour de la prise en compte de ces conditions dans les questions d'urbanisme devra, quant à lui, permettre de développer des solutions de circulation de flux aériens et hydriques et de limiter l'impact des îlots de chaleur en cas de canicule, malgré la présence d'un bâti ancien et très lentement modifiable (le caractère renouvelable du bâti urbain est estimé à environ 1 % par an).

Veille et communication

- Créer des observatoires croisés : climat, biodiversité, risques sanitaires
- Associer aux objectifs de la nouvelle structure de prévention, résultant de l'intégration de l'Inpes, de l'InVS et de l'Eprus, la surveillance des interactions climato-sanitaires
- &
- Intégrer ces risques aux objectifs des directions de communication et de prévention sanitaires de cette nouvelle structure, dans le cadre de ses futurs programmes

Le plan de restructuration de l'Inpes et de l'InVS devrait intégrer les objectifs de surveillance des interactions climato-sanitaires à court et long terme, y compris dans ses cibles de communication, afin d'identifier précocement leurs risques émergents³⁸.

Recherche

- Développer les recherches en adaptation et les programmes ciblant les interactions non linéaires au sein des systèmes complexes
- Promouvoir la recherche sur la connaissance des services écosystémiques et sur les interactions climat-biodiversité-santé humaine
- Proposer des programmes ANR interdisciplinaires croisés entre santé, climat, technologie, pollutions et économie
- Développer les outils de mesure et les études d'impact sanitaire ; préciser les impacts économiques en évaluant la nature des rapports coût/bénéfice une fois considérée la non-linéarité des interactions
- &
- Intégrer les études portant sur l'écologie de la santé dans le cursus universitaire

Ces options devraient tenir compte, voire s'intégrer dans le programme *Future Earth*, insuffisamment développé en France. Comme on l'aura vu au chapitre II (p. 53), l'ensemble de ces axes doit faire l'objet d'un ciblage précis et financé afin de progresser rapidement dans la science des systèmes complexes et dans la compréhension des points de bascule afin d'en prévenir les effets primordiaux, sans attendre que la littérature ne donne à la science son *la* [183, 184]...

38. La récente et première campagne de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) mettant en scène le bulletin météo du 18 août 2050 avec Éveline Dhéliat, présentatrice actuelle de cette courte séquence suivie quotidiennement par des millions de Français, est un exemple de contribution à la sensibilisation nationale.
<http://www.meteo-paris.com/actualites/le-bulletin-meteo-du-18-aout-2050-03-decembre-2014.html>
(consulté le 30/06/2015)

Conclusion

La réduction des risques doit être désormais envisagée de façon globale [110] pour atténuer — si possible — les effets du changement climatique et se donner le temps de s'adapter. Les alternatives de gestion devront être politiquement intégrées (transitions écologique, énergétique, technologique, développement durable...) tant que faire se peut, avec l'ensemble des cibles. Une réflexion doit ainsi être encouragée autour de politiques nationales, en cohérence avec les politiques européennes et mondiales, prenant en compte les conséquences directes et indirectes sur les santé humaine, animale et végétale, des modifications climatiques, dès les prochaines années.

Il est nécessaire, en appui de la réflexion politique, d'élaborer rapidement des stratégies d'exploration et de modélisation prenant en compte les différents paramètres, selon les fluctuations les plus vraisemblables. Il est probable que certains seuils lors de ces variations auront des conséquences majeures sur la santé, mais il est difficile de les fixer *a priori*. De telles modélisations devraient permettre de considérer en permanence les conséquences connexes des décisions prises interagissant sur plusieurs paramètres simultanément.

Dans le domaine de la santé publique, une veille permanente sera nécessaire afin de s'assurer de la cohérence de l'action politique dans un contexte climatique, économique et sanitaire de plus en plus instable.

Avec une conférence 2015 qui pourrait bien être la dernière sous cette forme, il apparaît essentiel d'interpréter les interactions climat-biodiversité-santé dans le cadre d'une écologie globale de la santé, de coordonner nos efforts au plus haut niveau (condition première d'une gouvernance efficace, inscrite sur le long terme) et de mieux comprendre la non-linéarité des phénomènes autant que la progression de nos vulnérabilités.

Ces éléments permettront de mieux anticiper nos marges d'adaptation en situation de contraintes croissantes et, peut-être, de maintenir nos objectifs énergétiques et notre niveau de vie (ce qui reste une équation difficile à résoudre). L'optimisme nécessaire à tout cela ne devra pas cacher les réalités qui s'affirment, mais au contraire nous permettre d'affronter plus résolument l'ensemble de ces problèmes.

Références bibliographiques

- 1 **Le Roy Ladurie E.** *Histoire humaine et comparée du climat. Disettes et révolutions.* Paris : Fayard, 2006.
Le Réchauffement de 1860 à nos jours. Paris : Fayard, 2009.
- 2 Rapport du GIEC 2013 et sa synthèse :
Stocker T.F. et al. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press :1535 p.
GIEC. *Changements climatiques 2013. Résumé à l'intention des décideurs*, 2013.
http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_SPM_brochure_fr.pdf
(consulté le 03/03/2015).
- 3 **Lebeau A.** *L'Enfermement planétaire.* Paris : Folio actuel, Gallimard, 2008.
- 4 **Crutzen P. J.** Geology of mankind. *Nature*, 2002, vol. 415 : p. 23.
- 5 **Lim S. S. et al.** A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990-2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010. *The Lancet*, 2012, vol. 380 : p. 2224-2260.
- 6 **Toussaint J.-F., Swynghedauw B., Boeuf G.** *L'homme peut-il s'adapter à lui-même ?* Paris : Editions QUAE, 2012, 188 p.
<http://www.quae.com/fr/r2043-l-homme-peut-il-s-adapter-a-lui-meme.html> (consulté le 07/07/2015)
- 7 **Nobre A. D.** *O Futuro climatico da Amazônia.* Sao Paulo : Centro de Ciencia do Sistema Terrestre, ARA, octobre 2014.
<http://www.ccst.inpe.br/wp-content/uploads/2014/10/Futuro-Climatico-da-Amazonia.pdf> (consulté le 03/03/2015).
- 8 **Berthelot G. et al.** Athlete atypicity on the edge of human achievement: performances stagnate after the last peak, in 1988. *PLoS ONE*, 2010, vol. 5 (1) : e8800.
<http://www.plosone.org/article/fetchObject.action?uri=info:doi/10.1371/journal.pone.0008800&representation=PDF> (consulté le 03/03/2015).
- 9 **Berthelot G. et al.** The citius end: world records progression announces the end of a brief ultra-physiological quest. *PLoS ONE*, 2008, vol. 3 (2) : e1552.
<http://www.plosone.org/article/fetchObject.action?uri=info:doi/10.1371/journal.pone.0001552&representation=PDF> (consulté le 03/03/2015).
- 10 **Kannisto V.** Measuring the compression of mortality. *Demographic Research*, 2000, vol. 3 : p. 1-24.
- 11 **Helbing D.** Globally networked risks and how to respond. *Nature*, 2013, vol. 497 (7447) : p. 51-59.
- 12 **Guillou M., Matheron G.** *9 milliards d'hommes à nourrir. Un défi majeur.* Paris : François Bourin Editeur, 2011, 432 p.
- 13 **Lenoir J. et al.** A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science*, 2000, vol. 320 : p. 1768.
- 14 **Bertrand R. et al.** Changes in plant community composition lag behind climate warming in lowland forests. *Nature*, 2011, vol. 479 (7374) : p. 517-520.
- 15 **Devictor V. et al.** Differences in the climatic debts of birds and butterflies at a continental scale. *Nature Climate Change*, 2012, vol. 2 : p. 1-4.
- 16 **Butchart S.H. et al.** Global biodiversity: indicators of recent declines. *Science*, 2010, vol. 328 (5982) : p. 1164-1168.
- 17 **Estes J.A. et al.** Trophic downgrading of planet Earth. *Science*, 2011, vol. 333 (6040) : p. 301-306.
- 18 **Diamond J.** *Effondrement. Comment les sociétés décident de leur disparition ou de leur survie.* Paris : Gallimard, 2006.
- 19 **Bardgett R.D.** Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, 2014, vol. 515 (7528) : p. 505-511.
- 20 **de Nazelle A. et al.** Improving health through policies that promote active travel: a review of evidence to support integrated health impact assessment. *Environment International*, 2011, vol. 37 (4) : p. 766-777.

