

**Les effets qualitatifs du changement climatique sur la santé
en France**

Rapport de groupe interministériel

Ministère de la Santé, de la Jeunesse, des Sports et de la Vie associative

Et

Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable
et de l'Aménagement du Territoire

Coordination : Monique Delavière (DGS) et Jean-François Guégan (IRD/EHESP et HCSP)

Avril 2008

Avant Propos

Le MEDAD a actualisé le plan climat en novembre 2006. Celui-ci prévoit une évaluation des impacts du changement climatique sur sept thèmes qui sont respectivement Santé, Agriculture/forêts/ressources en eau et pêche, Risques naturels et assurances, Énergie, Urbanisme/cadre bâti/infrastructures de transport, Tourisme, Approche transversale et territoriale.

Un groupe plénier interministériel « Impacts du changement climatique, adaptation et coûts associés en France » co-présidé par le MEDAD et l'Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (ONERC) a été constitué en 2007. La DGS (Direction Générale de la santé) a été chargée d'animer les travaux concernant l'impact du changement climatique sur la santé. A ce titre, Monique Delavière, ingénieur général de génie sanitaire, chargée de mission à la DGS et Jean-François Guégan, membre du HCSP, directeur de recherche en écologie des maladies infectieuses à l'IRD de Montpellier et professeur associé à l'EHESP, ont co-présidé un groupe de travail associant Météo France, la DHOS, la DSS, la DGAS, l'Afssa, l'Afset et l'InVS.

Le document a été réalisé avec des contraintes de temps fortes, lesquelles n'ont pas permis d'avoir la contribution de certains experts. **Il s'agit donc d'un document préliminaire qui se limite volontairement à décrire ici les effets directs, probables ou attendus, du changement climatique sur la santé de la population française.** Élaboré sur la base des modifications climatiques définies en concertation avec Météo-France, et valable pour le territoire national, ce rapport aborde point par point les conséquences sanitaires possibles ou imaginables, tout en soulignant les grandes incertitudes cognitives, techniques et organisationnelles qui demeurent sur le sujet.

Toutefois il vise à donner une base générale des effets possibles du changement climatique sur la santé sans chercher l'exhaustivité, dans un contexte de données sur les modifications climatiques pour la France qui restent à mieux connaître en termes d'amplitude et d'occurrence pour certains aléas mentionnés. Ce rapport doit aussi être consulté en complément d'une lecture du document de l'ONERC sur le même sujet publié en 2007.

Il faut aussi souligner l'objectif de ce document, qui est de décrire les effets probables attendus du changement climatique sur la santé sans le désir de les hiérarchiser, compte tenu des imprécisions subsistant sur les modifications climatiques elles-mêmes indiquées ci-avant.

Ce premier rapport de rédaction collégiale laisse la porte à la réalisation ultérieure de rédactions spécialisées.

Les membres du groupe de travail interministériel (Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du Territoire et du Ministère de la Santé, de la Jeunesse, des Sports et de la Vie associative) ayant participé aux réunions sont :

Nom Prénom	Organisme	Réunion 28/11/2007	Réunion 11/02/2008	Réunion 15/04/2008	Réunion 30/04/2008
Bitar Dounia	InVS/DMI	X	X		
Bonnet Christelle	DGUHC	X			
Boudot Jocelyne	MSJSVA/DGS/SDEA	X	X		
Che Didier	InVS/DMI				X
Cohen Jean-Claude	Météo France	X	X		
Darde Catherine	MSJSVA/DHOS	X			
Delavière Monique	MSJSVA/DGS/SDEA	X	X	X	X
Favrot Marie-Christine	Afssa/DERNS	X			
Février Evelyne	MEEDAT/D4E	X	X		X

Gillet Marc	ONERC	X			
Guégan Jean-François	IRD/EHESP et HCSP	X	X	X	X
Jourdain Frédéric	MSJSVA/DGS/SDPRI	X			X
Larcher Pierre	DGAS	X	X	X	X
Lasfargues Gérard	Afsset		X	X	
La Vieille Sébastien	Afssa/DERNS		X	X	X
Le Saout Ronan	MEEDAT/D4E	X			
Masson Nolwenn	MSJSVA/DGS/SDEA		X		
Nguyen Sylvie	MSJSVA/DGS/SDEA		X		
Nicklaus Doris	MEEDAT/D4E		X		
Pavillon Christelle	DSS	X			
Pascal Mathilde	INVS/DSE	X			
Pradel Perle	MSJSVA/DGS/SDEA			X	
Quiquely Nathalie	DSS/5D		X		
Roger Sylviane	DGAS	X			
Russo Lisa	Ecofys		X	X	
Salomon Valérie	MSJSVA/DHOS/E2		X		
Saout Charles	MSJSVA/DGS/SDEA		X		
Thieriet Nathalie	Afsset				X
Thuret Anne	Afsset		X		
Vaiss Pierre	MEEDAT/D4E	X			

Une liste des principaux acronymes et sigles utilisés figure à la fin de ce rapport.

Les co-rédacteurs sont :

Armengaud Alexis, Cire Sud
Dounia Bitar, InVS, DMI
Camille Février, MSJSV, DGS, SDEA ;
Jean-Claude Cohen, Météo France
Sébastien La Vieille, Afssa, DERNS ;
Nolween Masson, MSJSV, DGS, SDEA ;
Pascale Panetier, Afssa, DERNS ;
Mathilde Pascal, InVS, DSE
Valérie Pernelet-Joly, Afsset, DE en Santé-Environnement-Travail ;
Charles Saout, MSJSV, DGS, SDEA ;
Nathalie Thieriet, Afsset, DE en Santé-Environnement-Travail ;
Sylvie Zini, Afsset, DE en Santé-Environnement-Travail.

Table des matières

1. Le changement climatique en France	5
2. Effets qualitatifs du changement climatique sur la santé	7
2.1. <i>Introduction</i>	7
2.2. <i>Des journées et nuits chaudes plus fréquentes, des journées et des nuits froides plus chaudes et en diminution</i>	8
2.2.1. Augmentation de la température de cours d'eau et des lacs	8
2.2.2. Augmentation de la température de la surface de la mer	9
2.2.3. Augmentation de l'ensoleillement estival	10
2.2.4. Réduction de la durée d'enneigement	11
2.2.5. Hiver doux et printemps précoce	11
2.2.6. Diminution des gelées et de la survenue des vagues de froid	13
2.2.7. Vents faibles ou nuls sur de longues périodes	14
2.2.8. Climat plus doux, hivers plus humides et activités microbiennes et vecteurs	14
2.2.9. Acidification des mers	16
2.3. <i>Vagues de chaleur et sécheresse</i>	16
2.3.1. Sécheresse de la végétation	17
2.3.2. Feu de forêt	17
2.3.3. Assèchement de mares ou de cours d'eau	18
2.3.4. Baisse du niveau des rivières	18
2.3.5. Diminution du niveau des nappes phréatiques	19
2.3.6. Mouvement du sol (argiles gonflantes)	20
2.3.7. Vagues de chaleur	20
2.3.8. Vague de chaleur et effets directs ou indirects sur les activités microbiennes	21
2.3.9. Vague de chaleur et diminution de la qualité de l'air	21
2.4. <i>Évènements de fortes précipitations</i>	22
2.4.1. Inondations	22
2.4.2. Coulée de boue, glissement de terrain	25
2.4.3. Humidité et chaleur	25
2.5. <i>Augmentation de l'activité des tempêtes et cyclones (Outre Mer)</i>	26
2.6. <i>Augmentation de la fréquence d'élévation du niveau de la mer</i>	27
3. Retours d'expérience et d'observation	28
3.1. <i>La vague de chaleur de 2003</i>	28
3.1.1. Mortalité	28
3.1.2. Facteurs de risque	29
3.1.3. Interactions température / pollution atmosphérique	29
3.1.4. Plan National Canicule	29
3.2. <i>La vague de chaleur de 2006</i>	29
4. Conclusion et synthèse	31
Liste des acronymes et sigles	34
Annexe 1 : Démarche concernant l'évaluation des impacts du changement climatique sur la santé	35
Annexe 2 : Références bibliographiques	37

1. Le changement climatique en France

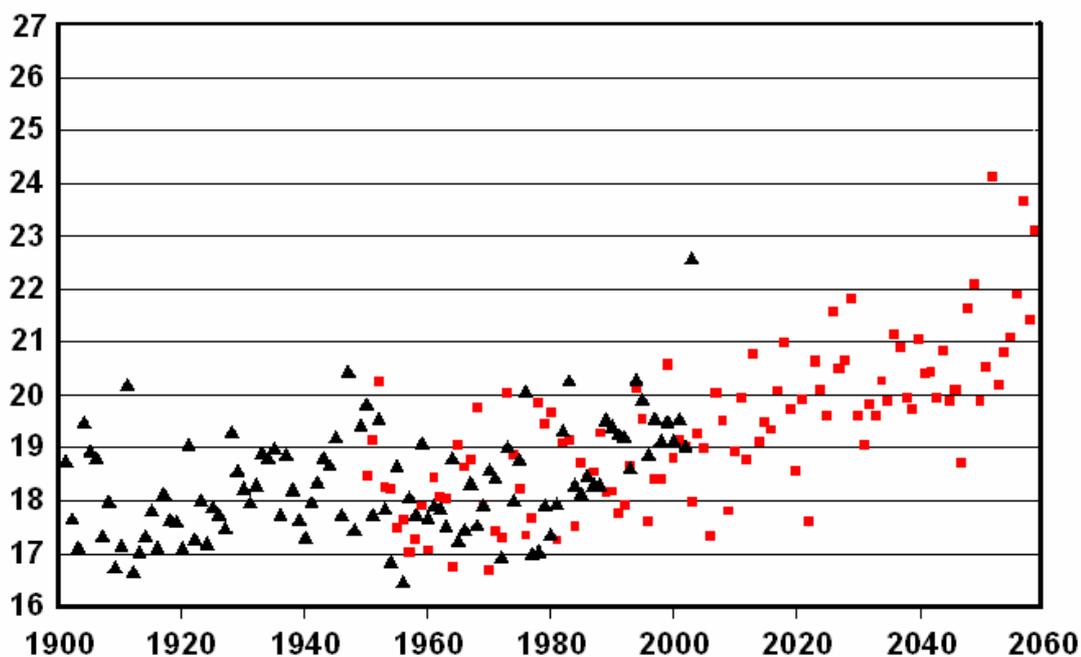
L'observation des changements climatiques en France tire parti de l'existence d'un réseau relativement dense d'observations couvrant l'ensemble de la métropole depuis la fin du XIX^{ème} siècle (environ 70 pour la température et 300 pour les précipitations). Ces données, après un travail nécessaire d'homogénéisation¹, montrent qu'au cours du siècle dernier, la France s'est réchauffée d'environ 1°C, et que, dans la plupart des régions, les précipitations ont augmenté en hiver et diminué en été. Le réchauffement s'est accentué au cours des 30 dernières années avec un rythme de 0,55°C par décennie. Une analyse de séries quotidiennes montre aussi une augmentation du nombre de jours de vagues de chaleur et une diminution du nombre de jours de froid et de gel au cours des cinquante dernières années. La durée des épisodes pluvieux a aussi augmenté sauf en été, alors que dans le même temps, nous constatons une augmentation de la durée des sécheresses estivales. Il n'est pas actuellement possible d'attribuer ces évolutions encore faibles à l'effet de serre additionnel lié aux activités humaines. Quelques études récentes montrent cependant la présence d'un signal anthropique sur certains paramètres climatiques moyens mesurés en France métropolitaine comme les températures nocturnes estivales.

Les projections sur le climat futur en France vers 2050 peuvent être estimées à partir de simulations de modèles climatiques dont le maillage est de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres. Mais la précision de ces simulations ne se situe évidemment pas à cette échelle, compte tenu de l'importante variabilité que connaît le climat, en particulier sur l'Europe de l'Ouest. La variabilité des régimes de temps, difficile à estimer avec précision, introduit en effet un facteur d'incertitude important dans les simulations. De plus, les modèles climatiques eux-mêmes ne font que reproduire imparfaitement la réalité, ajoutant un facteur d'incertitude tout aussi important. Les scénarii de concentration de gaz à effet de serre ont un impact moins marqué sur l'incertitude, leurs différences se faisant surtout sentir à partir de la deuxième moitié du XXI^{ème} siècle.

Malgré ces incertitudes, nous pouvons affirmer que c'est à une accentuation de la plupart des tendances déjà observées qu'on devrait avoir à faire face à l'horizon 2050. Les simulations du climat futur nous montrent en effet qu'il est extrêmement probable² que la France de 2050 soit plus chaude (d'environ 2°C) et connaisse des hivers plus pluvieux et des étés plus secs. L'augmentation des pluies hivernales ne compensant pas la baisse aux autres saisons, on devrait aussi subir une baisse des ressources en eau par rapport à ce que nous connaissons aujourd'hui. Il est très probable que le nombre de jours de forte chaleur augmente, d'un facteur qui pourrait être de 4 à 6 selon certains scénarii climatiques. On s'attend à une augmentation très probable de la durée des sécheresses estivales, plus marquée dans la partie sud du pays, mais aussi à une augmentation probable du nombre de jours consécutifs de fortes pluies en hiver dans la plupart des régions. La diminution déjà constatée du nombre de jours de gel et de neige en plaine devrait également s'accroître en moyenne. En revanche, de même que nous ne notons pas de tendance significative sur la fréquence et l'intensité des tempêtes des cinquante dernières années, les simulations climatiques ne montrent pas d'évolution marquée de la fréquence des vents forts en liaison avec les émissions anthropiques.

¹ Traitement statistique destiné à corriger les ruptures d'homogénéité des séries dues à des changements de localisation des stations de mesure, à des changements de capteurs, ...

² Dans ce texte, en conformité avec le rapport du GIEC, on a utilisé les termes suivants pour désigner la vraisemblance d'une conclusion ou d'un résultat : *Pratiquement certain* : probabilité > 99 %, *Extrêmement probable* : >95 %, *Très probable* : >90 %, *Probable* : >66 %, *Plus probable que non* : >50 %, *Peu probable* : <33 %, *Très peu probable* : <10 %, *Extrêmement peu probable* : < 5 %.



Températures moyennes estivales de la France métropolitaine observées (triangles noirs) et simulées (carrés rouges).

Le modèle climatique ne reproduit pas la chronologie des étés observés mais reproduit un climat qui, en moyenne et en variabilité, est bien conforme aux observations sur la période récente. On observe que, suivant cette simulation (scénario A1B³ du GIEC), si la tendance au réchauffement est marquée autour de 2050 avec des températures dépassant parfois celles de l'été 2003, certains étés peuvent être nettement plus frais que la moyenne.

³ Le scénario A1B du GIEC est un des scénarii de référence utilisé pour simuler le réchauffement climatique. Selon ce scénario, on assiste à une élévation de température de 1,6 à 4,4°C selon les modèles. Ce scénario considère l'existence future d'un équilibre entre toutes les sources d'énergie ; la notion d'équilibre fait référence à une situation où la population humaine ne recourt pas de façon excessive à une source d'énergie particulière, en admettant que toutes les technologies propres à l'approvisionnement énergétique et à l'utilisation finale se perfectionnent à un rythme similaire

2. Effets qualitatifs du changement climatique sur la santé

2.1. Introduction

Le réchauffement climatique est déjà en cours selon les experts du GIEC (Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat), et son impact sur la santé est une des nouvelles priorités du conseil exécutif de l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé). Une résolution spécifique a ainsi été adoptée en janvier 2008.

Ce sont surtout les dérèglements météorologiques majeurs récents (canicules et cyclones) qui sont en France (métropolitaine et d'Outre-Mer, respectivement) les événements les plus marquants du changement climatique pour les médias. Chacun des aléas climatiques a, ou aura, un potentiel d'effets négatifs sur la santé comme l'indiquent les CDC (Centers for Disease Control and Prevention, organisme fédéral américain). Cependant, ses effets sur la santé seront à la fois très hétérogènes selon les régions et les phénomènes climatiques, mais aussi complexes à identifier car intervenant à des niveaux d'échelles de temps et d'espace variés.

Le changement climatique peut être une source de dangers du fait d'une modification des milieux directement (eau, air, sol) ou indirectement par inondations et/ou pollutions (sols, sédiments). Ceux-ci pourront être une source de dégradation potentielle plus ou moins forte de la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine et aux loisirs, des aliments, de la qualité de l'air (ozone, particules en suspension, pollens,...), des conditions de vie (température, pluviométrie, ultra-violets,...) et de la qualité de l'habitat. La sélection des lieux à construire en fonction de leur vulnérabilité aux risques d'inondations et de crues, ainsi que l'importance de la densification des villes, source d'un nombre accru de populations exposées à un même aléa (îlots de chaleur, débordements de réseaux d'eaux usées,...) deviendront des paramètres obligatoires à considérer dans le génie civil et urbain du XXI^{ème} siècle et la planification du territoire national. Bien que la mondialisation de l'économie et des transports contribue fortement à la dissémination à large échelle d'espèces de vecteurs et d'agents infectieux, le changement climatique interférera aussi en engendrant des conditions environnementales favorables à leur installation et à leur développement. Des modifications importantes seront aussi à attendre dans l'activité microbienne des écosystèmes aquatiques et telluriques en perturbant le fonctionnement des cycles biogéochimiques.

Des effets connexes conjoncturels, comme le vieillissement de la population, la montée de la précarité et l'affaiblissement de l'économie risquent d'avoir un rôle amplificateur sur la santé de la population en s'ajoutant aux effets du changement climatique.

D'autres effets collatéraux, comme une plus ou moins grande offre de soins locale, selon les régions sur le territoire national, pourront constituer soit un facteur favorable soit un facteur défavorable au suivi des pathologies associées à certains aléas climatiques. On peut citer par exemple le besoin d'ophtalmologistes pour la cataracte et la DMLA (dégénérescence maculaire liée à l'âge) associées à une plus longue exposition aux rayons ultra-violets, et de psychologues et psychiatres pour les états de stress post aléas exceptionnels (inondations). Par ailleurs, les établissements de santé et médico-sociaux seront exposés eux aussi aux aléas climatiques extrêmes (inondations, tempêtes) provoquant dans certains cas le déplacement de personnes (ex : personnes âgées en maison de retraite). Enfin un comportement spontané de déplacement de la population de zones à risques vers des zones moins exposées n'est pas à exclure à la fois au sein de la Métropole (des zones méditerranéennes vers les zones océaniques) mais aussi dans nos Communautés et Régions d'Outre-Mer (des zones sous influence des cyclones vers les zones abritées, par exemple). De tels déplacements pourront avoir un impact favorable sur la santé, bien qu'il soit difficile d'en faire l'évaluation, mais ils auront des conséquences économiques et sociales dont nous ne mesurons pas encore les limites. De même des comportements individuels dans la vie quotidienne (loisirs à l'extérieur et exposition aux ultra-violets ou aux coups de chaleur,...) pourront être modifiés, conduisant à une sous-estimation de leur coût public.

Les effets du changement climatique sur la santé dépendent de multiples facteurs de risque, interagissant le plus souvent entre eux dans des enchaînements de cause à effet, rendant donc complexes leur analyse et leur prévision.

2.2. Des journées et nuits chaudes plus fréquentes, des journées et des nuits froides plus chaudes et en diminution

2.2.1. Augmentation de la température de cours d'eau et des lacs

Les agents causatifs de maladies humaines et/ou leurs espèces vectrices et/ou réservoirs sont extrêmement sensibles à la température, et leur cycle de vie intervient dans une gamme optimale de température. Par exemple, la transmission du paludisme en Afrique dépend étroitement de la température des écosystèmes aquatiques autour de 22°C, avec un optimum de précipitation mensuelle de 80mm, car en deçà et au-delà de ces valeurs, les développements conjoints du parasite et des larves de moustiques en adultes sont moins ou non efficaces dans la transmission (Craig *et al.*, 1999 ; Small *et al.*, 2003). La transmission du virus de la dengue et du protozoaire responsable du paludisme dans les COM-ROM intervient aussi sur des modalités identiques. Cette interdépendance entre le développement des insectes vecteurs et les agents microbiens ou parasitaires qu'ils véhiculent en fonction notamment de la température environnementale peut être généralisée à d'autres maladies que la dengue et le paludisme.

Il se pourrait aussi qu'avec l'augmentation de la température des écosystèmes aquatiques certaines bactéries utilisent des mécanismes d'adaptation leur permettant de sélectionner des formes résistantes à ces nouvelles conditions d'habitats, et consécutivement deviennent plus pathogènes pour les individus qui les contractent. Selon la classification de vraisemblance de l'événement que nous adoptons dans ce rapport, il s'agit donc d'un événement probable. A titre d'exemple, la bactérie du genre *Leptospira*, agent infectieux responsable de la leptospirose, vit essentiellement parmi les rongeurs mais également dans les zones où il y a de l'humidité et de l'eau. Cette bactérie possède des mécanismes d'adaptation à l'hôte et un degré de pathogénicité associé à une augmentation de la température environnante (Matsunaga *et al.*, 2007).

En matière d'assainissement, les impacts peuvent par exemple concerner la prolifération d'amibes (*Naegleria* spp. dont l'espèce *N. fowleri*), par exemple dans les rejets des centrales nucléaires de production d'énergie (CNPE) (température de l'eau notamment au-delà de 32°C). Le respect des valeurs de rejets en amibes pourrait dans certaines conditions conduire à l'arrêt de certaines centrales et avoir des conséquences sur la production d'électricité (11 CNPE sont équipées de circuits de refroidissement semi-fermés de façon à limiter les rejets thermiques en rivière (i) sur la Loire : Belleville, Dampierre, Saint-Laurent et Chinon, en amont de la Vienne ; (ii) sur le Rhône : Bugey et Cruas ; (iii) sur la Seine : Nogent ; (iv) sur la Meuse : Chooz ; (v) sur la Moselle : Cattenom ; (vi) sur la Vienne : Civaux ; (vii) sur la Garonne : Golfech).

Afin de prévenir les risques sanitaires potentiels liés à une élévation de la température, il est donc nécessaire de renforcer le contrôle sanitaire de la qualité des rejets et des eaux situées en aval des points de rejets des effluents liquides des CNPE, notamment dans les circonstances suivantes :

- utilisation d'eau brute superficielle pour la production d'eau destinée à la consommation humaine ;
- fréquentation des zones de baignades et d'activités de loisirs nautiques ;
- (scénario à étudier à titre d'exemple : en quoi les rejets de la centrale nucléaire de Nogent-sur-Seine impactent-ils les prises d'eau de la région parisienne situées à l'aval en fonction de divers scénarii de débit de Seine, au-delà des étiages les plus sévères actuellement connus et qui s'accroîtraient, notamment vis-à-vis de différents paramètres physico-chimiques dans les eaux ?).

Le problème des pullulations de cyanobactéries dans certains plans d'eau en France est l'objet d'une surveillance étroite depuis déjà plusieurs années, en particulier en Bretagne. Les proliférations de certaines espèces d'algues peuvent avoir des conséquences sanitaires par l'intermédiaire de cyanotoxines qu'elles peuvent libérer dans le milieu aquatique, pouvant entraîner

des effets directs cutanés auprès des baigneurs, mais surtout des conséquences en cas de consommation d'eau voire d'aliments contaminés (les poissons planctonophages et leurs produits dérivés). Il convient en cas d'épisodes de fleurs d'eau et de blooms algaux de renforcer la fréquence de dépistage et de diagnostic des cyanobactéries dans les eaux douces et dans les eaux saumâtres en particulier.

Une augmentation de la température de l'eau froide dans les réseaux intérieurs d'immeubles est propice, notamment au-delà de 25°C, à la prolifération des bactéries du genre *Legionella* (Hoebe *et al.*, 1998 ; Santé Canada, 2006).

Dans l'ensemble, nous manquons aujourd'hui de connaissances sur les effets directs ou indirects d'une élévation de la température des écosystèmes aquatiques d'eau douce sur la survie et la viabilité des bactéries, virus et parasites pathogènes en interaction avec celles de leurs vecteurs et/ou réservoirs lorsque c'est le cas ! Le développement possible du paludisme et du virus du Chikungunya en France, notamment méditerranéenne, est aujourd'hui très discuté, et une augmentation de la température des écosystèmes aquatiques pourrait être favorable à une plus forte production de larves de moustiques, vecteurs potentiels de ces deux pathologies. Cette élévation de température aurait aussi des répercussions importantes sur le cycle de transformation ou de reproduction des agents pathogènes et parasitaires eux-mêmes. Si une augmentation de la température peut être un facteur à prendre en considération, d'autres raisons à l'apparition du paludisme et du Chikungunya en France sont aussi très probables (introduction accidentelle des vecteurs compétents, autres espèces vectrices locales méconnues ou sous-estimées, synergie entre facteurs,...) (voir Angelini *et al.*, 2007 pour l'introduction du Chikungunya en Italie).

2.2.2. Augmentation de la température de la surface de la mer

Une augmentation de la température moyenne de la mer peut entraîner une recrudescence de bactéries et de virus aquatiques notamment fréquentant les habitats de zones côtières (Janda *et al.*, 1988). Les bactéries du genre *Vibrio* spp., responsables de gastro-entérites, de septicémies primaires et d'infections chez l'Homme et l'animal, peuvent se développer à la faveur d'une augmentation de 1° à 2°C de température (événement probable à très probable). Depuis 1997, la région du nord-ouest du Pacifique (USA et Canada), mais aussi du nord-est des Etats-Unis, a régulièrement connu des pics ou des éclosions d'infections à *V. parahaemolyticus* pendant la période estivale (McLaughlin *et al.*, 2005). En Afrique, l'augmentation moyenne de la température de surface de l'Océan atlantique coïncide avec une recrudescence de cas de choléra dans les populations humaines côtières du Golfe de Guinée par des liens indirects dus à la nature aquatique de la bactérie causative (de Magny *et al.*, 2007). Pour l'Europe, une augmentation de la température de l'eau de surface en mer du Nord et en mer Baltique l'été 2006 a conduit à un nombre relativement élevé d'infections à *Vibrio* pendant cette période alors que celles-ci sont habituellement rarissimes à de telles latitudes, laissant imaginer l'existence d'une relation directe entre élévation de la température environnementale et recrudescence de cas, sans que cela ait été formellement démontré. Ainsi une augmentation de la température pourrait conduire à une présence plus fréquente de bactéries *Vibrio* spp dans les eaux littorales française, et donc entraîner un risque accru de contamination des produits de la mer principalement (Lemoine *et al.*, 1999).

Certains types d'algues, d'origine phytoplanctonique, pouvant être apportées par des transports maritimes (ballasts), sont susceptibles de proliférer dans les eaux côtières françaises, notamment lorsque l'environnement leur est favorable (facteurs nutritifs issus de divers rejets, par exemple). Une augmentation de la température de l'eau peut favoriser l'accélération de leur prolifération, mais cet effet doit être à l'avenir mieux quantifié (effet probable).

Certaines algues de phytoplancton, comme le *Dinophysis*, l'*Alexandrium* ou le *Pseudonitschia* produisent des toxines (phycotoxines marines) qui sont accumulées par les coquillages. Ces produits de la mer sont des aliments très vulnérables, car ils filtrent l'eau et en concentrent les contaminants. La consommation des coquillages récoltés en période d'efflorescence d'algues toxiques peut être dangereuse pour la santé (effets diarrhéiques, paralytiques ou amnésiques). Une élévation de la température des eaux pourrait conduire à une modification possible à très

probable de l'aire de répartition de certaines micro-algues ou de la fréquence des efflorescences toxiques (Graneli *et al.*, 2007).

On peut citer l'exemple de l'algue microscopique unicellulaire, *Ostreopsis ovata* (groupe des Dinoflagellés) qui produit une toxine, la palytoxine. Cette algue vit habituellement dans les eaux chaudes des mers tropicales, mais elle a été signalée à plusieurs reprises sur les côtes génoises en Italie, causant l'intoxication de près de 200 personnes et conduisant à une vingtaine d'hospitalisations en juillet 2005. Ces personnes n'avaient pas été obligatoirement en contact direct avec l'eau. L'inhalation de gouttelettes transportées par le vent, et contenant des molécules de la toxine, aurait suffi pour que les symptômes se manifestent. Le dispositif de surveillance préventive (environnementale et épidémiologique) mis en place sur la côte Ligure en été 2006 a permis d'éviter une nouvelle épidémie en limitant le nombre de cas à une vingtaine de personnes. Lorsque la concentration dans l'eau de mer d'*Ostreopsis ovata* est importante, l'inhalation d'aérosols marins contaminés (exposition par voie respiratoire) peut provoquer des effets sanitaires tels que des rhumes, des toux, de la fièvre, des difficultés respiratoires et des irritations de la bouche, de la gorge et des yeux. Ces signes qui apparaissent 2 à 6 heures après l'exposition par des aérosols marins se résorbent généralement en 24 à 48 heures après leur apparition. Des éruptions cutanées (rougeurs et démangeaisons), qui surviennent rapidement après contact direct de la peau avec de l'eau de mer contaminée, ont également été observées. Dans les pays tropicaux, des intoxications alimentaires par des coquillages ou des poissons contaminés par la palytoxine d'*Ostreopsis ovata* (exposition par voie orale) ont aussi été observées. En Méditerranée, sous nos latitudes, aucune intoxication alimentaire par la palytoxine issue de produits de la mer n'a cependant été observée à ce jour.

En France, début août 2006, plusieurs personnes fréquentant la calanque du Morgiret (îles du Frioul au large de Marseille) ont présenté des symptômes irritatifs au niveau de la bouche et de la gorge, avec ou sans fièvre. La détection de cas groupés a conduit à la réalisation de prélèvements d'eau de mer et d'algues analysés par le laboratoire d'Ifremer de Toulon la Seyne. La présence de l'algue *Ostreopsis ovata*, à des concentrations élevées, a été détectée. Une interdiction de baignade et de consommation des produits locaux de la mer a été rapidement mise en œuvre dans cette zone. La surveillance environnementale a montré un retour à une situation normale fin août, conduisant à lever les mesures d'interdiction qui avaient été prises.

Toutes ces descriptions doivent être aujourd'hui mieux quantifiées par des spécialistes des sujets évoqués (algologues, microbiologistes des centres nationaux de référence de pathologies, pathologistes, cliniciens, ...).

2.2.3. Augmentation de l'ensoleillement estival

L'augmentation de l'ensoleillement estival devrait inciter la population à rester plus longtemps à l'extérieur et, par ce fait, celle-ci devrait être directement plus exposée aux rayonnements solaires. Concernant l'action cancérigène des UV-B, elle est connue depuis longtemps. On a considéré par contre que les UV-A ne présentaient aucun danger pour la santé et pouvaient donc être utilisés pour favoriser le bronzage. On sait depuis moins de 10 ans que les UV-A peuvent être aussi mutagènes que les UV-B pour les cellules de la peau humaine, bien que leur mode d'action soit différent. Aujourd'hui, on estime à environ 80000 chaque année le nombre de cancers cutanés non mélanocytaires en France, total probablement sensiblement sous-estimé en raison d'une sous-déclaration manifeste, et qui pourraient être dus en partie aux actions du rayonnement ultra-violet. En Europe, on prévoit dans les prochaines années une augmentation de 22% du nombre des cancers cutanés non-mélanocytaires chez les sujets âgés de plus de 65 ans, et de 50% chez ceux de plus de 80 ans. En ce qui concerne les mélanomes cutanés, une étude de l'InVS a estimé en 2000 à plus de 7200 le nombre de nouveaux cas de mélanome cutanés apparus en France, dont 42% chez l'homme et 58% chez la femme. En France, entre 1978 et 2000, l'incidence a augmenté chez l'homme de 5,9% par an et la mortalité de 2,9% par an. Chez la femme, l'augmentation de l'incidence sur cette période est de 4,3% par an et la mortalité de 2,2% par an. Les ultraviolets présentent d'autres effets tels que le vieillissement cutané, les photodermatoses, ainsi que des effets sur l'œil (cataracte, DMLA, etc...).

Par ailleurs la diminution de la couche d'ozone a des effets directs sur le rayonnement UV, et deux facteurs permettent d'évaluer les effets de la diminution de la couche d'ozone sur la santé :

- Le facteur d'amplification de radiation (FAR) permet de connaître l'augmentation de l'intensité UV qui résulte, ou résulterait, d'une diminution de la couche d'ozone. Cette dernière étant plus « efficace » dans les longueurs d'ondes courtes (UV-B) le FAR est plus élevé lorsque que le spectre d'action considéré attribue un rôle plus important aux UV-B qu'aux UV-A. Selon les spectres d'action considérés, le FAR semble devoir être compris entre 1 et 2,5 c'est à dire que pour 1% d'ozone en moins, il y a 1 à 2,5% d'UV en plus selon les longueurs d'ondes prises en compte ;
- Le facteur d'amplification biologique (FAB). Les doses d'UV supplémentaires reçues, par exemple du fait d'une diminution de la couche d'ozone, mais également par un allongement éventuel de la durée de l'exposition ou encore en raison d'expositions à des heures/saisons/latitudes de plus fort ensoleillement, entraîneraient inéluctablement une augmentation de leurs effets délétères. Le NRPB a calculé ce FAB pour différents effets. Compte tenu notamment de l'importance du « débit de doses » pour la détermination du risque de mélanome, ces travaux ne portent que sur les effets liés aux expositions cumulées. Le FAB est égal à 1,7 plus ou moins 0,3 pour les épithéliomas baso-cellulaires et de 2,3 plus ou moins 0,5 pour les épithéliomas spino-cellulaires.