- 21 Fouillet A. *et al.* Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 2006, vol. 80 (1) : p. 16-24.
- 22 Kjellstrom T. *et al.* Workplace heat stress, health and productivity – an increasing challenge for low and middle-income countries during climate change. *Global Health Action*, 2009, vol. 2 : p. 1-6.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2799237/pdf/GHA-2-2047.pdf>
(consulté le 03/03/2015).
- 23 Agence internationale de l'énergie (IEA), *World Energy Outlook 2013*.
<http://www.worldenergyoutlook.org/publications/weo-2013/> (consulté le 03/03/2015).
- 24 Auzanneau M. Le Monde Blogs, « Oil Man », 11 juin 2014.
<http://petrole.blog.lemonde.fr/2014/06/11/petrole-hormis-les-non-conventionnels-americains-la-production-mondiale-a-baisse-en-2013/> (consulté le 03/03/2015).
- 25 Lee H.H. *et al.* Bacterial charity work leads to population-wide resistance. *Nature*, 2010, vol. 467 (7311) : p. 82-85.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2936489/pdf/nihms231232.pdf>
(consulté le 03/03/2015).
- 26 Prugnolle F., Chevillon C. Evolution adaptative des pathogènes, mécanismes et conséquences épidémiologiques. In : Guégan J.-F., Choisy M. *Introduction à l'épidémiologie des maladies infectieuses et parasitaires*. Bruxelles : De Boeck, 2009 : p. 311-345.
- 27 Fauci A. S., Morens D. M. The perpetual challenge of infectious diseases. *The New England Journal of Medicine*, 2012, vol. 366 (5) : p. 454-461.
<http://www.nejm.org/doi/full/10.1056/NEJMra1108296> (consulté le 03/03/2015).
- 28 Canton R. *et al.* Prevalence and spread of extended-spectrum beta-lactamase-producing Enterobacteriaceae in Europe. *Clinical Microbiology and Infection*, 2008, vol. 14 (Suppl. 1) : p. 144-153.
- 29 Centers for Disease Control and Prevention (CDC). Vancomycin-Resistant *Staphylococcus aureus* - New York, 2004. *MMWR*, 2004, vol. 53 (15) : p. 322-323.
<http://www.cdc.gov/mmwr/preview/mmwrhtml/mm5315a6.htm> (consulté le 03/03/2015).
- 30 Leport C., Guégan J.-F. dir. *Les maladies infectieuses émergentes : état de la situation et perspectives*. Paris : La Documentation française, 2011. <http://www.hcsp.fr/explore.cgi/avisrapportsdomaine?ae=avisrapportsdomaine&clefdomaine=1&clef=212&ar=a&menu=09> (consulté le 03/03/2015).
- 31 Stone R. Public Enemy Number One. *Science*, 2013, vol. 340 (6131) : p. 422-425.
- 32 Colizza V. *et al.* Modeling the worldwide spread of pandemic influenza, baseline case and containment interventions. *PLoS Medicine*, 2007, vol. 4 : p. e13.
<http://www.plosmedicine.org/article/fetchObject.action?uri=info:doi/10.1371/journal.pmed.0040013&representation=PDF> (consulté le 03/03/2015).
- 33 Stenseth N.C. *et al.* Plague dynamics are driven by climate variation. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 2006, vol. 103 (35) : p. 13110-13115.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1559761/pdf/zpq13110.pdf> (consulté le 03/03/2015).
- 34 Boucher H.W. *et al.* Bad bugs, no drugs: no ESKAPE! An update from the Infectious Diseases Society of America. *Clinical Infectious Diseases*, 2009, vol. 48 (1) : p. 1-12.
<http://cid.oxfordjournals.org/content/48/1/1.full.pdf+html> (consulté le 03/03/2015).
- 35 Keller F. Rapport d'information du Sénat : « Les nouvelles menaces des maladies infectieuses émergentes ».
http://www.senat.fr/rap/r11-638/r11-638_mono.html#fnref5 (consulté le 03/03/2015).
- 36 Besancenot J.-P. *Notre santé à l'épreuve du changement climatique*. Paris : Delachaux et Niestlé, 2007.
- 37 Antero-Jacquemin J. *et al.* Learning from the Leaders: Life-span trends in Olympians and Supercentenarians. *The Journals of Gerontology, A Biol Sci Med Sci*, 2014.
<http://biomedgerontology.oxfordjournals.org/content/early/2014/08/19/gerona.glu130.full.pdf+html>
(consulté le 03/03/2015).
- 38 Minino A. *et al.* Deaths: Final Data for 2011. *National Vital Statistics Reports*, 2012, vol. 63 (3). CDC, 11 juillet 2012.
<http://www.cdc.gov/nchs/products/nvsr.htm> (consulté le 03/03/2015).
- 39 Japan Ministry of Health, Labour and Welfare, *Report 2014*.
<http://www.bbc.co.uk/news/world-asia-19008870>

- 40 **Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN).** *Regards croisés sur la gouvernance du très long terme.* Paris : La Documentation française, 2013, 176 p.
- 41 **McMichael A. J.** Population health in the Anthropocene: Gains, losses and emerging trends. *Anthropocene Review*, 2014, vol. 1 (1) : p. 44-56.
- 42 **Palmer P. I., Smith M. J.** People power. Climate models must consider how humans are responding to a warming world. *Nature*, 2014, vol. 512 (347) : Editorial.
<http://www.nature.com/news/people-power-1.15765> (consulté le 07/07/2015)
- 43 **Government Office for Science.** *Foresight: Migration and Global Environmental Change. Final Project Report.* Londres : 2011.
https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/287717/11-1116-migration-and-global-environmental-change.pdf (consulté le 03/03/2015).
- 44 **Hsiang S. M. et al.** Quantifying the influence of climate on human conflict. *Science*, 2013, vol. 341 (6151) : p. 1189-1213.
- 45 **González M. C. et al.** Understanding individual human mobility patterns. *Nature*, 2008, vol. 453 : p. 779-782.
- 46 **Hardin G.** The Tragedy of the Commons. The population problem has no technical solution, it requires a fundamental extension in morality. *Science*, 1968, vol. 162 : p. 1243-1248.
- 47 **MEDDE.** *Plan national d'adaptation au changement climatique 2011-2015* (PNACC 2011). Paris : MEDDE, 2011.
<http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Plan-national-d-adaptation-2011-.html> (consulté le 07/07/2015)
- 48 **Onerc.** *Changements climatiques et risques sanitaires en France.* Paris : La Documentation française, 2007 (mise à jour, 2012).
<http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/074000568/> (consulté le 07/07/2015)
- 49 **DGS-IRD-EHESP.** *Les Effets qualitatifs du changement climatique sur la santé en France. Rapport de groupe interministériel.* Paris : La Documentation française, 2008.
<http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/094000460/> (consulté le 07/07/2015)
- 50 **Institut de veille sanitaire (InVS).** *Les impacts sanitaires du changement climatique en France : quels enjeux pour l'InVS ?* Paris : InVS, 2010.
http://www.invs.sante.fr/publications/2010/impact_sanitaire_changement_climatique/ (consulté le 07/07/2015)
- 51 **HCSP.** *Avis relatif aux risques pour la santé liés aux effets qualitatifs du changement climatique.* Paris : HCSP, 27 novembre 2009.
http://www.hcsp.fr/explore.cgi/hcspa20091127_risqueschgclima.pdf (consulté le 03/03/2015).
- 52 **Delavrière M., Guégan J.-F.** *Les Effets qualitatifs du changement climatique sur la santé en France.* Paris : Ministère de la Santé, de la Jeunesse, des Sports et de la Vie associative, avril 2008.
- 53 **Ademe.** *Adaptation au changement climatique. 12 fiches pour agir dans les collectivités locales.* Montpellier : Ademe, direction régionale du Languedoc-Roussillon, 2012.
<http://www.ademe.fr/expertises/changement-climatique-energie>
- 54 **Marcott S.A. et al.** A reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years. *Science*, 2013, vol. 339 : p. 1198-1201.
- 55 **GIEC.** *Fifth Assessment Report - Climate Change 2013 : The Physical Science Basis.* IPCC, 2014.
<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/> (consulté le 07/07/2013)
- 56 **Terray L., Boé J.** Quantifying 21st century France climate change and related uncertainties. *Comptes rendus Géoscience*, 2013, vol. 345 : p. 136-149.
- 57 **Pall P. et al.** Anthropogenic greenhouse gas contribution to flood risk in England and Wales in autumn 2000. *Nature*, 2011, vol. 470 : p. 382-385.
- 58 **Min S. K. et al.** 2011. Human contribution to more-intense precipitation extremes. *Nature*, 2011, vol. 470 : p. 378-381.
- 59 **Clement A., DiNezio P.** The Tropical Pacific Ocean. Back in the driver's seat? *Science*, 2014, vol. 343 (6174) : p. 976-978.
- 60 **Kossin J.P. et al.** The poleward migration of the tropical cyclone maximum intensity. *Nature*, 2014, vol. 509 : p. 349-352.