Notons aussi qu'une augmentation de l'ensoleillement estival qui agit sur la température de l'eau favorise l'auto-épuration de certains rejets déversés dans les systèmes aquatiques, contribuant donc à une augmentation de la qualité des eaux.

2.2.4. Réduction de la durée d'enneigement

Une réduction de la couverture neigeuse et de la durée d'enneigement a comme conséquence de rendre des habitats favorables à des rongeurs réservoirs de l'hantavirus Puumala comme en Suède par exemple, où des augmentations de cas ont été constatées, liées à cette réduction de l'enneigement (Olsson *et al.*, 2003). Des recherches récentes ont montré une capacité de résistance de ces virus aux conditions environnementales extérieures, et notamment sous le couvert neigeux, assez exceptionnelles, lesquelles sont bien entendu préoccupantes dans la transmission du cycle de vie du virus et de ses effets sur les populations humaines (Kallio *et al.*, 2006). Ce même virus est présent dans le nord-est et l'est de la France. Une diminution de la couverture de neige dans certaines zones pourrait aussi permettre l'installation d'eaux stagnantes, propices au développement des larves d'insectes vecteurs.

Notre connaissance actuelle sur la résistance des micro-organismes et des virus en conditions extérieures à celles de leurs hôtes sont quasi-inexistantes. Par exemple, des rotavirus d'animaux (de porcs notamment) sont capables de résister dans les fécès de 7 à 9 mois à des températures de 18° à 20°C (Walker et Toth, 2000). Les modifications des conditions d'enneigement mais aussi de la structure des sols liées au réchauffement climatique doivent être à l'avenir mieux prises en compte car, eu égard à la capacité différentielle des micro-organismes et virus à plus ou moins résister dans l'environnement, on pourrait connaître des « relargages » possibles ou envisageables d'agents pathogènes vers les populations humaines et animales. Plusieurs champignons ubiquistes et pathogènes pour les populations humaines ont émergé par dispersion de leurs spores à partir d'une source environnementale dont on ne connaît pas exactement l'origine et qui pourrait être terrestre (genre *Blastomyces*, *Coccidioides*, *Cryptococcus*).

2.2.5. Hiver doux et printemps précoce

Comme on prévoit des hivers de plus en plus doux, et riches en précipitations, la saison pollinique, qui se rattache à la floraison des végétaux, démarrera plus vite et sera aussi plus longue. En Suisse, la floraison de certains arbres est déjà survenue en moyenne 20 jours plus tôt entre 1951 et 2000. D'autres facteurs entrent en jeu dans le processus de pollinisation, comme l'augmentation de la quantité de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère, qui permet aux plantes de produire

davantage de pollens donc plus d'allergènes. Nous recommandons la lecture de l'article de Laaidi et collaborateurs sur ce sujet précis pour la France (Laaidi *et al.*, 1997).

L'allergie au pollen des arbres, plantes, herbacées et graminées, appelée pollinose, est liée à l'environnement de la personne et non à un agent infectieux. De petite taille avec un diamètre en moyenne de 25 à 40 μm , les pollens sont généralement délivrés dans l'atmosphère en grande quantité (6 à 7 milliards de grains par an pour un seul pin ; 2,5 milliards en une journée pour un seul pied d'ambrosie). Les pollens responsables d'allergie disposent de certaines protéines ou glycoprotéines qui provoquent une réaction du système immunitaire en pénétrant dans l'organisme par les voies respiratoires.

En France, de 20 à 25% de la population souffrent de réactions allergiques et ce type d'allergie aurait doublé en 20 ans (M. Laaidi, Université de Bourgogne). Les pollens provoquent des affections d'apparence bénigne, parfois sévères, toujours gênantes voire invalidantes :

- des rhinites avec irritation et picotements du nez, crises d'éternuements, écoulement souvent abondant et obstruction nasale ;
- des conjonctivites avec larmoiements, démangeaisons, rougeurs et sensation de grains de sable ;
- toux, oppression thoracique ou respiration sifflante, asthme, avec diminution du souffle ;
- fatigue, maux de tête, manque de concentration ou d'attention lié à un sommeil perturbé par la rhinite ;
- manifestations cutanées avec aggravation de certains eczémas, plus rarement œdèmes et urticaires.

Chaque année les saisons polliniques récidivent et les différents pollens se succèdent dans l'air de fin janvier à octobre. La douceur des températures hivernales alliées à une élévation du taux d'humidité induisent plusieurs conséquences sur la pollinisation :

- une augmentation des concentrations de pollens dans l'air ;
- une précocité des saisons polliniques. Dès la mi-décembre 1987 les températures moyennes ont été supérieures aux normales saisonnières sur une grande région nord de la France, et cette douceur s'est poursuivie jusqu'en février 1988. Début 1988, la pollinisation a été avancée de 4 à 6 semaines par rapport à la normale ;
- une migration des pollens du sud vers le nord de la France (ambrosie, pollen d'oliviers, certaines graminées,...) ;
- irritation accrue : la pollution urbaine aggrave la toxicité des pollens en fragilisant la surface des grains et, en permettant la sortie des protéines allergisantes. Elle provoque également une augmentation de l'hyper-réactivité bronchique, nasale ou oculaire.

Les pollinoses sont, par excellence, des affections multifactorielles qui dépendent des conditions naturelles (relief, climat, végétation), des grandes options d'aménagement du territoire (y compris la politique agricole), etc... Leur variabilité chronologique en un endroit donné ne peut être comprise, et par suite prévue, sans une analyse intégrée de tous les paramètres caractérisant l'état de l'atmosphère. Des données sont accessibles auprès du Réseau National de Surveillance Aérobiologique (RNSA), association Loi 1901, créée en 1996, pour étudier le contenu de l'air en particules biologiques pouvant avoir une incidence sur le risque allergique pour la population. Les analystes du RNSA, à partir de données météorologiques (pollens et moisissures) complétées par des données cliniques et des prévisions météorologiques, réalisent ainsi des bulletins régionaux hebdomadaires qui sont destinés aux allergologues et aux personnes sensibles.

Nous pouvons ici souligner que les rhino-conjonctivites (rhume des foins) risqueraient de présenter des pics importants aux périodes de dissémination maximale des grains de pollen qui malheureusement ont cours presque toute l'année (à la fin de l'hiver et au début du printemps, il s'agit de pollens d'arbres et d'arbustes ; à la fin du printemps et au début de l'été, du pollen de graminées, et, à la fin de l'été comme au début de l'automne, du pollen d'armoise et d'ambrosie, par exemple). Comme indiqué précédemment, il a été signalé qu'un réchauffement climatique amènerait des déplacements vers le nord de nombreuses espèces végétales encore peu

présentes dans la partie nord de la France, dont certaines sont allergisantes (les pollens de cyprès, d'olivier, et de pariétaire), tandis que le pollen d'arganier pourrait remonter du sud du Maroc jusqu'en Provence ou en Languedoc-Roussillon par transport aérien. Les journées de beau temps chaud et ensoleillé augmenteraient aussi les quantités de pollen libérées.

Concernant la transmission de maladies infectieuses, contagieuses ou vectorisées, des hivers plus doux et des printemps plus précoces auront aussi des répercussions sur le rythme saisonnier d'apparition des agents pathogènes et de leurs vecteurs le cas échéant. La saison de prolifération d'insectes vecteurs et de cas de malades sera avancée dans le temps pour toutes les pathologies dont la saisonnalité est climato-dépendante. Concernant des maladies contagieuses, comme la grippe humaine par exemple, l'importance de leur climato-dépendance devra mieux être quantifiée par rapport à d'autres facteurs responsables, comme des facteurs sociologiques en particulier.

2.2.6. Diminution des gelées et de la survenue des vagues de froid

Il est généralement estimé que l'augmentation des températures hivernales se traduira par une baisse de la mortalité hivernale (rapport du GIEC). Cependant, des vagues de froid exceptionnelles pourront toujours se produire, avec un impact sanitaire important. Ainsi en janvier 1985, la France a connu une vague de froid sans précédent ayant entraîné une surmortalité de 13%, principalement par infarctus du myocarde (+17%), accidents vasculaires cérébraux (+54%) et pneumonies (+208%). De plus, la littérature montre que les vagues de froid ont un impact d'autant plus important qu'elles touchent des zones connaissant habituellement des hivers doux.

Beaucoup de virus et de bactéries pathogènes de l'Homme voient leurs cycles épidémiques étroitement dépendants des conditions climatiques, et la diminution des gelées et de la survenue des vagues de froid pourrait soit offrir une plus grande opportunité de transmission soit diminuer cette transmission. Dans nos zones tempérées, des infections à norovirus et à rotavirus provoquent une recrudescence de cas de gastro-entérites en hiver et au début du printemps (Cook *et al.*, 1990), alors que dans les zones tropicales, ces infections interviennent toute l'année (Moe et Harper, 1983). Ces distributions sont liées à la température et au taux d'humidité favorables, mais d'autres facteurs liés aux modes de vie de l'homme (eux-mêmes souvent en étroite relation avec les conditions climatiques) sont aussi importants à prendre en compte.

Concernant les gastro-entérites d'origine bactérienne, à salmonelles ou à *Campylobacter*, elles sont au contraire prépondérantes en été sans qu'on en comprenne aujourd'hui exactement les raisons. Une diminution des vagues de froid pourrait ainsi conduire à deux conséquences importantes : (i) l'augmentation du niveau minimal de température pour la survie et la transmission de certains agents pathogènes, et (ii) une modification importante dans la composition spécifique des agents pathogènes circulants, par ajustement à ces nouvelles normes météorologiques.

En Suède, la transmission d'encéphalites par les tiques a augmenté en raison d'hivers plus doux entre 1980 et 1990, favorisant la reproduction des vecteurs, mais aussi l'augmentation des animaux réservoirs eux-mêmes, entraînant une multiplication des vecteurs infectés (Lindgren et Gustafson, 2001). Concernant le Canada, des modèles statistiques ont montré une expansion importante de 200km plus au nord des tiques, responsables de la transmission de la maladie de Lyme, à la faveur d'un climat moyen plus doux (Ogden *et al.*, 2006). En Europe, nous pourrions aussi assister à des expansions plus au nord d'espèces de vecteurs, responsables de la transmission de la maladie de Lyme (Randolph, 2001), de la fièvre boutonneuse (Sousa *et al.*, 2006) et de la leishmaniose cutanée (Capelli *et al.*, 2004 ; Casimiro *et al.*, 2006). À propos de la leishmaniose cutanée canine, il existe aujourd'hui des preuves quasi-irréfutables d'un front de progression plus au nord de la présence des vecteurs de cette pathologie et de cas pour le Piémont italien (Capelli *et al.*, 2004). Pour de telles maladies, comme la maladie de Lyme ou les encéphalites à tiques, d'autres facteurs que ceux liés aux conditions météorologiques, et en particulier socio-économiques, peuvent intervenir, rendant leur compréhension complexe (Sumilo *et al.*, 2007).

Dans les zones tempérées d'Amérique du Nord et d'Europe, les épidémies pédiatriques de bronchiolites dues au virus respiratoire syncytial (VRS) surviennent généralement en hiver, mais

on observe une variabilité importante dans l'apparition des pics épidémiques qui pourrait aussi dépendre d'une variabilité différentielle du virus à survivre en fonction des températures froides.

2.2.7. Vents faibles ou nuls sur de longues périodes

Des conditions météorologiques présentant des vents faibles ou nuls sur de longues périodes sont des conditions propices à une dégradation de la qualité de l'air. Elles favorisent en effet la stagnation des polluants dans l'air des basses couches atmosphériques. C'est le plus souvent combinées à d'autres phénomènes que ces conditions peuvent conduire par exemple à des épisodes de pollution plus ou moins prolongés.

Pour le dioxyde d'azote par exemple, les épisodes de pollution sont observés généralement en absence de vent lorsqu'il y a des inversions de température combinées avec des émissions plus importantes de polluant, notamment à l'occasion de pics de circulation, comme cela s'observe généralement le matin et le soir.

Pour l'ozone, les vents faibles, généralement d'origine continentale, associés à un ensoleillement fort et des températures élevées, conduisent à des niveaux de pollution plus élevés.

À court terme, et de façon plus élargie, les liens entre dégradation de la qualité de l'air (augmentation des niveaux de pollution atmosphérique) et effets sanitaires à court terme sont bien décrits en France notamment grâce au Programme de Surveillance Air et Santé sur 9 villes françaises (PSAS-9) coordonné par l'InVS. La quantification des effets à court terme a également été réalisée par de nombreuses études internationales depuis le début des années 1990. Ces études montrent une augmentation de la mortalité, des hospitalisations ou des passages aux urgences pour causes respiratoires et cardio-vasculaires en lien avec une augmentation de la pollution atmosphérique (notamment pour les indicateurs particules et dioxyde d'azote). Les effets à court terme de la pollution atmosphérique sont généralement plus marqués chez les sujets âgés ainsi que chez les enfants.

2.2.8. Climat plus doux, hivers plus humides et activités microbiennes et vecteurs

L'augmentation des précipitations en hiver devrait être plus significative au Nord de la France. L'humidité et la chaleur sont des facteurs de développement de nombreux champignons microscopiques et de bactéries.

– sur le développement des moisissures dans l'air extérieur et l'air intérieur :

Le réservoir naturel des moisissures se situe à l'extérieur et varie dans les régions tempérées, selon la saison et la quantité de matière organique présente dans l'environnement (Malloch, 1997). Les moisissures produisent des spores dont la concentration dans l'air ambiant dépend des conditions environnementales, et qui peuvent survivre pendant de nombreuses années dans des conditions extrêmes de gel ou de sécheresse. Ces spores sont véhiculées par contact, par les insectes, les mouvements de l'air ou de l'eau. (Kozak, 1979 ; Boutin-Fornazo, 2006).

Les principales espèces rencontrées dans l'atmosphère sont *Penicillium*, *Aspergillus*, *Cladosporium* et *Epicoccum*. Les moisissures peuvent atteindre de fortes concentrations dans l'air lorsque le climat est chaud et humide. On peut donc envisager un accroissement de la prolifération des moisissures, sous nos latitudes, en cas de réchauffement.

Les matériaux de construction des habitats constituent un support de choix pour la croissance des moisissures. Tous les types de bâtiments sont concernés par la contamination par les moisissures : logements individuels, logements collectifs, bâtiments professionnels, bâtiments collectifs.

Les principales moisissures rencontrées aujourd'hui dans l'habitat sont des Deuteromycota, Zygomycota, Asco- et Basidiomycota. Parmi celles-ci, quatre genres sont présents dans 90% des logements : *Cladosporium*, *Penicillium* et *Aspergillus* et *Altermaria*. (CSHPF, 2006 ; Lee et Jo, 2006). Ces micro-organismes peuvent proliférer à la faveur d'une augmentation des sources d'humidité : augmentation du niveau des nappes phréatiques, infiltrations, remontées capillaires, dégâts des eaux et intempéries.

Les moisissures sont sources de particules (glucanes, particules organiques volatiles, mycotoxines, spores) responsables de pathologies irritatives et immunologiques, aiguës et chroniques (CSHPPF, 2006 ; Boutin-Forzano, 2006 ; Lee et Jo, 2006).

Par exemple *Stachybotrys chartarum* produit de nombreuses mycotoxines. Ce micro-organisme a été mis en cause dans des cas de décès de nouveau-nés par hémorragies intra-alvéolaires (Vesper *et al.*, 2002). C'est un contaminant potentiel des fourrages, céréales et matériaux de cellulose exposés à l'humidité. *S. chartarum* produit de nombreuses mycotoxines responsables de pathologies graves, voire mortelles (mycotoxicoses, stachybotryotoxicoses) touchant le système vasculaire, respiratoire, immunitaire, le système nerveux central ou l'appareil digestif.

Penicillium sp., *Micromonospora faeni*, *Thermoactinomyces vulgaris*, *Alternaria*, *Cladosporium*, *Helminthosporium*, sont les principaux champignons responsables des manifestations respiratoires et des réactions allergiques.