- 61 Hare W.L. *et al.* Climate hotspots: key vulnerable regions, climate change and limits to warming. *Regional Environmental Change*, 2011, vol. 11 (Suppl. 1) : p. S1-S13.
- 62 Rogelj J. Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates. *Nature Climate Change*, 2012, vol. 2 : p. 248-253.
- 63 Monastersky R. Global carbon dioxide levels near worrisome milestone. *Nature*, 2013, vol. 497 : p. 13. doi:10.1038/497013a
- 64 Carmody K. *et al.* Methane dynamics regulated by microbial community response to permafrost thaw. *Nature*, 2014, vol. 514 : p. 478-481.
- 65 Whiteman G. *et al.* Climate science: Vast costs of Arctic change. *Nature*, 2013, vol. 499 : p. 401-403.
- 66 Romanovsky V. E. *et al.* Arctic Report Card: Update for 2013. In : *Permafrost*. Etats-Unis : National Oceanic and Atmospheric Administration, 2013.
<http://www.arctic.noaa.gov/reportcard/about.html> (consulté le 07/07/2015)
- 67 Onerc. *Le Climat de la France au XXI^e siècle*. Volume 4. Paris : MEDDE, 2014.
http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERC_Climat_France_XXI_Volume_4.pdf (consulté le 03/03/2015).
- 68 Haarsma R.J. *et al.* More hurricanes to hit Western Europe due to global warming. *Geophysical Research Letters*, vol. 40 (9) : p. 1783-1788.
- 69 Le Treut H. *dir.* *Les Impacts du changement climatique en Aquitaine*. Bordeaux : Presses universitaires de Bordeaux et LGPA-Editions, 2013 : 367 p.
- 70 Willett K. M., Sherwood S. Exceedance of heat index thresholds for 15 regions in a warming climate using the Web-Bulb Globe Temperature. *International Journal of Climatology*, 2012, vol. 32 (2) : p. 161-177.
- 71 McKenzie R.L. *et al.* Ozone depletion and climate change, impact on UV radiation, *Photochemical & Photobiological Sciences*, 2011, vol. 10 : p. 182-198.
- 72 Onerc. *Le Climat de la France au XXI^e siècle*. Volume 3. Paris : MEDDE, 2012.
- 73 Delannoy J.-J. *et al.* *Livre blanc du climat en Savoie*. Le Bourget-du-Lac : conseil général de Savoie, MDP-Savoie Technolac, 2010 : 140 p.
http://www.mdp73.fr/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=145 (consulté le 07/07/2015)
- 74 Albrecht G. *et al.* Solastalgia: The distress caused by environmental change. *Australasian Psychiatry*, 2007, vol. 15 : p. 95-98.
- 75 MEDDE. *Panorama énergies-climat* (Débat national sur la transition énergétique et Synthèse des politiques et mesures d'atténuation du changement climatique en France). Paris : MEDDE, 2013.
http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Panorama-energies-climat_E2013.pdf (consulté le 07/07/2015) et
http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Fr_RMS_2013_.pdf (consulté le 07/07/2015)
- 76 Pirard P. *et al.* Gestion des événements climatologiques extrêmes : nécessité d'une réponse épidémiologique intégrée et planifiée dans l'organisation de la réponse sanitaire et sociale. *Bulletin Epidémiologique Hebdomadaire (BEH)*, 2012, vol. 12-13. Numéro thématique.
- 77 World Economic Forum. *Global Risks 2013: Eighth Edition*. World Economic Forum, 2013.
- 78 McMichael A. J. Globalization, climate change, and human health. *New England Journal of Medicine*, 2013, vol. 368 : p. 1335-1343.
- 79 Swynghedauw B. *Pour une écologie globale de la santé*. Paris : Editions Belin, 2015 : 243 p.
- 80 Confalonieri U. *et al.* Human health. In : Parry M.L. *et al.* *Climate Change: Impacts, Adaptation & Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of IPCC*. Cambridge : Cambridge University Press, 2007 : p. 391-431.
http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg2/en/ch8.html (consulté le 07/07/2015)
- 81 Levins R. Strategies of abstraction. *Biology and Philosophy*, 2006, vol. 21 : p. 741-755.
- 82 May R. M. Uses and abuses of mathematics in biology. *Science*, 2004, vol. 303 : p. 790-793.
- 83 Epstein J. M. 2008. Why Model ? *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2008, vol. 11 (4) : p. 12. <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/11/4/12.html> (consulté le 07/07/2015)
- 84 Hilborn R. C. Sea gulls, butterflies, and grasshoppers: A brief history of the butterfly effect in nonlinear dynamics. *American Journal of Physics*, 2004, vol. 72 (4) : p. 425-427.

- 85 **Morris A. et al.** Complex temporal climate signals drive the emergence of human water-borne disease. *Emerging Microbes & Infections. Nature*, 2014, vol. 3 : e56.
- 86 **Reshef D.N. et al.** Detecting novel associations in large data sets. *Science*, 2011, vol. 334 : p. 1518-1524.
- 87 **Fogel R.W.** Technophysio evolution and the measurement of economic growth. *Journal of Evolutionary Economics*, 2004, vol. 14 : p. 217-221.
- 88 **Patz J.A. et al.** Climate change: challenges and opportunities for global health, *Journal of the American Medical Association*, 2014, vol. 312 (15) : p. 1565-1580.
- 89 **Turner G.** *A comparison of the limits to growth with 30 years of reality*. Canberra : Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, 2008.
<http://www.csiro.au/Outcomes/Environment/Population-Sustainability/SEEDPaper19.aspx> (consulté le 03/03/2015).
- 90 **van Vuuren D.P., Faber A.** *Growing within Limits. A report to the 2009 assembly of the Club of Rome*. Bilthoven : Netherlands Environmental Assessment Agency, 2009 : 128 p.
<http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/500201001.pdf> (consulté le 03/03/2015) (consulté le 03/03/2015).
- 91 **Meadows D., Randers J., Meadows D.** *Limits to Growth. The 30-Year Update*. Vermont (Étas-Unis) : Chelsea Green Publishing, 2004 : 368 p. .
- 92 **Moss R.H. et al.** The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 2010, vol. 463 : p. 747-756.
- 93 **Chazelle B.** *L'Algorithmique et les Sciences*. Paris : Leçon inaugurale au Collège de France, 2012.
- 94 **Sokolov A.P. et al.** The MIT integrated global system model (IGSM) version 2: Model description and baseline evaluation. *Joint Program Report Series*, 2005.
http://web.mit.edu/globalchange/www/MITJPSPGC_Rpt124.pdf (consulté le 07/07/2015).
- 95 **Johansen A., Sornette D.** Finite-time singularity in the dynamics of the world population, economic and financial indices. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2001, vol. 294 (3-4) : p. 465-502.
- 96 **Berthelot G.** *The Phenotypic Expansion and its Boundaries*. Paris : université Paris Descartes, 2014
<http://arxiv.org/abs/1401.7474> (consulté le 07/07/215).
- 97 **Fulton E. A.** Approaches to end-to-end ecosystem models. *Journal of Marine System*, 2010, vol. 81 : p. 171-183.
- 98 **Ostrom E.** *Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action (Political Economy of Institutions and Decisions)*. Cambridge University Press, 1990.
- 99 **Toussaint J.-F.** *Expansion phénotypique, optima et limites de développement*. Paris : séminaire, chaire de développement durable, Collège de France, 11 février 2014.
<http://www.college-de-france.fr/site/gilles-boeuf/seminar-2014-02-11-10h00.htm> (consulté le 03/03/2015).
- 100 **Berthelot G. et al.** Exponential growth combined with exponential decline explains lifetime performance evolution in individual and human species. *Age*, 2012, vol. 4 : p. 1001-1009.
http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3682058/pdf/11357_2011_Article_9274.pdf (consulté le 03/03/2015).
- 101 **Saucedo M. et al.** Épidémiologie des morts maternelles en France 2001-2006. *Bulletin Epidémiologique Hebdomadaire (BEH)*, 2010, vol. 2-3 : p. 9-14.
http://www.invs.sante.fr/beh/2010/02_03/index.htm (consulté le 03/03/2015).
- 102 **Antero-Jacquemin J. et al.** Row for your life: a century of mortality follow-up of French Olympic rowers. *PLoS ONE*, 2014, vol. 9 (11) : e113362.
- 103 **Shoval O. et al.** Evolutionary trade-offs, Pareto optimality, and the geometry of phenotype space. *Science*, 2012, vol. 336 (6085) : p. 1157-1160.
- 104 **Steffen W.** *The Anthropocene Project. Where on Earth are we going?* Film, 2013.
Haus der Kulturen der Welt. HKW.
<http://www.youtube.com/watch?v=T8U6y4UNXRQ> (consulté le 07/07/2015).
- 105 **Steffen W.** The Anthropocene: Are humans now overwhelming the great forces of nature? *Ambio*, 2007, vol. 36 (8) : p. 614-621.

- 106 **Toussaint J.-F.** Le refus des limites. In : colloque *L'homme peut-il s'adapter à lui-même ? Options futures et marges d'acceptation*. Paris : Collège de France, 22 et 23 mai 2014.
<http://www.college-de-france.fr/site/gilles-boeuf/symposium-2014-05-23-12h00.htm>
(consulté le 03/03/2015).
- 107 **Haida A. et al.** Environment and scheduling effects on sprint and middle distance running performances. *PLoS ONE*, 2013, vol. 8 (11) : e79548
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3868388/pdf/pone.0079548.pdf>
(consulté le 03/03/2015).
- 108 **Laaidi M., Laaidi K., Besancenot J.-P.** Temperature-related mortality in France, a comparison between regions with different climates from the perspective of global warming.
International Journal of Biometeorology, 2006, vol. 51 (2) : p. 145-153.
- 109 **Pruitt J. N., Goodnight C. J.** Site-specific group selection drives locally adapted group compositions.
Nature, 2014, vol. 514 (7522) : p. 359-362.
- 110 **Rockström J. et al.** A safe operating space for humanity. *Nature*, 2009, vol. 461 : p. 472-475.
- 111 **Steffen W. et al.** Planetary boundaries: Guiding human development. *Science*, 2015, vol. 347 (6223).
- 112 **Bouwman L. et al.** Exploring global changes in nitrogen and phosphorus cycles in agriculture induced by livestock production over the 1900-2050 period. *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.*, 2013, vol. 110 : p. 20882-20887.
- 113 **Fukuyama F.** La Fin de l'histoire et le Dernier Homme. Paris : Flammarion, 1989.
<http://www.wesjones.com/eoh.htm> (consulté le 07/07/2015)
- 114 **Gruber N., Galloway J. N.** An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle. *Nature*, 2008, vol. 451 : p. 293-296.
- 115 **Vallin J., Meslé F.** 2010. Espérance de vie : peut-on gagner trois mois par an indéfiniment ?
Population et Sociétés, 2010, vol. 473 : p. 1-4.
- 116 **Olshansky S.J. et al.** In search of Methuselah: estimating the upper limits to human longevity.
Science, 1990, vol. 250 (4981) : p. 634-640.
- 117 **Toussaint J.-F., Swynghedauw B.** Croissance et renoncements : vieillir à l'épreuve du temps.
Esprit, 2010, vol. 366 : p. 60-74.
- 118 **Dewar R. C.** MEP as an inference algorithm. *Entropy*, 2009, vol. 11 : p. 931-945.
- 119 **Hayflick L.** *How and Why We Age*. New York : Ballantine Books, 1994 : 342 p.
- 120 **Van Deursen J. M.** The role of senescent cells in ageing. *Nature*, 2014, vol. 509 : p. 439-446.
- 121 **West G. B.** The importance of quantitative systemic thinking in medicine. *The Lancet*, 2012, vol. 379 : p. 1551-1559.
- 122 **Bach J. F.** The effect of infections on susceptibility to autoimmune and allergic diseases. *New England Journal of Medicine*, 2002, vol. 347 (12) : p. 911-920.
- 123 **Keesing F. et al.** Effects of species diversity on disease risk. *Ecology Letters*, 2006, vol. 9 : p. 485-498.
- 124 **HMPC (The Human Microbiome Project Consortium).** (1) Structure, function and diversity of the healthy human microbiome. *Nature*, 2012, vol. 486 : p. 207-214. (2) A framework for human microbiome research. *Nature*, 2012, vol. 486 : p. 215-221.
- 125 **Shade A. et al.** Fundamentals of microbial community resistance and resilience. *Frontiers in Microbiology*, 2012, vol. 3 : p. 1-19.
- 126 **Konopka A.** What is microbial community ecology. *The ISME Journal*, 2009, vol. 3 : p. 1223-1230.
- 127 **Bibby K.** Metagenomic identification of viral pathogens. *Trends in Biotechnology*, 2013, vol. 31 (5) : p. 275-279.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.tibtech.2013.01.016> (consulté le 07/07/2015)
- 128 **Claesson M.J. et al.** Gut microbiota composition correlates with diet and health in the elderly.
Nature, 2012, vol. 488 : p. 178-184.
- 129 **Inserm.** *Pesticides. Effets sur la santé*. Rapport. Paris : Inserm, 2013 : XII-1001 p.
- 130 **Bell M.L. et al.** The exposure-response curve and risk of mortality and the adequacy of current ozone regulations. *Environmental Health Perspectives*, 2006, vol. 114 : p. 532-536.

- 131 Pope C.A. *et al.* Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *The Journal of American Medical Association*, 2002, vol. 287 : p. 1132-1141.
- 132 European Agency for Safety and Health at Work (EU-OSHA). *Expert Forecast on Emerging Chemical Risks Related to Occupational Safety and Health. European Risk Observatory Report*. Luxembourg : Office for Official Publications of the European Communities, 2008 : 198 p.
https://osha.europa.eu/en/publications/reports/TE3008390ENC_chemical_risks
(consulté le 07/07/2015)
- 133 World Health Organization (WHO) and World Meteorological Organization (WMO). *Atlas of Health and Climate*. WHO, 2012 : 68 p.
- 134 Haahhtela T. *et al.* The biodiversity hypothesis and allergic disease: world allergy organization position statement. *World Allergy Organization Journal*, 2013, vol. 6 : p. 3-18.
- 135 National Institute of Environmental Health Sciences (NIEHS). *A Human Health Perspective on Climate Change*. Environmental Health Perspectives & NIEHS, 2010 : 80 p.
https://www.niehs.nih.gov/health/materials/a_human_health_perspective_on_climate_change_full_report_508.pdf (consulté le 07/07/2015)
- 136 Smith K. J., Guégan J.-F. Changing geographic distributions of human pathogens. *The Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 2010, vol. 41 : p. 231-250.
- 137 Baker-Austin C. *et al.*, 2013. Emerging Vibrio risk at high latitudes in response to ocean warming. *Nature Climate Change*, 2013, vol. 3 : p. 73-77.
- 138 Lobell D. B., Tebaldi C. Getting caught with our plants down. The risks if a global crop yield slowdown from climate trends in the next two decades. *Environmental Research Letters*, 2014, vol. 9 : p. 074003. DOI: 10.1088/1748-9326/9/7/074003.
<http://iopscience.iop.org/1748-9326/9/7/074003/> (consulté le 07/07/2015)
- 139 Fouillet A. *et al.* 2008. Has the heat-related mortality response in France changed since the 2003 heat wave? A study of the 2006 heat wave. *International Journal of Epidemiology*, 2008, vol. 37 : p. 309-317.
- 140 Rey G. *et al.* The impact of major heat waves on all-cause and cause-specific mortality in France from 1971 to 2003. *International Archives of Occupational Environmental Health*, 2007, vol. 80 : p. 615-626.
- 141 Rey G., Fouillet A., Bessemoulin P., Frayssinet P., Dufour A., Jouglé E., Hémon D. Heat exposure and socio-economic vulnerability as synergistic factors in heat-wave-related mortality. *European Journal of Epidemiology*. 2009, vol. 24(9) : p. 495-502.
- 142 Onerc. *Le Climat de la France au XXI^e siècle*. Volume 1. Paris : MEDDE, 2011.
- 143 Vardoulakis S., Heaviside C. *Health Effects of Climate Change in the UK 2012*. Londres : Department of Health, Health Protection Agency, 2012.
https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/371103/Health_Effects_of_Climate_Change_in_the_UK_2012_V13_with_cover_accessible.pdf
(consulté le 07/07/2015)
- 144 Kinney P. L. La mortalité hivernale va-t-elle diminuer avec le changement climatique ? *Bulletin Épidémiologique Hebdomadaire*, 2012, vol. 12-13 : p. 148-151.
- 145 Langford I. H., Bentham G. The potential effects of climate change on winter mortality in England and Wales. *International Journal of Biometeorology*, 1995, vol. 38 : p. 141-147.
- 146 Linares C., Diaz J. Impact of high temperatures on hospital admissions: comparative analysis about mortality. *The European Journal of Public Health*, 2007, vol. 18 : p. 317-322.
- 147 Al-Tamer Y. Y., Al-Hayali J. M., Al-Ramadhan E. A. 2008. Seasonability of hypertension. *The Journal of Clinical Hypertension*, 2008, vol. 10(2) : p. 125-129.
- 148 Peters M.N. *et al.* Effect of hurricane Katrina on chronobiology at onset of acute myocardial infarction during the subsequent years. *American Journal of Cardiology*, 2013, vol. 111 (6) : p. 800-803.
- 149 Dixsaut G. Vagues de chaleur et climatisation. *Bulletin d'Information en Santé Environnementale* (Québec). 2005, vol. 16 : p. 1-12.
- 150 Labonté R. *et al.* The growing impact of globalization for health and public health practice. *Annual Review of Public Health*, 2011, vol. 32 : p. 263-283.
- 151 Lozano R. *et al.* Global and regional mortality from 235 causes of death for 20 age groups in 1990 and 2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010. *The Lancet*, 2012, vol. 380

- (9859) : p. 2095-2128.
- 152 **Yusuf S. et al.** Global burden of cardiovascular diseases. Part I: general considerations, the epidemiologic transition, risk factors, and impact of urbanization. *Circulation*, 2001, vol. 104 : p. 2746-2753. Global burden of cardiovascular diseases. Part II: variations in cardiovascular disease by specific ethnic groups and geographic regions and prevention strategies. *Circulation*, 2001, vol. 104 : p. 2855-2864.
 - 153 **Bray F. et al.** Global cancer transitions according to the Human Development Index (2008-2030): a human population-based study. *The Lancet Oncology*, 2012, vol. 13 : p. 790-801.
 - 154 **Fédération française de cardiologie (FFC).** *Livre Blanc. Etats généraux vers un plan cœur*. Paris : FFC, 2014.
http://www.fedecardio.org/sites/default/files/pdf/livre_blanc.pdf (consulté le 03/03/2015).
 - 155 **Institut national du cancer (INCa).** *La situation du cancer en France en 2012*. Paris : INCa, collection Etat des lieux et des connaissances, 2012.
<http://www.cancer-environnement.fr/LinkClick.aspx?fileticket=wB4OWSsGv9U%3D&tabid=415&id=2202> (consulté le 07/07/2015)
 - 156 **Ramsbottom D. et al.** *Climate Change Risk Assessment for the Floods and Coastal Erosion Sector*. Londres: Department for the Environment, Food and Rural Affairs, 2012.
<http://www.defra.gov.uk/environment/climate/government/risk-assessment/> (consulté le 07/07/2015)
 - 157 **Jacqmin-Gadda H. et al.** A 20-year prevalence projection for dementia and impact of preventive policy about risk factors. *European Journal of Epidemiology*, 2013, vol. 28 : p. 493-502.
 - 158 **de Peretti C. et al.** Personnes hospitalisées pour infarctus du myocarde en France: tendances 2002-2008. *Bulletin Épidémiologique Hebdomadaire*, 2012, vol. 41 : p. 459-465.
 - 159 **Golde T. E. et al.** Thinking laterally about neurodegenerative proteinopathies. *Journal of Clinical Investigation*, 2013, vol. 123 : p. 1847-1855 .
 - 160 **Jucker M., Walker L. C.** Self-propagation of pathogenic protein aggregates in neurodegenerative diseases. *Nature*, 2013, vol. 501 : p. 45-51.
 - 161 **Loh J.C. et al.** Temporal trends in treatment and outcomes for advanced heart failure with reduced ejection fraction 1993-2010. *Circulation Heart Failure*, 2013, vol. 6 (3) : p. 411-419.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3674961/pdf/nihms467629.pdf> (consulté le 03/03/2015).
 - 162 **Danaei G. et al.** National, regional, and global trends in systolic blood pressure since 1980: a systematic analysis of health examination surveys and epidemiological studies with 786 country-years and 5,4 million participants. *The Lancet*, 2011, vol. 377 : p. 568-577.
 - 163 **Gallez C.** 2005. *Rapport sur la maladie d'Alzheimer et les maladies apparentées*. Paris : Office parlementaire d'évaluation des politiques de santé, 2005.
<http://www.assemblee-nationale.fr/12/rap-off/i2454.asp> (consulté le 07/07/2015)
 - 164 **Aouba A. et al.** L'évolution de la mortalité et des causes de décès entre 1990 et 2009. *Actualité et dossier en santé publique*, 2012, vol. 80 : p. 24-28.
 - 165 **Lucas R. M. et al.** Estimating the global disease burden due to UV radiation exposure. *International Journal of Epidemiology*, 2008, vol. 37 : p. 654-667.
 - 166 **Institut national du cancer (INCa).** *UV (artificiels et solaires), vitamine D et cancers non cutanés. Rapport intégral*. Paris : INCa, 2011.
 - 167 **Vernant J.-P.** Recommandations pour le troisième Plan cancer. Paris : ministère de la Santé, 2013 : 165 p.
<http://www.sante.gouv.fr/IMG/pdf/Recommandations-pour-le-3e-plan-cancer.pdf> (consulté le 07/07/2015)
 - 168 **Caminade C. et al.** Suitability of European climate for the Asian tiger mosquito *Aedes albopictus*. *Journal of The Royal Society Interface*, 2012, vol. 9 (75) : p. 2708-2717.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3427500/pdf/rsif20120138.pdf> (consulté le 03/03/2015).
 - 169 **Woolhouse M.E.J., Gowtage-Sequeria S.** Host range and emerging and reemerging pathogens. *Emerging Infectious Diseases*, 2005, vol. 11 : p. 1842-1847.