Des invasions fongiques systémiques mortelles peuvent survenir chez les personnes immunodéprimées ou à risque : aspergillose bronchopulmonaire à *Aspergillus*, cryptococcose à *Cryptococcus neoformans*, histoplasmose à *Histoplasma capsulatum*, blastomycose à *Blastomyces dermatitidis*, coccidioïdomycoses à *Coccidioides immitis*.

- Concernant la transmission des agents pathogènes ou parasitaires :

Plus particulièrement pour les agents transmis par un vecteur, deux facteurs semblent prépondérants : la température moyenne locale et le différentiel de pluviométrie (Guernier *et al.*, 2004). En effet, beaucoup d'agents pathogènes nécessitent non seulement une température optimale pour assurer des fonctions physiologiques vitales, mais aussi une variabilité d'humidité annuelle importante. Les régions trop sèches ou trop humides tendraient à être moins favorables à la transmission de plusieurs agents pathogènes à cycle direct ou indirect (Kalluri *et al.*, 2007). Une augmentation de l'humidité hivernale pourrait entraîner une recrudescence de maladies vectorielles ou zoonotiques (effet probable) en créant des habitats propices au développement de ces populations hôtes, mais d'autres facteurs comme la température sont ici à prendre en compte. Des niveaux de précipitations plus élevés au Chili, en particulier déterminés par le phénomène ENSO, auraient des conséquences indirectes sur l'augmentation du nombre d'individus dans les populations de réservoirs d'hantavirus (Murua *et al.*, 2003). En France mais aussi en Allemagne, une modification dans les habitudes alimentaires des campagnols roussâtres, réservoirs de l'hantavirus causant une fièvre hémorragique avec syndrome rénal (ces modifications d'habitude alimentaire sont très souvent conditionnées par l'abondance/rareté de la ressource, elle-même souvent dépendante des conditions météorologiques) a conduit à une augmentation du risque de transmission de ce virus à l'homme. Les modalités de transmission de plusieurs agents pathogènes zoonotiques ou vectoriels en regard d'hivers plus humides et plus doux pourraient être calquées sur ce même principe (Kalluri *et al.*, 2007). Les transmissions d'agents pathogènes par les espèces de tiques seront ici plus particulièrement à prendre en considération (Liang *et al.*, 2002).

Un autre exemple concerne le virus de la Fièvre de West Nile, ou fièvre du Nil occidental, qui est un arbovirus de la famille des *Flaviviridae*, transmis par des moustiques. Le virus est largement répandu en Afrique, Europe du Sud, Russie, Moyen-Orient, Inde, Australie mais aussi depuis 1999 en Amérique du Nord. Il est connu surtout depuis une dizaine d'années pour provoquer dans le bassin méditerranéen et en Europe du Sud des épidémies sporadiques de méningo-encéphalites parfois mortelles chez l'homme ou des épizooties chez les chevaux (Zeller *et al.*, 2001). Alors que la présence du virus West Nile n'avait plus été signalée en France depuis 1965, fin août 2000, une épizootie provoqua le décès de 21 chevaux en Camargue. En 2003, sept cas humains et quatre cas équins (dont deux décès) d'infection à virus West Nile ont été rapportés dans le département du Var (Murgue *et al.*, 2001 ; Zientara, 2002).

Le virus West Nile a circulé dans le bassin méditerranéen ces dernières années. Un changement climatique qui serait susceptible de modifier les conditions bio-écologiques de certaines parties du

territoire national induirait, en conséquence, de probables évolutions de la nature et des caractéristiques des populations d'insectes en France. Ainsi, des espèces vectrices, jusqu'alors exotiques, pourraient s'installer dans certains biotopes de l'hexagone. L'augmentation des températures serait aussi susceptible de modifier la durée et les trajets des oiseaux migrateurs en allongeant la période pendant laquelle les oiseaux restent en France. Cette modification des conditions migratoires favoriserait la transmission des souches virales. De nombreuses inconnues subsistent quant au déroulement du cycle biologique (nature et nombre des espèces réservoirs, nature des espèces vectrices, trajets des oiseaux migrateurs, ...). Cependant, le risque de réapparition de phénomènes épizootiques ou épidémiques en France est réel. Ainsi que cela a été réalisé dans le bassin méditerranéen, il est nécessaire de maintenir des systèmes de surveillance et d'alerte précoces de la circulation virale (Afssa, 2005).

- Conséquences sur la qualité des aliments :

L'humidité et la chaleur sont des facteurs de développement des champignons et des bactéries d'altération. Les champignons peuvent conduire à une dégradation des produits végétaux (pourritures) et certains ont également la capacité de produire des substances toxiques (mycotoxines). Si des champignons toxigènes sont présents au moment de la récolte ou se développent lors des phases de stockage des produits secs tels que les céréales et les graines oléagineuses (par exemple si les graines n'ont pas pu sécher suffisamment du fait de l'hygrométrie de l'air), la fréquence de contamination des produits secs par des mycotoxines pourrait être accrue en périodes de climat plus doux. Cette remarque entraîne qu'un contrôle accru des produits avant mise sur le marché soit réalisé par les services compétents (voir Afssa, 2008).

Par ailleurs, si le risque de pourriture des végétaux est augmenté en période de climat plus doux, les producteurs seront peut être tentés d'augmenter les traitements phytosanitaires préventifs et curatifs, ce qui peut aller à l'encontre d'une programmation actuelle de réduction des pesticides.

2.2.9. Acidification des mers

En février 2007, le GIEC notait que le réchauffement climatique résultait « vraisemblablement » du rejet de gaz à effet de serre par les activités humaines. Chaque jour plus de 25 millions de tonnes de gaz carbonique se combinent avec l'eau de mer, la rendant plus acide (le CO₂ se transforme en acide carbonique quand il passe dans l'eau). L'augmentation des émissions de CO₂ atmosphérique suit une courbe exponentielle. Ainsi, durant le siècle à venir l'acidification des océans risque de se poursuivre à une vitesse au minimum cent fois supérieure à toute variation naturelle depuis au moins six cents milliers d'années.

De nombreuses bactéries et virus aquatiques sont très sensibles au *pH* de l'eau. Les bactéries du genre *Vibrio* spp., par exemple, préfèrent des valeurs de *pH* optimaux entre 7 et 8 (légère tendance basique), mais on observe ici une très grande variabilité de réponse (tolérance de 5 à 10). En dehors de travaux expérimentaux, on ne possède pas de données suffisantes pour connaître les réponses des bactéries et des virus aquatiques à des conditions de l'eau plus acides en dehors du fait qu'à de tels *pH* la viabilité des bactéries est très diminuée et que certaines d'entre elles se mettent en état Viable Non Cultivable, lequel pourrait correspondre à une forme de résistance aux nouvelles contraintes environnementales, pouvant par la suite engendrer des bactéries plus pathogènes. Expérimentalement, quelques travaux existent sur l'influence de l'acidité sur le taux de survie et de reproduction de bactéries (ex. : *Vibrio* spp.), mais ces derniers ne tiennent généralement pas compte de l'influence d'autres paramètres importants que l'on rencontre en conditions naturelles.

2.3. Vagues de chaleur et sécheresse

Pour la France, suivant le scénario B2 du GIEC les précipitations diminueraient en été de 5 à 25% et suivant le scénario A2 l'assèchement en été serait plus important (de 20 à 35%). Des modélisations récentes sur les trois grands bassins français (Rhône, Seine et Adour-Garonne)

indiquent une tendance à un affaiblissement des débits d'étiages estivaux. Il est probable que les périodes de sécheresse soient plus longues en été touchant plus fortement le sud de la France déjà touché par des sécheresses l'été.

2.3.1. Sécheresse de la végétation

Les modifications d'écosystèmes sont prépondérantes dans la transmission de nombreux agents pathogènes dont le cycle est assuré par un vecteur et/ou un réservoir. Une augmentation de la sécheresse aura pour effet de modifier les écosystèmes et leur composition floristique, mais les réponses sur la transmission d'agents parasitaires ou microbiens transmis par des vecteurs ou des réservoirs ne sont pas bien référencées. *A priori*, les zones très sèches et désertiques ne sont pas propices à la survie de nombreux agents étiologiques et de leurs hôtes, mais l'exemple d'une recrudescence de leishmanioses cutanées dans de nombreuses zones désertiques (Anis *et al.*, 2001) montre à l'évidence que des réservoirs de ce parasite, adaptés à ces conditions, permettent un cycle actif de transmission. Le développement d'un front de progression vers le nord en France méditerranéenne et en Lombardie italienne de vecteurs de leishmanioses cutanées et de cas de cette maladie pourrait partiellement être associée à une modification consécutive des biotopes liée au changement climatique, et qu'affectent ces insectes, mais encore une fois nous manquons d'information sur le sujet.

2.3.2. Feu de forêt

Les feux de forêt et d'autres types de végétation produisent des gaz et des émissions de particules qui affectent la composition de l'atmosphère. L'exposition aux émissions d'incendies de forêt est essentiellement à court terme. En ce sens, les études existantes portent le plus souvent sur les liens à court terme (risque aigu) reliant indicateurs d'exposition et indicateurs sanitaires. Ce sont les liens entre particules fines et ultra-fines liées à la combustion de la biomasse et indicateurs sanitaires qui sont le plus souvent étudiés.

En 1997-1998, les feux de forêt survenus en Asie du Sud-Est ont affecté quelques 200 millions de personnes. La comparaison entre les données médicales liées aux incendies de forêt alors survenus et les données correspondantes pour 1995-1996 a confirmé les connaissances des effets des particules fines sur la santé publique (OMS, 2000) :

- Les consultations externes pour des affections respiratoires en Malaisie ont été 2 à 3 fois plus nombreuses ;
- Les cas de pneumonie ont été de 5 à 25 fois plus nombreux dans la région sud-est du Kalimantan (Bornéo) et de 1,5 à 5 fois plus nombreux dans le sud de Sumatra ;
- Le nombre de cas déclaré d'infections des voies respiratoires supérieures avait augmenté de 50% à Jambi (Sumatra) entre août et septembre 1997.

Plusieurs études se sont depuis intéressées à des événements plus récents :

- Incendies de 1999, Californie, Vallée de Hoopa : une étude des effets sur la santé des fumées d'incendie menée par le CDC d'Atlanta s'est basée sur les résultats de données collectées auprès de la population de la réserve Indienne (questionnaires d'enquête, échantillon de 289 personnes sur les 385 résidents). Durant les semaines d'incendie, les visites médicales pour gêne respiratoire ont augmenté de 52 %, et 62,6 % des personnes enquêtées ont rapporté des symptômes respiratoires. Les participants déjà atteints de maladies respiratoires ou cardiovasculaires ont vu se développer des problèmes plus sérieux (Mott *et al.*, 2002) ;
- Incendies du sud californien en 2003 : une étude a ciblé les effets aigus des fumées sur la santé d'une cohorte d'enfants (the Southern California Children's Health Study, CHS) qui s'est retrouvée exposée à l'occasion de ces incendies. Les niveaux de PM10 mesurés durant les 5 jours de plus intense activité des incendies ont été utilisés pour

caractériser les niveaux de fumées. Il ressort que l'exposition aux fumées de ces incendies est associée à une augmentation des symptômes oculaires et respiratoires, une élévation de la consommation médicamenteuse et du nombre de consultations médicales. Ces associations sont d'autant plus marquées chez les asthmatiques (Kunzli *et al.*, 2006).

Au-delà, certains avancent que les feux de forêt seraient une source de polychlorodibenzodioxines et furanes (PCDD/Fs). À l'heure actuelle, il ne semble cependant pas y avoir d'étude avec un degré de preuve suffisant permettant de le confirmer (la recherche bibliographique effectuée ici n'est cependant pas exhaustive). Kim *et al.* (2003) ont étudié les niveaux de PCDD/Fs dans des échantillons de sols brûlés et dans des échantillons de cendre, 1 mois, 5 mois et 9 mois après des incendies, et les ont comparés à des échantillons de sol non brûlés. Si les concentrations en PCDD/Fs dans les échantillons de sol brûlés sont supérieures à celles relevées dans les sols non brûlés au bout de 1 mois, après 5 mois elles redeviennent comparables. Ces résultats suggèrent que les PCDD/Fs se forment durant les incendies pour ensuite s'introduire dans les sols. Par ailleurs, les résultats tendent à montrer que les cendres résultant de la combustion du bois et d'autres matières organiques sont la composante qui influence majoritairement les concentrations de PCDD/Fs dans les sols.

En Australie, des investigations récentes ont identifié une large contamination par les PCDD/Fs dans les sols et sédiments de la région côtière du Queensland, sans qu'une source ait pu être identifiée. Une étude a été conduite afin de savoir si les feux de forêt pouvaient être à l'origine de cette contamination. La reproduction expérimentale menée n'a pas permis d'identifier une augmentation de la concentration totale en PCDD/Fs suite au processus de combustion, et donc de relier formellement la contamination des sols du Queensland à des feux de forêt. Cependant, les feux de forêt pourraient aussi influencer la répartition de différents PCDD/Fs préexistants dans les sols (Prange *et al.*, 2003). Enfin, durant les incendies ayant sévi d'août à septembre 2003 à proximité de Missoula dans le Montana, des mesures de PM10 et PM2,5 en masse et en composition ont été effectuées. Les quantités de PCDD/Fs, de carbone organique et de carbone élémentaire, ont été recherchées. Les PM2,5 collectées durant ces épisodes se composent essentiellement de carbone organique (65%). La fraction de carbone organique collectée n'est pas composée de quantités significatives de PCDD/Fs (Ward et Lincoln, 2006).

Indirectement, les feux de forêt peuvent être responsables d'une plus grande transmission d'agents pathogènes comme cela a été le cas à Sumatra avec le virus Nipah, transmis par des chauve-souris frugivores (Breed *et al.*, 2007). En effet, les importants feux de forêt primaire qu'ont connus Sumatra et Kalimantan en 1997 (liés peut être au phénomène ENSO) ont entraîné des déplacements massifs de chauve-souris vers d'autres zones, et en particulier vers les nombreuses fermes d'élevages de porcs en Malaisie, où ces réservoirs du virus ont pu trouver des manguiers pour leur subsistance. La transmission des virus à partir des fèces de chauve-souris a ainsi contaminé des élevages porcins ainsi que les populations locales. Le corollaire d'une extension des zones d'habitats humains aux marges de la forêt tropicale, augmentant donc les probabilités de contacts avec le réservoir du virus, est aussi cependant vérifié. Cet exemple montre comment un événement amont, comme un feu de forêt, peut entraîner d'autres événements en cascades, dont certains peuvent avoir des répercussions sur la santé des populations.

2.3.3. Assèchement de mares ou de cours d'eau

Inévitablement, l'assèchement de mares ou de cours d'eau devraient avoir un effet positif en diminuant voire même en supprimant la transmission de nombreux agents pathogènes liés à l'eau. Les preuves en sont seulement indirectes, avec une relation inverse existant entre le nombre de cas de dengue ou de paludisme, par exemple, et la proximité d'un lieu humide.

2.3.4. Baisse du niveau des rivières

Une baisse du niveau des cours d'eau a notamment des conséquences quantitatives et qualitatives sur l'approvisionnement en eau des populations et impacte également la gestion des rejets d'assainissement.

S'agissant d'eau destinée à la consommation humaine, la France compte 1325 prises d'eau d'origine superficielle, majoritairement dans 27 départements (Bretagne, Ile de France,) soit 4,7% du total des ressources en eau (source rapport du Ministère chargé de la Santé). Ces ressources concernent le tiers des volumes produits à l'échelon national.

Des scénarii d'impact sur la production d'eau peuvent être illustrés à partir, par exemple, des modalités d'approvisionnement en eau de la population de la zone agglomérée de la région Ile-de-France (8 millions d'habitants) essentiellement effectuée à partir des prélèvements dans trois rivières nourricières (Seine, Marne et Oise) :

- diminution de la qualité des ressources disponibles (concentration en polluant : teneurs en ammonium, en carbone organique total paramètre, en cyanobactéries, etc. , paramètres conditionnant la bonne traitabilité des eaux brutes pour la fabrication d'eau potable) ;
- obligation de ralentissement de la production des usines de traitement d'eau potable (chiffage de l'amélioration des filières pour conserver la même qualité d'eau produite) ;
- impact sur la gestion des installations de soutien d'étiage (barrages réservoirs).

Une baisse du niveau des cours d'eau a un impact sur la qualité des eaux de baignade avec un développement constaté de cyanobactéries ou de la bactérie *Aeromonas hydrophilla*, et qui peuvent proliférer dans ces milieux plus stagnants.