- 170 **Guernier V., Guégan J.-F.** Ecology drives the worldwide distribution of human diseases. *PLoS Biology*, 2004, vol. 2 (6) : p. 740-746.
- 171 **Negredo A., et al.** Discovery of an Ebolavirus-like filovirus in Europe. *PLoS Pathogens*, 2011, vol. 7 : p. e1002304
- 172 **Chastel C. et al.** Les virus bougent : périls planétaires. *Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine*, 2007, vol. 191 : p. 1563-1577.
- 173 **Duggar E., Bokil M.** Population aging will dampen economic growth over the next two decades. Moody's Investor Service, 6 août 2014.
http://www.ilcampodelleidee.it/allegati/ricerca-moody_x27_s-sull_x27_invecchiamento-nei-diversi-paesi.pdf (consulté le 03/03/2015).
- 174 **OCDE.** *Perspectives de l'environnement de l'OCDE à l'horizon 2050. Les conséquences de l'inaction.* OCDE, 2012.
- 175 **Neubauer P. et al.** Resilience and recovery of overexploited marine populations. *Science*, 2013, vol. 340 : p. 347-349.
- 176 **Quental T.B. et al.** How the Red Queen drives terrestrial mammals to extinction. *Science*, 2013, vol. 341 : p. 290-292.
- 177 **Janetos A.C. et al.** Condition and trends in systems and services, trade-offs for human well-being. In : *Ecosystems and human well-being. Millenium Ecosystem Assessment.* OMS, 2005 : p. 829-838.
- 178 Identifier et surveiller les impacts sanitaires du changement climatique pour s'y adapter. Numéro thématique. *Bulletin Épidémiologique Hebdomadaire*, 2012, vol. 12-13 : p. 145-160.
<http://www.invs.sante.fr/Publications-et-outils/BEH-Bulletin-epidemiologique-hebdomadaire/Archives/2012/BEH-n-12-13-2012> (consulté le 03/03/2015).
- 179 **Toussaint J.-F.** *Retrouver sa liberté de mouvement. Plan national de prévention par l'activité physique et sportive (PNAPS).* Paris : ministère de la Santé, de la Jeunesse, des Sports et de la Vie associative, 2008 : 295 p.
http://www.ladocumentationfrancaise.fr/docfra/rapport_telechargement/var/storage/rapports-publiques/084000769/0000.pdf (consulté le 03/03/2015).
- 180 **Vert J. et al.** *Agriculture, forêt, climat : vers des stratégies d'adaptation.* Paris : Centre d'études et de prospective du ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2013.
- 181 **Boeuf G., Toussaint J.-F.** Colloque *L'homme peut-il s'adapter à lui-même ?* Paris : Muséum national d'histoire naturelle, 29 et 30 octobre 2010. Soutenu par le HCSP.
http://www.canal-insep.fr/fr/colloque_irmes_mnhn_paris_descartes/02-evolution-seculaire-des-capacites-despece-jf-toussaint (consulté le 07/07/2015)
http://www.canal-insep.fr/fr/colloque_irmes_mnhn_paris_descartes/01-ouverture-du-colloque-g-boeuf (consulté le 07/07/2015)
- 182 **Cheung W. W. L., Watson R., Pauly D.** Signature of ocean warming in global fisheries catch. *Nature*, 2013, vol. 497 (7449) : p. 365-368.
- 183 **Meyronnis F.** *Proclamation sur la vraie crise mondiale.* Paris : Les liens qui libèrent, 2014 : 112 p.
- 184 **McCarthy C.** *La Route.* Paris : Editions de l'Olivier, 2008 : 287 p.

Pour en savoir plus : autres références

Rapports

Onerc. *Le Climat de la France au XXI^e siècle*. Paris : MEDDE.

- Volume 1 (2011) : *Scénarios régionalisés*.
 - Volume 2 (2012) : *Scénarios régionalisés. Indices de référence pour la métropole*.
 - Volume 3 (2012) : *Évolution du niveau de la mer*.
 - Volume 4 (2014) : *Scénarios régionalisés pour la métropole et les régions d'outre-mer*.
 - Volume 5 (2015) : *Changement climatique et niveau de la mer. De la planète aux côtes françaises*.
- <http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Rapports-climat-de-la-France-au-.html>
(consulté le 07/07/2015)

CNRS. *Maladies émergentes et réémergentes chez l'homme*. Paris : CNRS, 2010.

European Environment Agency (EEA). *Climate Change, Impacts and Vulnerability in Europe 2012*. EEA, 2012.

HCSP. *Maladies infectieuses émergentes : état de la situation et perspectives*. Paris : HCSP, 2011.

<http://www.hcsp.fr/explore.cgi/avisrapportsdomaine?ae=avisrapportsdomaine&clefdomaine=1&clefr=212&ar=a&menu=09> (consulté le 07/07/2015)

HCSP. *Évaluation du Plan national pour préserver l'efficacité des antibiotiques*. Paris : HCSP, 2011.

www.hcsp.fr/explore.cgi/hcsp20110204_pnpeantibio.pdf (consulté le 07/07/2015)

Observatoires régionaux

<http://wiklimat.developpement-durable.gouv.fr>

CLIMSEC. *Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol*. Paris : Centre national de recherche météorologique (CNRM), 2011.

http://www.cnrm-game.fr/IMG/pdf/2011_fmaif_rapport_final_v2.2.pdf (consulté le 07/07/2015)

EPICEA. *Étude pluridisciplinaire des impacts du changement climatique à l'échelle de l'agglomération parisienne*. Paris : CNRM, 2012.

http://www.apur.org/sites/default/files/documents/epicea-rapport-final_v4.pdf (consulté le 07/07/2015)

Articles et ouvrages

Beggs P. J., Bambrick H. J. Is the global rise in asthma an early impact of anthropogenic climate change? *Environmental Health Perspectives*, 2005, vol. 113 : p. 915-919.

Besancenot J.-P. *La Mortalité selon le contexte thermique. Le Cas de la France*. Dijon : faculté de médecine, 2004.

Chauveau M. et al. Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070 ? *La Houille blanche*, 2013, vol. 4 : p. 5-15.

Dunne J. P. Reductions in labour capacity from heat stress under climate warming. *Nature Climate Change*, 2013, vol. 3 : p. 563-566.

Kennedy T. A. et al. Biodiversity as a barrier to ecological invasion. *Nature*, 2002, vol. 417 : p. 636-638.

Lavaysse C. et al. Statistical downscaling of the French Mediterranean climate: assessment for present and projection in an anthropogenic scenario. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2012, vol. 12 : p. 651-670.

Lebeau A. *Les Horizons terrestres*. Paris : Gallimard, 2011.

Levins R. The strategy of model building in population biology. *American Scientist*, 1966, vol. 54 (4) : p. 421-431.

Piazza M. et al. Comparaison de deux méthodes de désagrégation pour l'étude du climat et du changement climatique sur les zones de montagne en France. *La Houille blanche*, 2013, vol. 5 : p. 22-29.

Quintana-Seguí P. et al. Comparison of past and future Mediterranean high and low extremes of precipitation and river flow projected using different statistical downscaling methods. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2011, vol. 11 : p. 1411-1432.

Roddier F. *Thermodynamique de l'évolution*. Aix-en-Provence : Editions Parole, 2012.

Rogot E. Associations of coronary and stroke mortality with temperature in selected areas of USA, 1962-1966. *American Journal of Epidemiology*, 1976, vol. 103 (6) : p. 565-575.

-
- Swynghedauw B.** Conséquences médicales de l'effet de serre. *La Presse Médicale*, 2009, vol. 38 : p. 551-561.
- Swynghedauw B.** *Quand le gène est en conflit avec son environnement. Une introduction à la médecine darwinienne.* Bruxelles/Paris : De Boeck Ed., 2009 : 368 p.
- Swynghedauw B.** *L'Homme malade de lui-même.* Paris : Belin Ed., 2015 : 240 p.
- Vandenberg L. N.** Hormones and endocrine-disrupting chemicals. Low-dose effects and nonmonotonic dose responses. *Endocrine Review*, 2012, vol. 33 : p. 378-455.
- Vidal J.-P. et al.** Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Moscou hydrometeorological suite. *Hydrology Earth System Sciences*, 2010, vol. 14 (3) : p. 459-478.
- Vidal J.-P. et al.** Evolution of spatio-temporal drought characteristics: validation, projections and effect of adaptation scenarios. *Hydrology Earth System Sciences*, 2012, vol. 16 (8) : p. 2935-2955.

Annexes

Annexe 1 : Plans de réponse aux situations d'urgence

Ordonnancement du dispositif de prévention et de gestion des risques liés au changement climatique dans une logique de santé des populations

Le changement climatique est susceptible d'entraîner des risques sanitaires à court et à long terme (au-delà de cinquante ans). La réponse aux risques immédiats fait l'objet de nombreux plans que nous nous proposons de replacer dans ce contexte. En ce qui concerne les conséquences indirectes, ou à long terme, le manque de traduction dans les faits des velléités politiques tant nationales qu'internationales conduit à un attentisme ne permettant pas, pour l'instant, l'élaboration de plan spécifique lié aux risques sanitaires en rapport avec le climat.

Cadre

Les dispositifs de sécurité sanitaire en France, comme au niveau européen et international, sont mobilisables pour prévenir et faire face aux conséquences d'événements climatiques majeurs, identifiés dans les multiples travaux disponibles sur le thème du changement climatique, dans le cadre des mesures d'adaptation à développer.

La sécurité sanitaire traite de la sécurité et de la gestion du risque concernant la santé. Nous en retiendrons la définition suivante : protection de la santé de l'homme contre les risques alimentaires, environnementaux, induits par le fonctionnement de la société, ou sanitaires au sens strict³⁹. « *La loi de sécurité sanitaire de 1998 a posé de nouvelles fondations au dispositif de sécurité sanitaire en dissociant la surveillance et l'expertise scientifique — confiées à des agences — de la gestion de crise, qui ressort du politique*⁴⁰. »

39. Tabuteau D. *Veille et sécurité sanitaires. Horizons stratégiques*. Paris : La Documentation française, 2007 : p. 25-27.

40. Tabuteau D. *La Sécurité sanitaire*. Paris : Editions Berger-Levrault, 2002 : p. XX.

Parmi les dispositifs de sécurité sanitaire existants en France, nous nous intéresserons principalement à ceux qui sont dédiés à la gestion du risque sanitaire, dont certains sont indissociables de la sécurité civile, voire militaire.

En ce qui concerne la sécurité sanitaire au niveau supranational seront présentés les principaux dispositifs et institutions de sécurité sanitaire chargés de la surveillance, en lien avec les éléments du niveau national préalablement abordés.

Contexte français

L'État dispose d'un arsenal de plans, développés au niveau local ou national en prévision d'accidents de grande ampleur et de catastrophes, destinés à favoriser la qualité de sa réaction et de ses actions.

Le SGDSN (Secrétariat général de la défense et de la sécurité nationale) assiste le Premier ministre pour la préparation, la mise en œuvre et le suivi des décisions du gouvernement en matière de politique générale de la défense. Il est chargé d'élaborer la planification nationale de sécurité ayant pour but d'anticiper les crises majeures et d'y répondre et de veiller à la cohérence de la politique d'entraînement et de conduite des exercices.

Le dispositif Orsec (Organisation de la réponse de la sécurité civile)

Issu de la nouvelle organisation de la réponse aux situations de crises majeures, instaurée par la loi de modernisation de la sécurité civile du 13 août 2004 (fusion de divers plans préexistants (plan rouge, plan inondation, etc.), le dispositif comprend une déclinaison en trois niveaux territoriaux (zonal, départemental et maritime), le niveau national ayant été supprimé.

Les types de plans qui coexistent (dont trois sont des déclinaisons du dispositif Orsec) sont les suivants :

- Orsec zonal (sous l'autorité du préfet de zone de défense et de sécurité),
- Orsec départemental (sous la responsabilité du préfet de département).

Le plan particulier d'intervention (PPI)

Ce plan constitue un des volets du dispositif Orsec départemental. Un tel document doit être élaboré en cas de présence, sur le territoire concerné, d'installations ou ouvrages industriels présentant des caractéristiques spécifiques, fixées par décret⁴¹ (établissements classés SEVESO⁴³). En dehors des établissements utilisant des micro-organismes hautement pathogènes dans le cadre d'une activité soumise aux conditions définies par le décret prévu à l'article L.5139-2 du code de la Santé, les installations suivantes sont concernées :

- les sites comportant au moins une installation nucléaire de base ;

41. Décret n° 2005-1158 du 13 septembre 2005, pris en application de la loi de modernisation de la sécurité civile du 13 août 2004.

42. Arrêté du 5 janvier 2006 relatif à la consultation du public sur le projet de plan particulier d'intervention de certaines installations, pris en application de l'article 8-II du décret 2005-1158. Arrêté du 5 janvier 2006 relatif aux informations nécessaires à l'élaboration du plan particulier d'intervention, pris en application de l'article 4 du décret 2005-1158.

43. <http://www.interieur.gouv.fr/Le-ministere/Securite-civile/Documentation-technique/Planification-et-exercices-de-Securite-civile> (consulté le 07/07/2015)

- les installations classées telles que définies par décret ;
- les stockages souterrains de gaz naturel, d'hydrocarbures liquides, liquéfiés ou gazeux, ou de produits chimiques à destination industrielle ;
- les aménagements hydrauliques qui comportent à la fois un réservoir d'une capacité égale ou supérieure à 15 millions de mètres cubes et un barrage ou une digue d'une hauteur d'au moins 20 mètres au-dessus du point le plus bas du sol naturel ;
- les ouvrages d'infrastructure liée au transport des matières dangereuses, définis par les décrets prévus à l'article L.551-2 du code de l'Environnement.

**Orsec maritime
(sous l'autorité
du préfet maritime)**

La pollution en mer, « POL.MAR. mer »⁴⁴, le plan POLMAR/TERRE, sur la frange côtière, sont confiés aux préfets des départements concernés, qui en assurent la mise en œuvre, sous l'autorité du ministre de l'Intérieur. La préparation matérielle du plan, c'est-à-dire la mise en place des moyens techniques et financiers ainsi que la qualification du personnel, en ce qui le concerne, est du ressort du ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement. Le plan POLMAR/MER est confié aux préfets maritimes⁴⁵.

**Plan communal
de sauvegarde (sous
l'autorité du maire)**

Il se base sur le recensement des vulnérabilités et des risques (présents et à venir, par exemple liés au changement climatique) sur la commune (notamment dans le cadre du dossier départemental sur les risques majeurs établi par le préfet du département) et des moyens disponibles (communaux ou privés) sur la commune. Il prévoit l'organisation nécessaire pour assurer l'alerte, l'information, la protection et le soutien de la population au regard des risques.

Les plans spécifiques de préparation et gestion des alertes sanitaires nationales et internationales

**Plans d'action
nationaux
en application
du Règlement
sanitaire
international (RSI)**

Il est sous la responsabilité du chef du Département des urgences sanitaires (DUS) de la Direction générale de la santé (DGS) et comporte deux volets : 1) la gestion des risques spécifiques pour la santé ayant une portée internationale et 2) le renforcement des systèmes de surveillance.

Le RSI est coordonné par l'OMS, qui met en place des programmes spécifiques de sécurité sanitaire relatifs à des maladies infectieuses qui peuvent avoir d'importantes répercussions sur la santé publique et franchir rapidement les frontières (peste, choléra, fièvre jaune...), ainsi que d'autres maladies ou problèmes de santé publique à potentiel épidémique (paludisme, résistance aux antibiotiques). Quatre maladies, qui doivent être notifiées à l'OMS en vertu de ce règlement, font l'objet d'une définition standard. Il s'agit de la variole, la poliomyélite due à un poliovirus de type sauvage, la grippe humaine causée par un nouveau sous-type, et le SRAS.

44. Instruction du 2 avril 2001 relative à l'intervention des pouvoirs publics en cas d'accidents maritimes majeurs.

45. Instruction européenne du 7 septembre 1989 relative à l'action des pouvoirs publics en cas d'accident survenant lors d'un transport maritime de matières radioactives (Plan NUCMAR).

Plans de gestion
des situations
exceptionnelles

A titre d'exemples

Plan national de prévention et de lutte « Pandémie grippale »⁴⁶

L'impact sanitaire dépend du virus (transmissibilité, virulence), de la vulnérabilité de la population, du contexte climatique (vague de froid) et sanitaire (saturation du système de soins).

Plan blanc et plan blanc élargi⁴⁷

L'objectif est de mettre à disposition des préfets de département un outil de réponse aux menaces sanitaires graves pouvant être adapté aux risques spécifiques quelles que soient leurs caractéristiques (nucléaires, radiologiques, biologiques et chimiques (NRBC), climatiques, technologiques...). Le plan blanc élargi permet la mobilisation si nécessaire de toutes les structures sanitaires et médicosociales et de tous les professionnels de santé pouvant être concernés par ce type d'événement. Il précise leur rôle, les modalités de leur mobilisation et les moyens de leur coordination. Tous les établissements de santé sont tenus d'élaborer un plan blanc et tous les départements sont tenus d'établir un plan blanc élargi.