2.3.5. Diminution du niveau des nappes phréatiques

Aujourd'hui en France, 26572 captages d'eau souterraine sont utilisés pour l'approvisionnement en eau destinée à la consommation humaine dans 26000 unités de distribution d'eau. (Source Ministère chargé de la Santé, Direction Générale de la Santé). Nota : Ce chiffre ne comptabilise donc pas les puits privés à usage unifamilial, ni les captages à usage agricole par exemple. La plupart des captages sont de petites tailles : près de 95% d'entre eux produisent moins de 200 mètres cubes d'eau par jour, et la moitié d'entre eux ne délivre que 2% de l'ensemble de la production. Inversement, les captages de grande capacité, peu nombreux, assurent une part importante de la production : moins de 2% des captages (les plus importants) fournissent la moitié des débits nécessaires à la production d'eau potable.

Classe de débit des captages en m3/j	Nombre
< 100	15254
100 - 1999	10093
2000- 9999	1104
10000 - 49999	115
50000 - 99999	2
100000 et plus	4
Total	26572

Source : Ministère chargé de la Santé - DDASS - SISE-eaux – 2007.

La majorité des stations de traitement d'eau souterraine (89,4%) parmi les 13757 existantes correspond à des traitements simples et ceux-ci sont donc non adaptés pour faire face à une dégradation de la qualité des eaux.

Contrairement aux eaux d'origine superficielle, ces eaux souterraines conservent, en général, une température relativement stable selon les saisons (12 à 14°C) dans la majorité des aquifères, hormis ceux puisant dans des nappes chaudes en général relativement profondes.

Un réchauffement climatique aura prioritairement un impact via la raréfaction du niveau piézométrique général des aquifères et via l'introduction par ruissellement lors d'épisodes de fortes pluies d'eaux parasites (forte charge microbienne) dans des captages mal protégés, accentuant le risque notamment parasitologique qui paraît alors très significatif. Des scénarii de vulnérabilité de captages d'eau destinée à la consommation humaine développés dans certains départements pour d'autres motifs, pourraient être utilisés pour quantifier plus avant certains impacts.

Les restrictions d'eau imaginables ou possibles pourraient aussi entraîner dans la population une diminution des conditions d'hygiène générale conduisant à une augmentation d'un certain nombre de pathologies spécifiques (dermatoses, maladies infectieuses par exemple ...).

2.3.6. Mouvement du sol (argiles gonflantes)

Les sols argileux possèdent la particularité de se rétracter lorsqu'ils se dessèchent. Les effets se traduisent par des tassements différentiels du sol qui peuvent s'avérer très dommageables pour les constructions. Les dommages se traduisent généralement par des fissures sur façades. Le préjudice peut aller jusqu'à la ruine complète de la maison. En France, ces manifestations ont été observées lors de la sécheresse de 1976 puis après l'été caniculaire 2003. De ce point de vue l'été 2003, caractérisé par des températures élevées avec une très forte évapotranspiration pendant une période relativement courte mais succédant à un hiver assez pluvieux, a été particulièrement virulent. De très nombreuses maisons se sont fissurées, parfois en l'espace de quelques jours. Plus de 7300 communes ont déposé une demande de catastrophe naturelle.

Aucune donnée sanitaire tant environnementale qu'épidémiologique ne permet de connaître l'impact sur la santé. Il est fort à craindre qu'au minimum, on ait des conséquences psychiques chez les habitants touchés, à l'instar de situations de crise décrites pour les inondations.

2.3.7. Vagues de chaleur

Les vagues de chaleur sont des phénomènes météorologiques connus, pour lesquels il n'existe cependant pas de définition météorologique normalisée. En France, la vague de chaleur de l'été 2003 est la plus intense enregistrée en France depuis les années 1950, et elle a été à l'origine d'un excès de mortalité de 15000 décès. En raison du changement climatique, il est très probable que les vagues de chaleur estivales seront à la fois plus fréquentes, plus longues et plus intenses. Météo France propose deux approches pour estimer cette augmentation.

La première consiste à s'intéresser au nombre de jours où la température maximale dépasse 35°C. Typiquement, pour le climat de la période 1960-1989, ce nombre n'excède pas en moyenne 1 jour par été sur la France, même s'il peut atteindre localement de l'ordre de 4 jours dans une partie du sud-est de la France. En faisant l'hypothèse du scénario A2 de réchauffement climatique du GIEC, entre la période 1960-1989 et la période 2070-2099, les modèles prévoient un fort accroissement de cette fréquence. Dans le cas le plus défavorable, la moyenne sur la France du nombre de jours supérieurs à 35°C passerait approximativement de 1 à 14 jours.

La deuxième approche consiste à analyser les étés les plus chauds. Suivant le scénario A2 du GIEC, la température moyenne estivale des 30 prochaines années du XXI^{ème} siècle pourrait être sensiblement la même que celle de l'été 2003, et un été sur deux serait alors au moins aussi chaud que l'été 2003.

Les effets sur la santé des vagues de chaleur (dénommées canicules) sont développés dans le chapitre 3 avec le retour d'expérience des canicules de 2003 et 2006. L'étude de la vague de chaleur de 2003 a permis de mettre en place des actions de prévention et de gestion. Ces actions ont fait face à une première vague de chaleur importante en 2006. Cette expérience a montré que, si la vague de chaleur avait été mieux gérée qu'en 2003 avec un impact nettement inférieur, l'impact sanitaire restait conséquent et qu'il devenait donc nécessaire de poursuivre et d'adapter la prévention envers la population la plus vulnérable à la chaleur.

2.3.8. Vague de chaleur et effets directs ou indirects sur les activités microbiennes

Les maladies infectieuses d'origine alimentaire jouent un rôle important en terme de morbidité dans la population générale. Parmi les principaux facteurs de risque de la contamination des aliments par des micro-organismes pathogènes, on trouve l'évolution des méthodes de production, tant au niveau de la production primaire (élevage, cultures) que de la production secondaire (transformation, distribution) ainsi que le changement de comportement des consommateurs, notamment la consommation d'aliments crus ou peu cuits.

La température est un facteur important du développement et de la survie des micro-organismes, en particulier des bactéries. Une température modérée à chaude est favorable à la multiplication des germes pathogènes. Il a été démontré que certaines maladies infectieuses d'origine alimentaire suivaient une distribution saisonnière. En particulier, les infections liées à la bactérie *Salmonella* (première cause d'infection alimentaire avec 30000 à 40000 cas annuels estimés ; voir InVS, 2003a) sont plus fréquentes en été. Différentes hypothèses sont évoquées : d'une part la hausse des niveaux de contamination microbiologique de l'environnement des animaux pourrait conduire à une augmentation de la fréquence de certaines maladies animales et augmenter le risque de contamination initiale des produits animaux au stade de la production primaire, et d'autre part, la multiplication plus rapide des germes dans les aliments en cas d'élévation des températures (ex : rupture de chaîne du froid) conduirait à atteindre des niveaux de contamination microbienne dangereux pour le consommateur (Source : Effects of the Climate Change in the UK, 2008).

Les plages de température considérées à risque vis-à-vis des dangers microbiologiques varient entre 5 et 60°C. De ce fait la maîtrise de la chaîne du froid est un point majeur pour assurer la salubrité d'un grand nombre d'aliments (viandes, poissons, produits laitiers, plats cuisinés, pâtisseries,...). En période de canicule, les risques de défaillance de cette chaîne du froid sont généralement accrus, tant au niveau des producteurs que des consommateurs.

Les effets directs et indirects d'une augmentation de la température moyenne globale auront des répercussions sur les niveaux de transmission locale ou régionale de nombreuses maladies contagieuses, vectorielles ou zoonotiques, ainsi que de nombreuses études tendent à le démontrer : cas de la grippe en France affectés par les événements ENSO (Viboud *et al.*, 2004), de la dengue en Thaïlande de même dépendante de ces événements globaux (Cazelles *et al.*, 2005), du choléra en Afrique de l'Ouest (de Magny *et al.*, 2007), au Bangladesh (Rodo *et al.*, 2002) et au Pérou (Colwell, 1996), du paludisme au Vénézuéla (Bouma et Dye, 1997) et en Tanzanie (Lindsay *et al.*, 2000), ainsi que des syndromes à hantavirus aux États-Unis d'Amérique (Hjelle et Glass 2000) ou encore de la fièvre de la Vallée du Rift au Kenya (Linthicum *et al.*, 1999).

Concernant, l'activité microbienne, fongique et virale naturelle dans les sols et l'eau, elle devrait être bouleversée par des changements plus ou moins importants dans la structure et le fonctionnement de leurs communautés, lesquelles participent au fonctionnement des cycles biogéochimiques. Nous possédons à l'heure actuelle extrêmement peu d'éléments de connaissance sur ces sujets.

2.3.9. Vague de chaleur et diminution de la qualité de l'air

Un exemple majeur de vague de chaleur en France reste la canicule de l'été 2003. Les conditions climatiques et les températures exceptionnelles de l'été 2003 ont conduit à des niveaux de pollution photochimique particulièrement élevés en France mais aussi en diverses régions d'Europe. Une telle situation n'avait jamais été rencontrée depuis 1991, date de la généralisation des mesures de l'ozone sur l'ensemble du territoire.

La pollution photochimique désigne un mélange complexe de polluants formés chimiquement dans l'air, sous l'effet du rayonnement solaire ultra violet, à partir de composés précurseurs émis par des sources naturelles et les activités humaines (oxydes d'azote, composés organiques volatils, monoxyde de carbone). Le principal polluant photochimique est l'ozone (O₃), et la production de ce gaz s'accompagne d'autres espèces aux propriétés acides ou oxydantes telles que des aldéhydes,

des composés organiques nitrés, de l'acide nitrique. Cette pollution s'observe surtout en été dans les régions périurbaines et en zones rurales sous le vent des agglomérations.

À titre descriptif, du 2 au 15 août 2003, plus de 2700 événements de dépassement du seuil d'information ($180 \mu\text{g}/\text{m}^3$)⁴ ont été observés sur un ensemble de 367 sites de mesure (soit 86% de l'ensemble du parc des stations). Pour comparaison, l'année 2001, qui était l'une des plus polluées depuis 1991, avait connu 1127 événements de dépassement sur 211 sites, soit sur 56% des stations de l'époque. En août également, le niveau de $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne horaire (nouveau seuil d'alerte applicable à compter du 9 septembre 2003) a été dépassé pendant 16 jours consécutifs, tant en agglomérations qu'en zones rurales.

Il apparaît clairement, toutes choses égales par ailleurs, que les conditions météorologiques exceptionnelles de type vague de chaleur/canicule telle que celle de 2003 (fort ensoleillement, maintien de températures nocturnes élevées, atmosphère stable, vents souvent faibles) expliquent les phénomènes de pollution de l'air de type photochimique (formation d'ozone) mais également la persistance de niveaux élevés de précurseurs et l'accumulation de l'ozone formé. Ce type de conditions contribue également à la formation et à l'accumulation d'autres polluants d'origine photochimique tels que des aérosols secondaires et des particules fines.

L'ozone a un fort pouvoir oxydant et ses effets affectent les muqueuses respiratoires et oculaires, provoquant la toux et l'irritation des yeux et des voies aériennes supérieures. Il est à l'origine d'effets respiratoires, documentés à la fois par des travaux toxicologiques et épidémiologiques. Les effets à court terme ont été les plus étudiés et la plupart des travaux réalisés mettent en évidence des associations entre les variations journalières de concentrations ambiantes en O_3 et différents indicateurs sanitaires tels que la mortalité toutes causes non accidentelles, les admissions hospitalières (notamment pour BPCO chez les sujets âgés), et la diminution de la fonction respiratoire. Quels que soient les effets considérés, des populations sensibles ont été identifiées comme les enfants, les personnes âgées, les sujets asthmatiques et plus généralement l'ensemble des sujets présentant des pathologies chroniques de type cardiovasculaire ou respiratoire.

Dans le cadre du Programme de surveillance Air et Santé (PSAS), l'InVS a analysé les relations spécifiques entre pollution, température et mortalité pour la période 1996-2003, incluant la période de vague de chaleur. L'excès de risque de mortalité à court terme lié à l'ozone est légèrement augmenté en moyenne sur les 9 villes par rapport aux estimations antérieures, obtenues en l'absence de vague de chaleur (augmentation statistiquement non significative). Entre les différentes villes, la situation est hétérogène. Même si les résultats quantitatifs obtenus de l'évaluation d'impact sanitaire menée doivent être considérés avec prudence, il apparaît un impact non négligeable des niveaux de pollution photochimique observés pendant l'été 2003 sur la mortalité, par rapport aux niveaux de cette pollution observés les années précédentes.

Il est à noter qu'au delà, il semble que les excès de mortalité observés les plus élevés soient liés dans leur quasi totalité à l'effet propre de la chaleur : exemples de Paris et de Lyon.

2.4. Évènements de fortes précipitations

2.4.1. Inondations

Les inondations sont les catastrophes naturelles les plus courantes en Europe, et les plus coûteuses en termes économiques. De janvier à juillet 2002, l'Europe a connu 8 grandes crues, qui ont fait 93 morts et ont touché 336000 personnes. En France, on peut citer la crue de l'Ouvèze à Vaison-la-Romaine (41 morts), celle de l'Aude en novembre 1999 (29 morts) et celle du Gard en septembre 2002 (24 morts). Dans la Somme en 2001, plus de 1100 personnes ont été évacuées,

⁴ Les niveaux d'ozone dans l'air ambiant sont régis par la directive européenne 92/72/CEE adoptée en 1992. Cette directive comporte un seuil d'information fixé à $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne horaire au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé de populations particulièrement sensibles et un seuil d'alerte fixé à $360 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne horaire. Une nouvelle directive sur l'ozone adoptée en 2002 a abaissé ce seuil d'alerte à $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne horaire et impose des mesures d'urgence, en complément des mesures permanentes en vigueur pour préserver la qualité de l'air, lorsque ce seuil est dépassé au-delà de 3 heures consécutives.

touchant 108 communes. Plus d'une centaine de personnes ont été évacuées pendant près de deux mois.

Le changement climatique devrait provoquer une augmentation faible des précipitations moyennes en hiver. Cependant, les pluies les plus intenses devraient augmenter plus fortement. Par exemple, le nombre de jours avec des précipitations supérieures à 10 mm pourrait augmenter pour le scénario A2 du GIEC d'environ 25%, avec des disparités régionales importantes, et la fréquence des précipitations supérieures à 20 mm serait surtout augmentée dans l'ouest et le nord du pays. Il n'est de ce fait pas possible de tirer de conclusions concernant la fréquence d'occurrence des épisodes de pluies diluviennes dans le sud-est de la France. Ces phénomènes, qui se produisent plus fréquemment en automne, sont en effet d'origine convective, et fortement dépendants du relief. Cela les rend très variables localement et donc très difficiles à modéliser aux échelles de temps climatiques.

Nous ne connaissons pas aujourd'hui la population française exposée aux inondations, notamment en milieu urbain, en tenant compte du changement climatique. On connaît les crues de rivière, notamment dans la région PACA. 47% des communes du bassin Rhône-Méditerranée-Corse sont concernées par le risque d'inondation, dont 7 % avec des enjeux forts, notamment au regard du risque pour la vie humaine. 20 % de la population de la région Languedoc-Roussillon habite en zone inondable. Dans les secteurs urbains et périurbains, des actions anthropiques jouent un rôle aggravant dans la formation et l'écoulement des crues comme l'imperméabilisation des sols, la canalisation ou la mise en souterrain des cours d'eau. L'inondation de la Somme en 2001 repose sur le fait que la profondeur de la surface libre de la nappe est très faible et que les précipitations ont été intenses et continues.

Pour le milieu urbain, il est important d'avoir des réseaux d'assainissement adaptés aux pluies intenses à venir dans le cadre du changement climatique car, cela touche des zones à forte densité de population.

Les conséquences des inondations sur la santé ont été décrites par l'OMS. On a les effets survenant durant ou immédiatement après l'inondation, se développant dans les jours voire les premières semaines suivant l'inondation et à plus long terme pour apparaître et/ou durer des mois voire des années (deux à trois semaines sont parfois nécessaires pour remettre à niveau certains réseaux d'eaux destinées à la consommation humaine - bonne distribution des désinfectants jusqu'au bout des antennes des réseaux après réinjection - cf. inondations du Gard et de la Somme).

L'inondation au début est source de noyades, de crises cardiaques et de blessures. Son impact dépend de la rapidité de la montée des eaux, de la hauteur atteinte par la crue, des objets charriés par les eaux en crue et du comportement des victimes. Ensuite les risques sanitaires identifiés sont essentiellement d'ordre infectieux, neuropsychique et environnemental.

Les épisodes antérieurs à l'inondation de 2001, tant en Europe qu'à l'étranger, ont montré la faible probabilité d'apparition d'une épidémie au décours d'une inondation. Cependant, compte tenu des conditions de température, de climat et de la fragilité individuelle de chacun, certaines pathologies peuvent apparaître ou se développer. Les maladies suivantes sont classiquement identifiées pendant ou au décours d'une inondation.

Ce sont les maladies liées à une contamination de l'approvisionnement en eau de boisson dont l'ingestion peut provoquer des gastro-entérites, voire des hépatites virales, ou dans certains cas des typhoïdes. Localement des contaminations de captage par des produits chimiques industriels ou phytosanitaires peuvent être possibles à court, moyen ou long terme. Des stations de traitement des eaux usées peuvent être inondées voire détruites ainsi que des centres d'enfouissement technique générant des pollutions. La qualité des coquillages produits dans les étangs peut être affectée par les inondations.

Des maladies peuvent être liées à un contact direct avec des eaux polluées, à l'origine d'infections de plaies, de dermatoses, de conjonctivites ou de leptospirose (contamination de l'eau par des urines de rongeurs transmettant le germe).

L'humidité importante, associée éventuellement à un climat froid ou à des fluctuations de température, peut favoriser l'apparition d'infections respiratoires aiguës.

- Concernant la qualité des aliments :

Le déversement d'eaux contaminées par des matières fécales peut constituer une source de contamination des aliments au stade de la production primaire. Des épisodes de crues ont été associés à la contamination fécale de produits végétaux et ont été à l'origine d'épidémies d'origine alimentaire (certains végétaux étant consommés crus ou peu cuits, par exemple les cultures maraîchères) (voir Wachtel *et al.*, 2000a et b). La contamination des aliments peut être directe en cas de crue ou de ruissellement ou indirecte par la pollution des systèmes d'irrigation. Les cultures immergées telles que les cressonnières sont particulièrement vulnérables (InVS, 2003b).

Des stations de traitement des eaux usées peuvent être inondées voire détruites ainsi que des centres d'enfouissement technique générant des pollutions. Des épisodes de crues ou de débordement des réseaux d'assainissement, des lessivages d'effluents de décharge, etc..., , peuvent conduire à augmenter le niveau de contamination d'origine fécale des eaux littorales et ainsi contaminer les coquillages filtreurs des zones de production conchylicoles ou des gisements fréquentés pour la pêche à pied de loisir (Lesne *et al.*, 1995).

- Concernant la qualité des eaux destinées à la consommation humaine :

De fortes précipitations accroissent la turbidité des eaux de surface et par lessivage des sols, la présence de germes témoins de contaminations fécales et de micro-organismes pathogènes notamment par *Cryptosporidium* spp. et *Giardia* spp. dans les eaux. Ces constats rendent nécessaires le renforcement des filières de traitement des eaux destinées à la consommation humaine (renforcement du processus de coagulation et de filtration, ainsi que de l'étape finale de désinfection, voire de multiplication des installations de filtration lente, renforcement de l'équipement en turbidimètres automatiques et pour le traitement des parasites, d'installation de système de désinfection par ultra violet, compte tenu de leur efficacité sur certains parasites). Nota : Une simulation de coût pourrait être effectuée pour les captages situés en zones karstiques par exemple.

Localement des contaminations de captage par des produits chimiques industriels ou phytosanitaires peuvent être possibles à court, moyen ou long terme.

L'approvisionnement en eau est arrêté ou fortement perturbé, par défaillance des réseaux, contamination de la ressource et/ou rupture d'électricité. Une distribution d'eau embouteillée est en général mise en place rapidement.

- Concernant la qualité de l'habitat :

L'extrême humidité régnant dans les habitats va favoriser la prolifération de champignons et de moisissures ayant un rôle allergisant (cutané ou respiratoire) (voir Etzel, 2007). L'humidité importante régnant dans les habitations, associée éventuellement à un climat froid en hiver, peut favoriser l'apparition d'infections respiratoires aiguës.

Au retour dans les habitations en conditions hivernales, des moyens de chauffage de fortune peuvent être utilisés, pouvant entraîner des risques d'intoxication au monoxyde de carbone. Ce risque existe aussi du fait de l'utilisation de pompes avec moteur à combustion pour vider les caves inondées, si celles-ci ne sont pas mises à l'extérieur des habitations.

- Concernant les conséquences psychiques :

Au niveau des conséquences psychiques, on retrouve des manifestations à type de sidération, agitation, dépression pouvant aller jusqu'au suicide. Dans l'enquête de l'ORS sur les inondés de la Somme après deux ans, il ressort que les difficultés financières sont fréquentes du fait de remboursements insuffisants par les assurances, ainsi que l'apparition de troubles somatiques, d'anxiété et de dépression, avec une consommation de soin accrue. La détérioration de l'habitat a engendré des sentiments d'insécurité et de manque de protection. Les personnes inondées de plus de 60 ans, celles vivant seules ainsi que les femmes sont plus fragiles. Le fait d'avoir connu d'autres inondations constitue un facteur aggravant. L'InVS (Cire Sud) a également étudié les

conséquences psychologiques des inondations du Gard en septembre 2002, à partir des remboursements de médicaments psychotropes recueillis par l'Assurance maladie. Une augmentation du nombre de délivrances de traitements par psychotropes a été mise en évidence essentiellement dans les trois premières semaines suivant les inondations. En matière de prise en charge psychologique immédiate, les personnes au-delà de 50 ans ont semblé plus fragilisées, et particulièrement celles de 80 ans et plus. Le recours à un traitement antidépresseur après un traitement par anxiolytiques ou hypnotiques au décours des inondations concernait plus particulièrement les femmes en période de vie active et les hommes de 60 à 69 ans.

2.4.2. Coulée de boue, glissement de terrain

Avec le changement climatique, et notamment des pluies plus violentes, nous pourrions assister à des événements de coulée de boue ou de glissement de terrain plus fréquents, et affectant la santé des populations. Les événements de Vaison-la-Romaine en 1992 et de Nîmes en 1988 dans le sud de la France ont marqué les populations locales, comme à Vaison-la-Romaine où la catastrophe fit 32 morts, 41 victimes dans le nord du département de Vaucluse et 46 en tout dans la région. Plus de 500 communes furent déclarées sinistrées et l'on décompta plus de 3 milliards de francs de dégâts matériels. Ces événements pourraient être plus marqués et plus fréquents à l'avenir, notamment dans certaines zones géographiques comme les Cévennes et régions limitrophes en métropole avec les pluies cévenoles, ou dans les COM-ROM comme en Guyane où le flanc d'une colline s'était éboulée en 2000, tuant 10 personnes. En dehors des morts qu'ils occasionnent à leur passage, ces événements auront aussi des impacts aujourd'hui difficilement quantifiables sur la psychologie des populations (traumas post-événement, inquiétudes, malaises,...).

2.4.3. Humidité et chaleur

- Concernant les dangers microbiologiques et les vecteurs :

À court terme, les dangers microbiologiques découlant d'événements de fortes précipitations et d'un accroissement de l'humidité et de la chaleur concernent les maladies à transmission hydrique véhiculées par l'eau stagnante (choléra, typhoïde), les maladies parasitaires telles que la leptospirose suite à la pullulation de rats en cas d'événement majeur comme les cyclones ou les ouragans, et la recrudescence des maladies vectorielles (paludisme, dengue, Chikungunya, virus West Nile, fièvre de la vallée du Rift, etc...) du fait de la pullulation des moustiques et de l'existence de nombreux gîtes larvaires dans les zones de forte humidité. Ce point a été développé précédemment au 2.2.8.

- Concernant la qualité de l'air :

Par ailleurs, humidité et chaleur sont également les conditions idéales au développement et à la croissance des moisissures. En cas d'accroissement des événements de fortes précipitations sous nos latitudes, il existe un risque de prolifération des moisissures dans l'air extérieur et dans l'air intérieur des habitations individuelles et des bâtiments collectifs. Les principales espèces en cause sont *Penicillium*, *Aspergillus*, *Cladosporium* et *Epicoccum*. Celles-ci sont régulièrement associées à des pathologies irritatives et immunologiques, aiguës et chroniques, pouvant conduire à des pathologies graves, voire mortelles (CSHPF, 2006 ; Boutin-Forzano, 2006 ; Lee et Jo, 2006). En cas d'augmentation de la température, l'installation des systèmes de ventilation et de climatisation vont se développer dans les habitats individuels et les bâtiments professionnels. Ces systèmes constituent une source importante d'apport en moisissures : les filtres mal entretenus sont à l'origine d'une introduction, dans l'air intérieur, de spores provenant de l'air extérieur ; les systèmes de refroidissement et de condensation, dans lesquels il subsiste une forte humidité, sont des milieux propices au développement des moisissures (Li et Kuo, 1992 ; Liu *et al.*, 1995 ; Meklin *et al.*, 1995 ; Reponen *et al.*, 1992 ; Wake *et al.*, 1995). Il est à noter que la

décontamination de ces systèmes, au moyen de désinfectants souvent drastiques (produits chlorés, dérivés du formaldéhyde, etc.), peut donner lieu à des intoxications secondaires.

- Concernant la qualité des aliments :

Le risque de contamination fongique pourrait s'accroître (cf. remarques développées au chapitre 2.2.8)

2.5. Augmentation de l'activité des tempêtes et cyclones (Outre Mer)

Le risque de survenue de tempêtes et cyclones est sous surveillance, mais les données sur le changement climatique ne font pas ressortir une augmentation de leur fréquence. Il faut toutefois souligner la possibilité selon certains modèles d'étude de voir parmi les cyclones survenant en Outre Mer plus de cyclones forts. Leurs effets sont dévastateurs et coûteux pour l'économie. Il s'agit des Antilles, où la saison cyclonique s'étend de juillet à octobre, avec une période plus active du 15 août au 15 octobre. L'ensemble des communes de la Guadeloupe et de la Martinique est exposé au phénomène cyclonique, et plus particulièrement aux effets des vents dévastateurs et aux fortes précipitations. On peut citer récemment l'ouragan Dean le 17 août 2007 en Martinique. Ce niveau de cyclone est des plus dévastateurs puisque les vents pouvaient osciller entre 209 km/h et 249 km/h. En conséquence, il est retenu de reprendre les effets sur la santé bien décrits dans le bulletin d'alerte et de surveillance de l'InVS-Cire Antilles-Guyane.

Les dangers sont différents pour l'immédiat, le court terme et le moyen terme.

Les dangers immédiats sont les décès par accidents et traumatismes, et indirects par impossibilité de recours aux structures de soins d'urgence. Il faut noter pour Dean les arrachages de toitures, de baies vitrées détruites, de chutes d'arbres, de poteaux et panneaux publicitaires, et de coupures de courant. Il peut s'agir aussi de décompensations aiguës de pathologies chroniques liées au stress du cyclone ou au non recours possible au système de soins. Concernant Dean, 2 décès de personnes âgées par crise cardiaque ont été répertoriés dans les Antilles françaises.

À court terme, concernant l'ouragan Dean, environ 200 maisons ont été détruites et 1500 ont été partiellement touchées. Le lendemain du cyclone, 110000 personnes étaient privées d'électricité, 60% de la population n'avait pas accès à l'eau courante et environ 600 personnes avaient été regroupées dans des foyers d'hébergement d'urgence. Les dangers à anticiper sont les maladies à transmission hydrique, d'origine alimentaire, à transmission interhumaine (maladies cutanées, des voies respiratoires et entériques) dans les foyers d'hébergement, compte tenu de la promiscuité. Il faut noter la recrudescence souvent de dengue due à la pullulation de moustiques suite à l'existence de nombreux gîtes larvaires causés par les déchets du cyclone. Ces déchets permettent aussi la pullulation de rats, source de leptospirose.

Les blessures et morsures de serpent sont liées aux activités de déblaiement avec des conséquences possibles de tétanos chez les personnes mal vaccinées. Les brûlures sont en rapport avec l'utilisation de combustible pour le brûlage des déchets. On peut aussi avoir des intoxications au monoxyde de carbone du fait d'une utilisation inadaptée de groupes électrogènes.

À court et moyen terme, les autres dangers sont les problèmes psychologiques (dépressions, nervosité, ...). Ils peuvent apparaître dès les premières heures suivant le cyclone et peuvent perdurer plusieurs semaines, voire plusieurs mois.

Il faut aussi souligner ici qu'après l'ouragan Katrina en 2005 dans l'état de Louisiane, les CDC et la Food and Drug Administration nord-américains se préparaient à un fort risque de maladies infectieuses transmises par l'eau ou véhiculées par les moustiques pouvant proliférer dans les eaux stagnantes. Les autorités craignaient le choléra, la typhoïde, ainsi que la fièvre West Nile. Les conséquences en termes infectieux ont été bien moindres que celles annoncées, et il semble que, dans ce genre de situations, le péril infectieux semble toujours sur-estimé, à moins que les mesures de contrôle ne viennent enrayer leurs effets (voir la synthèse intéressante sur le sujet par Nasci et Moore, 1998 sur les conséquences de désastres naturels et leurs impacts sur les maladies vectorielles aux États-Unis). L'analyse menée par Piarroux et Bompangue (2007) sur 600 catastrophes naturelles va dans le même sens d'une quasi-absence de catastrophes épidémiques.

En zones inter-tropicales notamment, comme cela peut être le cas dans certains COM-ROM français, l'augmentation des crues peut engendrer la constitution de surfaces stagnantes propices au développement de larves de vecteurs (et notamment de ceux qui transmettent la dengue), et ce scénario est invoqué pour expliquer les épidémies de paludisme le long du fleuve Maroni en Guyane française. Enfin, les fortes inondations au Bangladesh sont en partie responsables d'une plus grande transmission de maladies eau-portées comme le choléra par exemple (Rodo *et al.*, 2002).

Les conséquences des ouragans Katrina et Rita sur l'écologie microbienne des sols dans la région de la Nouvelle-Orléans aux USA ont été étudiées, montrant une très nette augmentation de micro-organismes d'origine fécale issus des systèmes d'évacuation des eaux usées de l'agglomération, même si on n'a pas assisté à des épidémies comme on pouvait le redouter dans la population humaine (Sinigalliano *et al.*, 2007).

Nous n'avons pas de retours d'expérience et d'étude épidémiologique pour la France donnant des évaluations quantitatives des effets sur la santé des activités de tempêtes et d'ouragans, et permettant d'identifier aujourd'hui les personnes les plus fragiles.

Enfin, il apparaît dans une étude australienne, que le niveau d'incidence de mélioidose due à la bactérie *Burkholderia pseudomallei* est associé avec le phénomène d'aérosols et de transport aérien de cette bactérie vers les populations durant les épisodes de fortes tempêtes (Currie et Jacups, 2003).

2.6. Augmentation de la fréquence d'élévation du niveau de la mer

La France est un pays largement littoral et donc concerné par l'élévation du niveau de la mer. L'administration de la santé ne dispose pas de données sur le nombre d'habitants directement concernés par cette élévation. Toutefois il est probable que les nécessités d'abandon de domicile aient des conséquences psychologiques, sans que cela soit renseigné, à l'instar de ce qui a été évoqué précédemment pour les mouvements de sols.

L'augmentation de la fréquence d'élévation du niveau de la mer a été discutée comme un paramètre important dans la survenue de crises épidémiques de choléra au Bangladesh (voir Borroto, 1998 pour une synthèse). Les reflux d'eaux côtières à l'intérieur des estuaires des fleuves du Bangladesh entraînent un ensemble de particules en suspension dont des bactéries et des virus aquatiques, ou leurs hôtes. Il est difficile à l'heure actuelle d'extrapoler cette information au territoire français métropolitain (zones deltaïques notamment).

3. Retours d'expérience et d'observation

3.1. La vague de chaleur de 2003

3.1.1. Mortalité

L'été 2003 fut le plus chaud qu'ait connu la France depuis les années 1950. Une période caniculaire d'une intensité exceptionnelle est survenue durant la première quinzaine du mois d'août. Cet épisode s'est accompagné d'une pollution par l'ozone importante tant en durée qu'en intensité. Le nombre des décès en excès par rapport aux années précédentes a été estimé à 14800 entre le 1^{er} et le 20 août 2003, soit une augmentation de 60% par rapport à la mortalité attendue. L'ensemble de la France a été touché, et globalement la surmortalité a davantage concerné les zones urbaines.