Plan national canicule⁴⁸

Le plan national canicule est annexé à une instruction interministérielle du 6 mai 2014.

Le plan canicule comporte quatre niveaux :

- niveau 1 (vigilance verte), « veille saisonnière » ;
- niveau 2 (vigilance jaune), « avertissement chaleur », en cas de probabilité importante de passage en vigilance orange dans les jours qui suivent ;
- niveau 3 (vigilance orange), « alerte canicule », déclenché par les préfets de département, en lien avec les agences régionales de santé (ARS) ;
- niveau 4 (vigilance rouge), « mobilisation maximale ».

Les recommandations émises à destination de différents publics, lieux, ou en matière de maintien de la chaîne du froid ont été publiées en mai 2014 par le HCSP⁴⁹.

Plan grand froid, plan hiver⁵⁰

Certaines populations (enfants, personnes âgées ou présentant une pathologie chronique préexistante) sont plus vulnérables vis-à-vis du froid. Peuvent également être impactées les personnes ne pouvant se protéger du froid (personnes sans abri ou demeurant dans des logements insalubres, mal chauffés ou mal isolés) ou travaillant

46. http://www.risques.gouv.fr/sites/default/files/upload/sdgsnplan_pandemiegrippale_octobre_2011.pdf (consulté le 07/07/2015)

47. Circulaire N° DHOS/CGR/2006/401 du 14 septembre 2006 relative à l'élaboration des plans blancs des établissements de santé et des plans blancs élargis.

48. Instruction interministérielle N° DGS/DUS/DGOS/DGCS/DGSCGC/DGT/2013/152 du 10 avril 2013 relative au Plan national canicule 2013.

49. Recommandations sanitaires du Plan national canicule 2014. <http://www.hcsp.fr/explore.cgi/avisrapportsdomaine?clefr=418> (consulté le 07/07/2015)

50. Instruction interministérielle N° DGS/DUS/DGOS/DGCS/DGSCGC/DGT/2012/370 du 24 octobre 2012 précisant les actions à mettre en œuvre pour prévenir et faire face aux conséquences sanitaires propres à la période hivernale.

en extérieur ou dans un local ouvert exposant à des températures froides, ou utilisant un véhicule dans le cadre de leur activité professionnelle dans des conditions de verglas ou de neige.

En cas d'impact sanitaire, le préfet de département informe le Centre opérationnel de gestion interministérielle des crises (Cogic) *via* le portail de l'Organisation de la réponse de sécurité civile (Orsec), et les ARS informent le Centre opérationnel de réception et de régulation des urgences sanitaires et sociales (Corruss), les deux structures centrales, Cogic et Corruss, se tenant mutuellement informées.

Autres éléments complémentaires du dispositif de sécurité sanitaire

Établissement
de préparation et
de réponse aux
urgences sanitaires
(Eprus)

Créé par la loi n° 2007-294 du 5 mars 2007 relative à la préparation du système de santé à des menaces sanitaires de grande ampleur, l'Eprus a pour mission d'acquérir, fabriquer, importer, distribuer et exporter les produits et services nécessaires à la protection de la population face aux menaces sanitaires graves. L'Eprus agit sur demande du ministre de la Santé, pour lequel il exerce les fonctions d'opérateur logistique et de gestionnaire des stocks de produits de santé acquis par l'établissement ou confiés par l'État.

Plan
de continuité
d'activité (PCA)⁵¹

La gestion de la continuité d'activité est définie comme un « *processus de management holistique qui identifie les menaces potentielles pour une organisation, ainsi que les impacts que ces menaces, si elles se concrétisent, peuvent avoir sur les opérations liées à l'activité, et qui fournit un cadre pour construire la résilience de l'organisation, avec une capacité de réponse efficace préservant les intérêts de ses principales parties prenantes* ».

Le PCA représente l'ensemble des mesures visant à assurer, selon divers scénarios de crises, y compris face à des chocs extrêmes, le maintien, le cas échéant de façon temporaire selon un mode dégradé, des prestations de services ou d'autres tâches opérationnelles essentielles ou importantes, puis la reprise planifiée des activités.

Sites

Prévention des risques majeurs :

<http://www.risques.gouv.fr/risques-majeurs/comprendre-l'action-de-letat-et-de-ses-partenaires-1/que-fait-letat-face-aux-crisis>

Portail « Risques » de la Direction prévention des risques du ministère de l'Écologie : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Sites-Portail-Risques-.html>

Voir en particulier les sites ou plans suivants : Vigicrues, pluies extrêmes.

Planification et exercices de sécurité du ministère de l'Intérieur :

<http://www.interieur.gouv.fr/Le-ministere/Securite-civile/Documentation-technique/Planification-et-exercices-de-Securite-civile>

Observatoire national des risques naturels (ONRN) : <http://www.onrn.fr/site/>

51. http://www.sgdsn.gouv.fr/IMG/pdf/Guide_PCA_SGDSN_110613_normal.pdf (consulté le 07/07/2015)

Annexe 2 - Liste des figures et tableaux

Liste des figures

Figure 1	Voies par lesquelles le dérèglement climatique affecte la santé humaine	21
Figure 2	Les vingt thèmes du PNACC	26
Figure 3	Démarche MEDDE-Onerc d'adaptation au changement climatique	26
Figure 4	Évolution de la moyenne annuelle mondiale des températures depuis onze mille ans (de 9300 avant J.-C. à 2010)	27
Figure 5	Changement attendu des précipitations mondiales à l'horizon 2100 (en % par rapport aux moyennes 1986-2005)	29
Figure 6	Part du risque d'inondation sévère en Angleterre et au Pays de Galles, attribuable aux émissions de gaz à effet de serre anthropogéniques au XX ^e siècle	30
Figure 7	Élévation thermique océanique des trente dernières années à trois niveaux de profondeur marine	32
Figure 8a et 8b	Changement attendu du pH océanique à l'horizon 2100 selon le scénario retenu (8a) et en comparaison à la moyenne des années 1986-2005 (8b)	33
Figure 9	Élévation moyenne attendue du niveau des mers (en mètre) selon le type de scénario RCP	34
Figure 10	Caractéristiques du changement climatique aux horizons 2080 - 100000	34
Figure 11	Élévation depuis cinquante ans de la concentration mensuelle de CO ₂ dans l'air ambiant (et fluctuations saisonnières), mesurée au niveau de l'Institut Scripps d'océanographie de Mauna Loa	35
Figure 12	Émissions cumulées de CO ₂ de 1870 à 2010 (en milliards de tonnes, GT) et impacts sur les températures selon la quantité totale qui aura été émise	36
Figure 13	Températures annuelles du permafrost mesurées sur vingt sites du nord au sud de l'Alaska montrant une élévation de 1 à 2 °C en moyenne	37
Figure 14a	Scénarios radiatifs et simulations d'évolution du climat global	38
Figure 14b	Changement de température moyen annuel	39
Figure 15	Projections des changements pour les jours froids, les périodes les plus humides, les jours chauds et les précipitations intenses	40
Figure 16	Changements possibles de direction des événements tempétueux en Atlantique Nord et sur l'Europe de l'Ouest à l'horizon 2050-2100	42
Figure 17	Impact sur le réchauffement du climat des différents composants anthropiques rejetés dans l'atmosphère (forçage radiatif, en W/m ²)	46
Figure 18	Changements prévus des températures européennes hivernales (de décembre à février)	48
Figure 19	Changements prévus des températures européennes estivales (de juin à août)	49
Figure 20	Changements prévus des précipitations européennes d'octobre à mars (saison froide)	50
Figure 21	Changements prévus des précipitations européennes d'avril à septembre (saison chaude)	51
Figure 22	Cartographie type de l'interconnexion des risques	54
Figure 23	Cartographie simplifiée de l'interconnexion des risques	54

Figure 24	Impacts systémiques dans le cadre de changements globaux et boucles de rétroaction environnement-santé	55
Figure 25	Exemples de scénarios d'adaptation	55
Figure 26	Scénarios potentiels et effets de l'évaluation sur la mise en place d'un plan et sur la déclinaison de ses mesures	58
Figure 27	Développement de scénarios climatiques et économiques parallèles pour une étude plus rapide de leurs interactions	60
Figure 28	Relations entre phénotype et facteurs de santé : optimisations, vulnérabilités, contraintes croisées et synergie des risques	63
Figure 29	Évolution de 1985 à 2010 du nombre d'infections à <i>Vibrio</i> selon la température de surface en mer Baltique	71
Figure 30	Principales causes de décès dans le monde (en millions de décès)	77
Figure 31	Distribution européenne d' <i>Aedes albopictus</i> en 2011 et en 2015	83
Figure 32	Compatibilité climatique future (2030-2050) de l'extension européenne d' <i>Aedes albopictus</i>	84

Liste des tableaux

Tableau 1	Risques biologiques et médicaux liés aux changements climatiques selon leur origine	65
Tableau 2	Impacts planétaires de l'activité humaine et facteurs de vulnérabilité humaine liés à l'environnement	66
Tableau 3	Les cinq étapes de la transition épidémiologique par rapport aux maladies cardiovasculaires	78
Tableau 4	Évolution récente de l'incidence des principales maladies chroniques non transmissibles liées à l'âge en France	80