L'analyse de la mortalité a montré que les personnes âgées (75 ans et plus) et très âgées étaient les principales victimes. Chez les sujets de moins de 45 ans, seules les causes de décès directement liées à la chaleur et les états morbides mal définis ont augmenté, et uniquement chez les hommes.

Entre le 1^{er} et le 20 août 2003, les causes médicales de décès qui ont eu le plus grand poids dans l'augmentation générale de la mortalité étaient les causes directement liées à la chaleur : coup de chaleur, hyperthermie et déshydratation (+ 3306 décès), les maladies cardiovasculaires (+3004), les symptômes et états morbides mal définis (+ 1741) et les maladies de l'appareil respiratoire (+1365) et du système nerveux (+1001).

Trois groupes de causes de décès ont été distingués chez les sujets de 45 ans et plus :

- Les causes directement liées à la chaleur (coup de chaleur, hyperthermie et déshydratation) dont l'augmentation relative a été massive (nombre de décès multiplié par 20 ou plus selon l'âge et le sexe) ;
- Les autres causes pour lesquelles la surmortalité a été extrêmement marquée : maladies du système nerveux, troubles mentaux, maladies de l'appareil respiratoire (incluant les pneumonies), maladies infectieuses, maladies de l'appareil génito-urinaire, maladies endocriniennes et états morbides mal définis ;
- La quasi-totalité des autres causes médicales ont progressé mais d'une manière moins prononcée.

À partir de 45 ans, les progressions relatives des causes de décès ont été plus importantes chez les femmes que chez les hommes. Cette surmortalité féminine est statistiquement significative :

- entre 45 et 74 ans pour les cancers du poumon et les morts violentes ;
- à partir de 75 ans pour les maladies infectieuses, génito-urinaires et cardiovasculaires.

Une surmortalité a également été observée chez les garçons de moins de 1 an. Cette surmortalité significative de 29% chez les jeunes enfants concernait peu de décès sur l'ensemble de la France (+ 25) et doit donc être interprétée avec précaution. Elle doit cependant rappeler que, malgré les mesures de protection dont ils sont entourés, les très jeunes enfants sont des sujets à risque lors d'une vague de chaleur.

Enfin, il faut souligner qu'il n'y a eu ni surmortalité, ni effet moisson consistant au cours des quatre derniers mois de 2003. Les décès en excès de la vague de chaleur ne peuvent donc être considérés comme des décès anticipés de personnes âgées et fragiles qui seraient de toute façon décédées dans les jours, les semaines voire les premiers mois après la vague de chaleur.

3.1.2. Facteurs de risque

Des études cas-témoins chez les personnes âgées résidant à domicile et en institution ont permis de mettre en évidence des caractéristiques significativement liées au décès, notamment le degré d'autonomie, les antécédents médicaux, les caractéristiques liées à l'habitat et à l'urbanisme, les comportements d'adaptation à la vague de chaleur. Concernant les personnes âgées de 65 ans et plus résidant à domicile, les principaux facteurs de risque étaient la catégorie socioprofessionnelle (ouvrier), le degré d'autonomie (personnes confinées au lit, besoin d'aide pour se lever ou s'habiller), l'existence de pathologies (maladies neurologiques, cardiovasculaires, psychiatriques), tandis que les comportements d'adaptation à la canicule étaient des facteurs protecteurs (se vêtir moins que d'habitude, utiliser des moyens de rafraîchissement). Les personnes résidant sous les toits ou dans des immeubles anciens sans travaux d'isolation avaient également plus de risque de décéder que les autres, et la température des surfaces dans l'environnement proche du domicile, mesurée par satellite, a montré que chaque degré supplémentaire correspondait à un risque presque doublé de décéder.

En institution, les facteurs de risque retrouvés étaient le sexe (les hommes ayant un risque plus élevé de décéder que les femmes), le manque d'autonomie, les pathologies (dénutrition, escarres, Parkinson, insuffisance rénale, antécédents de cancers) et la prise de certains médicaments, tandis que les contacts sociaux (participation aux activités de groupe, sorties hors de l'établissement) étaient des facteurs protecteurs. Le fait d'avoir une chambre sous les toits, une fenêtre orientée vers l'est ou plus d'une ouverture à la chambre étaient des facteurs de risque, tandis que les comportements adaptatifs étaient protecteurs (accès à la climatisation, consommation de boissons non alcoolisées, douches, sorties de l'établissement).

3.1.3. Interactions température / pollution atmosphérique

Concernant les liens entre température et pollution atmosphérique, une étude réalisée dans plusieurs villes a montré que les effets conjoints de l'ozone et de la température étaient différents selon les villes, et que les parts relatives de ces effets différaient d'une ville à l'autre. Dans les villes où les plus fortes surmortalités ont été observées, la part de l'ozone dans l'excès de décès était minimale (par exemple 2,57% à Lyon contre 97,43% pour la température), tandis que dans les villes à surmortalité plus faible, l'excès de risque de décès pouvait être expliqué davantage par les deux facteurs (environ 50% pour chacun à Marseille).

3.1.4. Plan National Canicule

Ces études ont permis de mettre en place des mesures de gestion et de prévention détaillées dans le Plan National Canicule. Elles concernent notamment des indications à prendre dans les établissements d'hébergement des personnes âgées dépendantes, des informations à destination des professionnels de santé et des conseils de comportements grand public. Un système d'alerte a également été développé pour identifier les vagues de chaleur et déclencher des actions de prévention. Enfin, la veille sanitaire sur les données de santé non spécifiques (activité hospitalière et mortalité) s'est développée pour permettre de suivre l'évolution des événements et d'en estimer rapidement l'impact.

3.2. La vague de chaleur de 2006

Du 11 au 28 juillet 2006, une vague de chaleur a touché une grande partie de la France. Il s'agit de la vague de chaleur la plus sévère observée en France après celle de 2003, et la première pour laquelle les systèmes d'alertes, de prévention et de gestion développés après 2003 ont pu être appliqués.

Par rapport à 2003, la vague de chaleur de 2006 a été plus longue mais moins intense et moins étendue géographiquement. Il est donc difficile de comparer directement ces deux événements qui

interviennent dans un contexte météorologiques et social différents. Cependant, il a été possible de quantifier la surmortalité que l'on aurait pu observer en juillet 2006, si le lien entre la température et la mortalité avait été identique à celui observé sur la période 1975-2003 et de comparer cette surmortalité attendue à la surmortalité effectivement observée. Ce travail de modélisation a été réalisé par l'Inserm en s'appuyant sur les données disponibles de 1975 à 2002 puis en appliquant les relations ainsi obtenues à la vague de chaleur de 2006.

Du 11 au 28 juillet 2006, l'excès de mortalité observé pour l'ensemble de la population a été de 2065 décès, soit une augmentation de 9 % de la mortalité. La surmortalité attendue par le modèle a été estimée à 6 452 décès, soit une augmentation de la mortalité de 27%. Ainsi, l'écart entre les nombres de décès observé et attendu si le lien entre les températures et la mortalité en 2006 était identique à celui de la période 1975-2003, est de - 4 387 décès sur les 18 jours de la vague de chaleur.

On peut observer cette différence comme une réduction de la vulnérabilité de la population aux vagues de chaleur, attribuable :

- à la prise en compte des risques liés aux chaleurs estivales excessives par la population de la France métropolitaine depuis la vague de chaleur d'août 2003 ;
- aux mesures de prévention des risques liés aux chaleurs estivales excessives mises en place par les pouvoirs publics et différentes institutions depuis la vague de chaleur d'août 2003 ;
- et au système de surveillance et d'alerte des vagues de chaleur mis conjointement en place par l'InVS et Météo-France depuis juin 2004.

Concernant la morbidité, l'évolution des pathologies rencontrées dans les services d'urgences en période de canicule et l'évolution de l'activité de ces structures d'accueil dans une telle situation ont été estimés sur la base du Réseau Oscour, qui enregistre quotidiennement des données individuelles et anonymes en provenance de 49 services d'urgences en France. Ces données ont montré une augmentation significative des passages pour hyperthermies, malaises, déshydratations et hyponatrémies chez les personnes âgées. Le nombre de passages quotidiens n'a pas significativement augmenté pour l'ensemble de la population mais seulement pour les personnes âgées. Ces premiers résultats ont montré qu'il reste nécessaire de poursuivre et d'adapter la prévention à la population la plus touchée par la chaleur.

Les résultats issus du modèle de l'Inserm permettent de penser que la relation entre température et mortalité évolue rapidement, la population s'adaptant au risque de vague de chaleur. Les mesures mise en place à travers le Plan National Canicule semblent avoir permis de réduire de manière importante l'impact d'une vague de chaleur mais sans l'éliminer complètement, et l'impact observé tant sur la mortalité que sur la morbidité montre qu'il reste nécessaire de poursuivre et d'adapter la prévention à la population la plus touchée par la chaleur.

4. Conclusion et synthèse

Le changement climatique est de plus en plus admis à l'échelle mondiale. Il affecte la santé et le bien être des populations. Pour de nombreux spécialistes les répercussions sur la santé (mortalité et perte de qualité de vie) pourraient surpasser tous les autres effets, et les impacts sanitaires font aujourd'hui partie des impacts les plus redoutés. Si certaines implications du changement climatique pourraient s'avérer bénéfiques, comme la mortalité due au froid qui pourrait baisser durant des hivers de plus en plus doux, la plupart du changement aurait des conséquences néfastes selon la majorité des experts.

La première des conséquences néfastes est celle liée à l'augmentation du nombre ou de l'intensité des phénomènes extrêmes (canicule, inondations, ouragans notamment), laquelle s'accompagne de nombreux décès prématurés.

Les effets d'une canicule sur la santé ont longtemps été sous-estimés. Cependant, la canicule de 2003 a provoqué 14800 décès en excès dont les causes principales sont liées à un impact direct de la chaleur sur la physiologie de l'organisme humain (coups de chaleur, déshydratation aiguë, accidents cardiovasculaires et cérébrovasculaires). La décision consécutive d'une mise en place d'un Plan National Canicule (PNC) avec des mesures d'alerte, de prévention et de gestion adaptées dès 2004 et une implication directe des collectivités locales⁵ a permis d'améliorer la prévention et la gestion des vagues de chaleur sur la santé. Néanmoins, la surmortalité constatée de 2065 décès lors de la canicule de 2006 met en évidence l'intérêt de maintenir voire d'améliorer cette prévention.

Par ailleurs, les effets sur la santé des inondations en métropole et des ouragans dans les COM-ROM n'ont toujours pas fait l'objet de mesures équivalentes au niveau national⁶. Les conséquences sanitaires liées aux phénomènes extrêmes toucheront très différemment les divers milieux sociaux et culturels (personnes âgées, en situation de précarité, personnes seules ou isolées).

L'amélioration des connaissances sur ces événements sera donc nécessaire pour orienter les politiques de prévention et de gestion.

Indépendamment des phénomènes extrêmes, la tendance générale sera aux hivers plus doux et humides, aux printemps plus précoces et aux étés plus longs, chauds et secs. Ces modifications climatiques bouleverseront très probablement le fonctionnement de nos écosystèmes. **Les impacts sanitaires seront probables, tout particulièrement dans les zones géographiques où l'on sera en présence ou à proximité de présence d'eau** (eau de mer ou eau douce).

Concernant les micro-organismes pathogènes, les bactéries *Vibrio* spp et *Aeromonas* spp. peuvent se développer à la faveur d'une augmentation de 1 à 2°C de l'eau de mer, et ainsi augmenter le potentiel de transmission à l'homme. Par ailleurs, la douceur du climat pourrait favoriser le développement de vecteurs de maladies. L'exemple de la propagation du virus West Nile est particulièrement probant. Les vecteurs de cet arbovirus sont des insectes (principalement des moustiques) et son réservoir habituel est constitué de différentes espèces d'oiseaux. En France, le virus véhiculé par les oiseaux migrateurs a été détecté pour la première fois au début des années 1960 en Camargue. Une augmentation des températures et un radoucissement du climat hivernal pourraient favoriser la survie des espèces vectrices et amplificatrices du virus comme les moustiques, mais aussi modifier la durée et les trajets des oiseaux migrateurs, réservoirs naturels du virus, en allongeant la période pendant laquelle certaines espèces d'oiseaux se sédentarisent en France. De telles conditions favoriseraient l'endémisation du virus. Les migrations transcontinentales d'espèces d'oiseaux, réservoirs naturels du virus, pourraient aussi être affectées, conduisant à une modification de la dispersion naturelle du virus. D'autres exemples pourraient être cités faisant intervenir d'autres vecteurs, comme la prolifération des

⁵ Le PNC comprend des indicateurs biométéorologiques, un dispositif d'alerte à 3 niveaux, des actions modifiant les comportements, comme l'accès à un lieu climatisé, la prise de douches, la consommation accrue de boissons non alcoolisées, le fait de se vêtir plus légèrement.

⁶ Cependant, il existe une étude sur les inondés de la Somme de 2001 réalisée deux ans après par la CIRE et montrant des risques psychologiques graves avec une perte de qualité de vie et une consommation de médicaments (anxiété, dépression voire suicide) qui pourrait constituer un préalable à la prévention.

arthropodes et tout particulièrement des tiques. La distribution des phlébotomes (insectes vecteurs de la leishmaniose) pourrait être modifiée tant en latitude qu'en altitude, et des éléments démontrent aujourd'hui un élargissement de l'aire de distribution des vecteurs et de cas de cette parasitose. La pathogénicité de la leptospire pourrait aussi être directement affectée par le changement climatique.

Une variation des températures et des régimes de précipitations modifiera les aires de répartition des maladies transmises par des insectes, des tiques, et des réservoirs. **Ces effets seront plus marqués en bordure des zones endémiques, comme pour plusieurs COM-ROM français**, et en particulier les Antilles et la Guyane, dont il faut aujourd'hui se préoccuper.

D'autres facteurs, comme les échanges économiques et les transports, mais pas uniquement, pourraient être responsables de l'introduction de nouveaux agents pathogènes (infectieux et non infectieux comme l'algue *Ostreopsis ovata*) en France, qui trouveraient ensuite les conditions locales favorables à leur prolifération.

Une augmentation de la température de l'eau peut favoriser l'accélération de la prolifération d'algues dont certaines libèrent des toxines dans le milieu aquatique. Ces toxines peuvent être nocives pour les baigneurs, et s'accumuler dans les coquillages filtreurs, mais aussi les poissons planctonophages.

Les régions touchées actuellement par la sécheresse le seront encore plus. Cela aura un impact sur l'alimentation en eau destinée à la consommation humaine tant en terme quantitative que qualitative de l'eau distribuée. Aujourd'hui, la France compte 26572 captages d'eau souterraine avec 95% d'entre eux produisant moins de 200 m³/jour. Ils sont fragiles. De ce fait, il faudra sans doute limiter les volumes d'eau consommée, renforcer la protection des captages, adapter les filières de traitement d'eau, utiliser d'autres ressources, développer les interconnexions de réseaux et probablement généraliser les plans de secours en eau potable.

Concernant la qualité de l'air, peuvent aussi être signalés des risques de recrudescences des maladies respiratoires du fait d'une augmentation de concentrations de pollens dans l'air, une durée plus longue de la pollinisation, une migration des pollens du sud vers le nord de la France. Par ailleurs, des vents faibles ou nuls sur de longues périodes sont des conditions propices à une stagnation des polluants dans l'air des basses couches atmosphériques dont les effets sanitaires sont plus marqués chez les sujets âgés et les enfants. L'humidité et la chaleur sont des facteurs de développement de nombreux champignons microscopiques dont le réservoir naturel se trouve à l'extérieur. Les matériaux de construction des habitats constituent un support de choix pour leur croissance. Il faut mentionner les effets amplificateurs possibles que peuvent avoir les mesures d'atténuation prises sur le bâti concernant l'isolation qu'il reste à évaluer, ainsi que la qualité de l'air intérieur et l'impact des inondations.

Concernant la qualité des aliments, le risque est probable d'avoir une contamination microbiologique accrue (en particulier bactérienne et fongique) des produits alimentaires d'origine animale ou végétale. Cela pourrait par exemple nécessiter un renforcement de la surveillance de la chaîne du froid, du producteur au consommateur. Un accroissement de l'usage de produits phytosanitaires pour contrer le développement de champignons sur les végétaux et prévenir la formation des mycotoxines dans les produits secs est possible. Enfin, le développement de certains risques alimentaires émergents, notamment dans les produits de la mer ou les produits aquatiques (ex. : *Vibrio* spp, phytoplancton toxique, cyanobactéries), est également probable.