Glossaire

Ademe	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
Afsse	Agence française de sécurité sanitaire environnementale
AMO	oscillation atlantique multidécennale
ANR	Agence nationale de la recherche
ARS	agences régionales de santé
BRICS	Brésil, Russie, Inde, Chine et Afrique du Sud
CC	Changements climatiques
CCNUCC	Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques
CDC	<i>Centers for Disease Control and Prevention</i>
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
CépiDc	Centre d'épidémiologie sur les causes médicales de décès
Circ	Centre international de recherche sur le cancer
CMUC	Couverture maladie universelle complémentaire
Cnam	Conservatoire national des arts et métiers
CNTE	Conseil national de la transition écologique
CO	contrats d'objectif
Cogic	Centre opérationnel de gestion interministérielle des crises
Corruss	Centre opérationnel de réception et de régulation des urgences sanitaires et sociales
DGS	Direction générale de la santé
Dicrim	document d'information communal sur les risques majeurs
Drees	Direction de la recherche, des études, de l'évaluation et des statistiques
DUS	Département des urgences sanitaires
ECDC	Centre européen pour la prévention et le contrôle des maladies
Eprus	Etablissement de préparation et de réponses aux urgences sanitaires
ETH	École polytechnique fédérale de Zurich
Gerpa	Groupe d'études ressources prospectives
GES	gaz à effet de serre
GES	<i>Good Environmental Status</i>
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
HCSP	Haut Conseil de la santé publique
HEPA	<i>Health-enhancing physical activity</i>
ICSU	Conseil international pour la science
IGSM - MIT	<i>Integrated Global System Model - MIT (Massachusetts Institute of Technology)</i>
INCa	Institut national du cancer
Inpes	Institut national de prévention et d'éducation pour la santé
Inra	Institut national de la recherche agronomique
Inserm	Institut national de la santé et de la recherche médicale
INSIS	Institut national des sciences de l'ingénierie et des systèmes
InVS	Institut de veille sanitaire
IPBES	<i>Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services</i>
IPSL	Institut Pierre Simon Laplace des sciences de l'environnement
IRD	Institut de recherche pour le développement
Irdes	Institut de recherche et documentation en économie de la santé
Irnes	Institut de recherche biomédicale et d'épidémiologie du sport
IRSN	Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire

MEDDE	Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie
NAO	oscillation nord-atlantique
NRBC	nucléaires, radiologiques, biologiques et chimiques
NIEHS	<i>National Institute for Environmental Health Sciences</i>
OMM	Organisation météorologique mondiale
OMS	Organisation mondiale de la santé
Onerc	Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique
ONRN	Observatoire national des risques naturels
ONU	Organisation des Nations unies
OPECST	Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et techniques
Orsec	Organisation de la réponse de la sécurité civile
PCA	Plan de continuité d'activité
PCET	plans climat énergie territoriaux
PIB	produit intérieur brut
PNACC	Plan national d'adaptation au changement climatique
PNAPS	Plan national de prévention par l'activité physique et sportive
PNSE	Plans national santé environnement
PPI	plan particulier d'intervention
PPRN	plan de prévention des risques naturels
RSI	Règlement sanitaire international
SARM	<i>Staphylococcus aureus</i> résistant à la méthicilline
SCOT/PLU	schéma de cohérence territoriale / plan local d'urbanisme
SGDSN	Secrétariat général de la défense et de la sécurité nationale
SFLS	Société française de lutte contre le sida
SFSP	Société française de santé publique
SMIC	salaire minimum interprofessionnel de croissance
SRAS	syndrome respiratoire aigu sévère
SRCAE	schémas régionaux climat air énergie
SWOT	<i>Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats</i>
WBG	<i>Wet Bulb Globe Temperature</i> (indice de température au thermomètre-globe mouillé)

T A B L E D E S M A T I È R E S

Sommaire	7
Saisine	9
Composition du groupe de travail et remerciements	11
Synthèse et recommandations	13
Introduction	17

Chapitre I

Contexte	25	Le PNACC, Plan national d'adaptation au changement climatique	25
		Changement climatique : observations et projections	27
		– Influence des activités humaines sur le système climatique	28
		– Changements observés en France	28
		– Simulations du climat futur à l'échelle globale	31
		• Variabilités des températures océaniques et des précipitations	32
		• Niveau des mers	33
		• Le CO ₂ , principal gaz à effet de serre	35
		• Le méthane (CH ₄)	36
		– Conséquences de l'évolution des risques climatiques en France	41
		• Simulations d'évolution du climat pour la France	41
		• Conséquences à diverses échelles spatiales	42
		• Impacts majeurs attendus	43
		• Risques spécifiques aux régions côtières et aux régions de montagne	44
		– Bénéfices et risques des stratégies d'atténuation et d'adaptation	46
		– Projections régionales	47

Chapitre II

Bascules	53	Objectifs d'étude	53
et désadaptations	53	Éléments de méthodologie	53
		– Systèmes complexes non linéaires	53
		– Interactions, interdépendances et synergies	53
		– Approche systémique	56
		– Nomenclatures spatiale et temporelle	56
		– Identification des déterminants et de leurs interactions	57
		• Approches des experts, SWOFT et scénarios	57
		– Définition de scénarios	58
		– Perspectives	60
		• Approches discrètes et continues	61
		• Définition du domaine spatial	61
		• Adaptation et interactions	61
		Vulnérabilités	61
		– <i>Optima</i> des capacités et caractère multidimensionnel des vulnérabilités	61
		– Catégories de risques sanitaires liés aux changements climatiques	64
		– Limites et facteurs de vulnérabilité liés à l'environnement	64
		– Facteurs de vulnérabilité des populations	64
		– Globalisation et limites d'adaptation	67
		– Risques émergents	69
		• Rayonnement solaire	69
		• Pollutions atmosphériques	69

• Allergènes	70
• Risques toxiques	70
• Pathogènes	70
• Rendements agricoles et ressources halieutiques	71

Chapitre III

Épidémiologie et indicateurs nouveaux 73

Fluctuations saisonnières de la morbi-mortalité	73
– Mortalité hivernale	74
– Mortalité estivale	74
• Les vagues de chaleur	74
• Mesures préventives	75
Un nouveau paysage médical	76
– Les deux transitions épidémiologiques récentes	76
Maladies émergentes	79
– Maladies liées à l'âge	79
– Cancers	81
– Maladies infectieuses émergentes	82

Chapitre IV

Analyse des effets par domaine 85

Cadre	86
Évaluation des effets sanitaires des actions du PNACC	87
Analyse des actions et mesures du PNACC	88
– 1. Agriculture, aquaculture	88
– 2. Énergie, industrie et transports	91
– 3. Urbanisme et tourisme	92
– 4. Ressources en eau	93
– 5. Biodiversité	95
– 6. Forêt	97
– 7. Risques naturels	98
– 8. Littoral et montagne	100
– 9. Information	101
– 10. Éducation, formation	102
– 11. Recherche	102
– 12. Financement et assurance	104
– 13. Santé	104
– 14. Gouvernance, actions transversales et internationales	105

Chapitre V

Recommandations et arguments 107

Gouvernance et interdisciplinarité	107
Territorialité	108
Veille et communication	109
Recherche	109

Conclusion	111
-------------------	------------

Références bibliographiques	113
Pour en savoir plus : autres références	122

Annexes

Annexe 1 - Plans de réponse aux situations d'urgence	125
Annexe 2 - Liste des figures et tableaux	130
Glossaire	132

Réalisation graphique F et Véga
Photo de couverture : Gustave Doré, *Le paradis perdu* de John Milton - © Blue Lantern Studio/Corbis
Photo page 30 : iStock / Inondation en Grande-Bretagne © Onflim
Corrections : Anne Beaumont
Imprimé en France
Direction de l'information légale et administrative
26, rue Desaix, 75727 PARIS, Cedex 15

Impacts sanitaires de la stratégie d'adaptation **au changement climatique**

Le changement climatique a des impacts directs sur notre santé. Au-delà d'une température extérieure optimale comprise entre 20 et 25 °C, la morbi-mortalité augmente partout en France. Cela concerne particulièrement les populations vulnérables, sujets précaires ou personnes âgées, durant les phénomènes climatiques extrêmes, dont les vagues de chaleur sont parmi les plus marquants. Le nombre de régions affectées par les sécheresses augmente, la hausse des températures s'accompagne aussi d'un risque accru d'incendie et d'un déplacement des vecteurs pathogènes. Or le changement climatique a aussi des effets sanitaires indirects, en modifiant la biodiversité, la végétation ou la production agricole. Les récentes canicules en France, en Russie ou aux États-Unis ont à chaque fois entraîné une chute importante des productions céréalières, provoquant de sérieux problèmes d'approvisionnement et de fortes hausses des cours mondiaux.

Afin de nous préparer à ces bouleversements et d'atténuer les effets du changement climatique, la réflexion doit intégrer deux paramètres : le long terme et la complexité. Il est essentiel désormais d'interpréter les interactions climat-énergie-économie-biodiversité-santé dans le cadre d'une écologie globale de la santé afin de mieux anticiper nos marges d'adaptation en situation de contraintes croissantes. L'enjeu est clair : si les températures de surface augmentent de 4 à 6 °C d'ici à la fin du siècle, il se peut que l'enchaînement des événements ne soit plus contrôlable.

Diffusion

Direction de l'information légale et administrative

La Documentation française

Tél.: 01 40 15 70 10 - www.ladocumentationfrancaise.fr

Imprimé en France

Prix : 14 €

DF : 5HC40270

ISBN : 9782110101082