Enfin des modifications du comportement humain sont envisageables, comme :

- Un développement du nombre de piscines ou réserves d'eau dans l'habitat périurbain ou rural et une intensification de systèmes d'arrosage ou d'irrigation, avec développement de points d'eau stagnante résiduelle pouvant favoriser la multiplication d'insectes vecteurs d'arboviroses ;
- Un développement des sorties à l'extérieur exposant plus aux rayonnements U.V., favorisant les contacts avec la nature (promenade en forêt, baignades, pique-nique) pour les humains et animaux de compagnie. Ceci pourrait voir augmenter des maladies dues aux contacts directs (tularémie) avec la faune sauvage, ou indirects (fièvre boutonneuse ou borréliose de Lyme par les morsures de tiques). La multiplication des

baignades risque d'augmenter le nombre de leptospiroses observé. L'intensification des pique-niques, en augmentant le risque de rupture de la chaîne du froid, pourrait favoriser le développement de bactéries pathogènes dans l'alimentation, comme les staphylocoques, les salmonelles ou les listérias, et ainsi augmenter le nombre de maladies d'origine alimentaire.

Quoi qu'il en soit, une volonté de réduction des risques doit être affirmée de manière **globale** et s'insérer pleinement dans une politique plus générale de développement durable. Ainsi, les politiques de gestion devront être intégrées à l'ensemble des décisions (lutte contre les inégalités, énergie, aménagement du territoire,...) et prendre en compte tous les facteurs influant le danger ciblé par les mesures (facteurs climatiques, écologiques, biologiques, socio-économiques,...). Les bénéfices attendus des solutions développées dépasseront la seule sphère de l'adaptation aux modifications climatiques. Il reste néanmoins indéniable que cette approche globale sera à adapter au contexte local. L'action des collectivités locales s'inscrit dans ce cadre de déclinaison des politiques en tenant compte des particularités régionales. L'exemple de la canicule montre bien qu'une même température n'a pas le même impact sanitaire si elle est observée à Paris, en Bretagne ou en PACA.

La surveillance de l'environnement, de l'état de santé de la population, les retours d'expérience et les études épidémiologiques à partir d'indicateurs et de seuils sont indispensables afin d'anticiper les conséquences sanitaires d'une part et d'assurer une prise de décision adaptée et proportionnée d'autre part.

D'autres moyens seraient à rechercher, comme l'information du public et des professionnels de santé, l'intégration de la prévention santé dans les autres secteurs de développement économique, les contrôles, la réglementation, le développement des compétences, la recherche.

Au terme de ce rapport, il convient de rappeler que **beaucoup de données demeurent encore ignorées**, notamment dans le domaine infectieux et dans les zones géographiques des COM-ROM, et que les conséquences des **changements climatiques toucheront très différemment les divers milieux socio-économiques, culturels et géographiques nationaux** (métropole, régions et communautés d'outre-mer).

Ce rapport a vocation à être complété par un premier volet donnant des éléments de coûts de certains phénomènes météorologiques extrêmes puis d'un second volet pour la fin de l'année 2008 sur les préconisations de mesures d'adaptation, d'études et de recherches en matière de santé après la saisine du Haut Conseil de Santé Publique (HCSP).

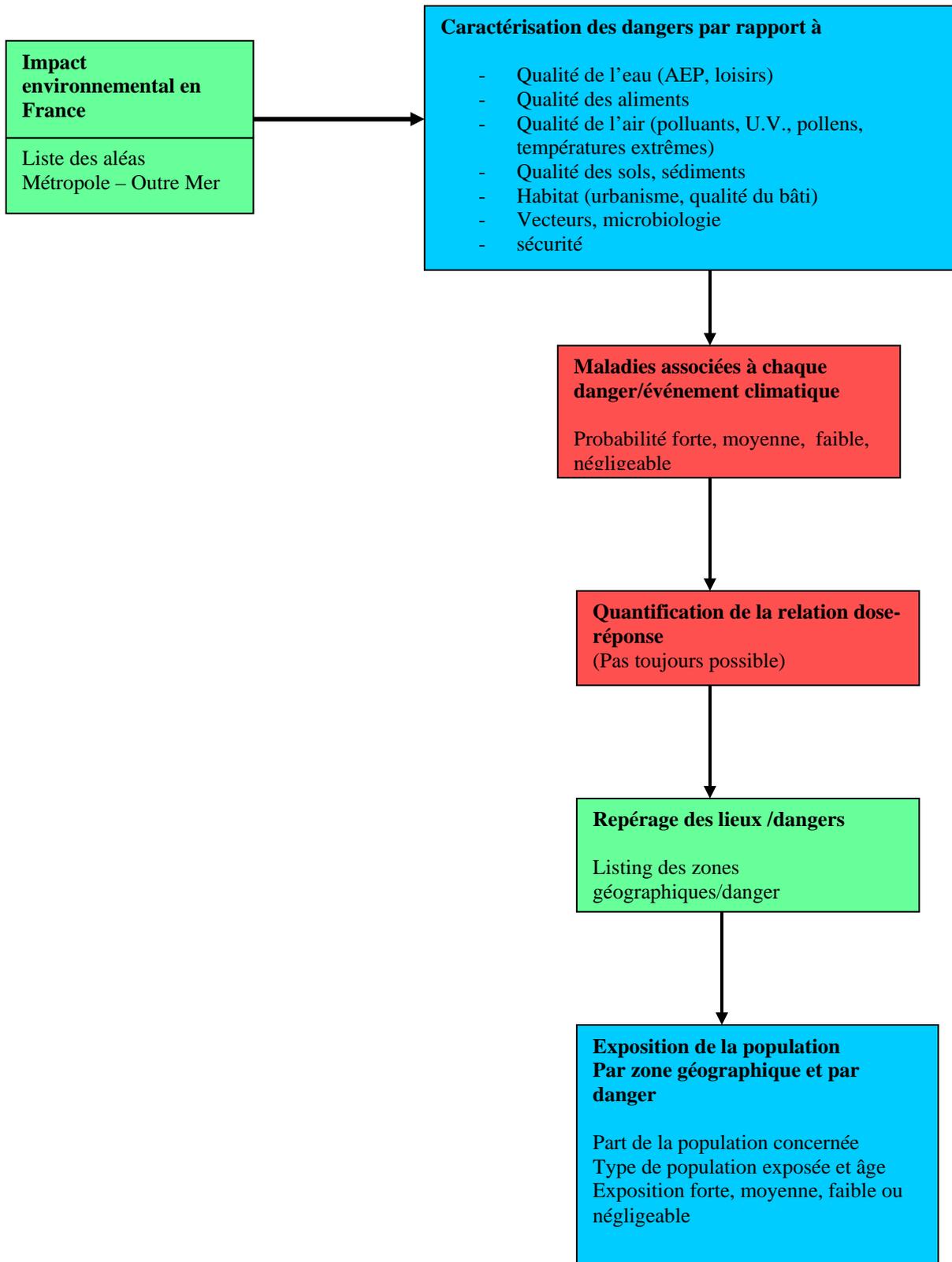
Liste des acronymes et sigles

AFSSA : Agence française de sécurité sanitaire des aliments
AFSSET : Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail
BPCO : la broncho-pneumopathie chronique obstructive
CDC : Centers for Disease Control and Prevention
Cire : Cellule interrégionale d'épidémiologie
CNPE : centrales nucléaires de production d'énergie
COM : Collectivité d'Outre-Mer
ROM : Région d'Outre-Mer
CSHPF : Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France
DGAS : Direction Générale de l'Action Sociale
DGS : Direction Générale de la Santé
DHOS : Direction de l'Hospitalisation et de l'Organisation des Soins
DMLA : dégénérescence maculaire liée à l'âge
DSS : Direction de la Sécurité Sociale
EHESP : Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique
ENSO : El Nino Southern Oscillation
FAB : facteur d'amplification biologique
FAR : facteur d'amplification de radiation
GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
HCSP : Haut Conseil de la Santé Publique
Ifremer : Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer
InVS : Institut (national) de Veille Sanitaire
IRD : Institut de Recherche pour le Développement
MEDAD : Ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables
NRPB : National Radiological Protection Board
OMS : Organisation Mondiale de la Santé
ONERC : Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique
ORS : Observatoire Régional sur la santé
Oscour (Réseau) : organisation de la surveillance coordonnée des urgences
PACA (région) : Provence-Alpes-Côte d'Azur
PCDD/Fs : polychlorodibenzodioxines et furanes
PNC : Plan National Canicule
PSAS : Programme de surveillance Air et Santé
RNSA : Réseau National de Surveillance Aérobiologique

Annexe 1

Démarche concernant l'évaluation des impacts du changement climatique sur la santé

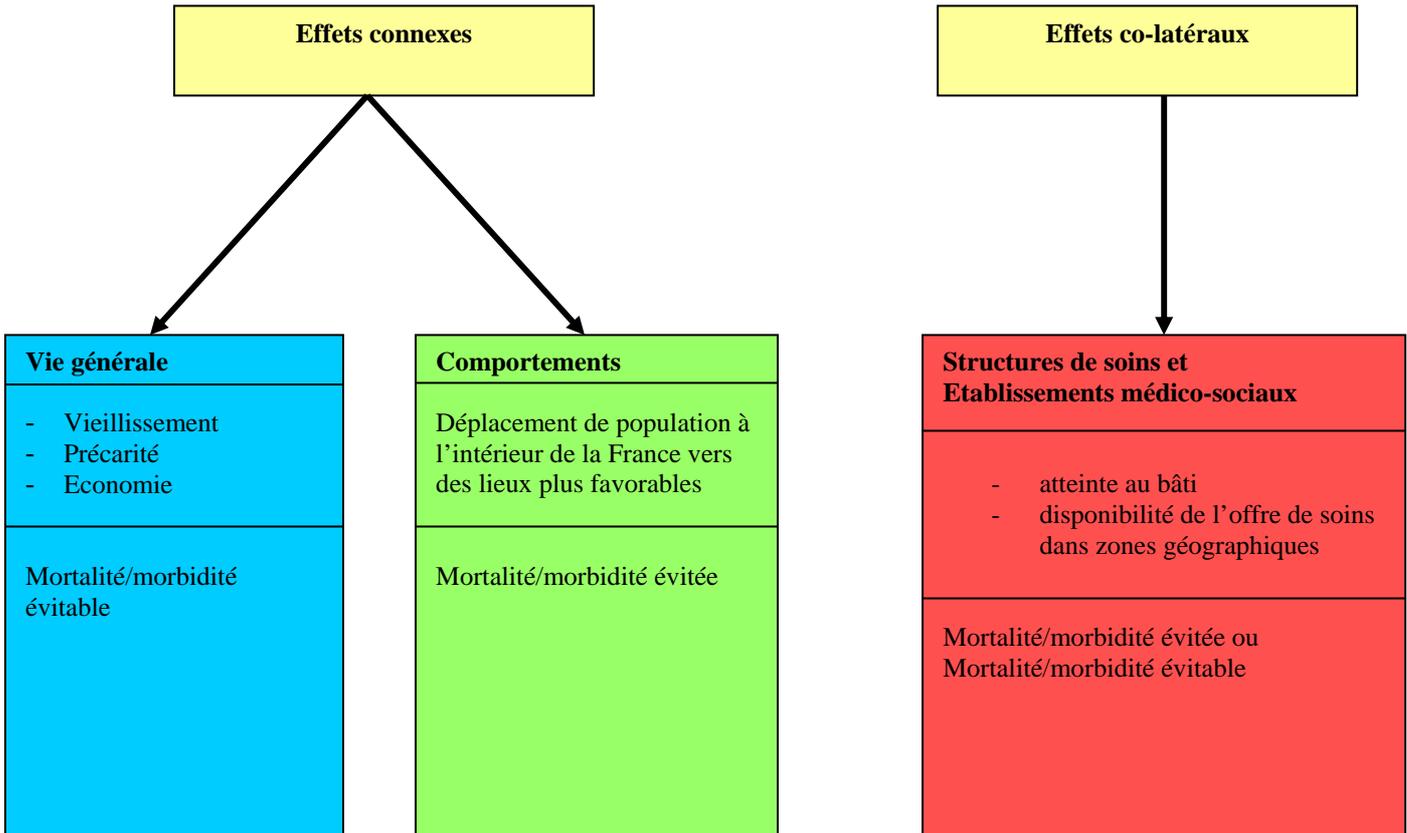
Impacts directs



ANNEXE 1 SUITE

Effets indirects

Sur l'exposition de la population française



Annexe 2 : Références bibliographiques

- Afssa (2008). Rapport synthétique Afssa. Evaluation des risques liés à la présence de mycotoxines dans les chaînes alimentaires humaines et animales. Décembre 2006. Rapport complet à paraître en 2008.
- Afssa (2005). Rapport sur l'évaluation du risque d'apparition et de développement des maladies animales compte tenu d'un éventuel réchauffement climatique. Avril 2005
- Agence de la santé et des services sociaux du Québec, fiche santé et environnement inondation ; Analyse épidémiologique de la mortalité due à la canicule de l'été 2003 et des facteurs de risque qui lui sont associés, INSERM 20 décembre 2007 de Denis Hemon et Eric Jouglu.
- Anderson HR. A systematic review of the epidemiological literature on the short-term health effects of outdoor air pollution. London : St George's Hospital, 2002.
- Angelini, R., Finarelli, A.C., Angelini, P. *et al.* (2007). Chikungunya in north-eastern Italy : a summing up of the outbreak. *EuroSurveillance* **12**: E071122.2.
- Anis, E., Leventhal, A., Elkana, Y., Wilamowski, A., and Pener, H. (2001). Cutaneous leishmaniasis in Israel in the era of changing environment. *Public Health Rev.* **29**: 37-47.
- Anyamba, A., Chrétien, J.-P., Small, J., Tucker, C.J., and Linthicum, K.J. (2006). Developing global climate anomalies suggest potential disease risks for 2006 – 2007. *International Journal of Health Geographics* **5**: 60.
- Borroto, R.J. (1998). Global warming, rising sea level, and growing risk of cholera incidence: a review of the literature and evidence. *GeoJournal* **44**: 111-120.
- Bouma, M. J., and Dye, C. (1997). Cycles of malaria associated with El Niño in Venezuela. *JAMA* **278**: 1772-1774.
- Boutin-Forzano S, Kadouch-Charpin C, Hammou Y *et al.*, Moisissures domestiques, mycotoxines et risques sanitaires, Synthèse, 2006 ; 5 ;383-389.
- Breed, A.C., Field, H.E., Epstein, J.H., Plowright, R.K., and Daszak, P. (2007). Emerging henipaviruses and flying foxes - Conservation and management perspectives. *Biological Conservation* **3**: 453.
- Campbell-Lendrum, D., Kovats, R.S., McMichael, A.J., Corvalan, C., Menne, B., and Pruss-Ustun, A. (non daté). The Global Burden of Disease due to climate change: quantifying the benefits of stabilization for human health, Organisation Mondiale de la Santé, 6p.
- Capelli, G., Baldelli, R., Ferroglio, E. *et al.* (2004). Monitoring of canine leishmaniasis in northern Italy: an update from a scientific network. *Parassitologia*: **46**: 193-197.
- Casimiro, E., Calheiros, J., Santos, E.D., *et al.* (2006). National assessment of human health effects of climate change in Portugal: approach and key findings. *Environmental Health Perspectives* **114**: 1950-1956.
- Cazelles, B. Chavez, M., McMichael, A.J., and Hales, S. (2005). Nonstationary influence of El Niño on the synchronous dengue epidemics in Thailand. *PLoS Medicine* **2**: e106.
- Changements climatiques futurs en France. Serge Planton Météo France, Centre National de la recherche Météorologique
- Christian Elichegaray, Joëlle Colosio, Souad Bouallala. Bilan de la pollution photochimique observée en France au cours de l'été 2003. Ademe
- Colwell, R.R. (1996). Global climate change and infectious disease: The cholera paradigm. *Science* **274**: 2025-2031.

- Comité de bassin Rhône méditerranée, rapport d'évaluation environnementale du SDAGE, janvier 2008 ;
- CSHPF, septembre 2006 rapport sur les Contaminations fongiques en milieux intérieurs : diagnostic, effets sur la santé respiratoire, conduite à tenir
- Constantin de Magny, G., Guégan J.-F., Petit M., and Cazelles B. (2007). Regional-scale climate-variability synchrony of cholera epidemics in West Africa. *BMC Infectious Diseases* **7**:20.
- Craig, M.H., Snow, R.W., and Le Sueur, D. (1999).
- Craig, M.H., Snow, R.W., and Le Sueur, D. (1999). A climate-based distribution model of malaria transmission in Sub-Saharan Africa. *Parasitology Today* **15**: 105-111.
- CSTB, Cochet, Lakel, Salagnac, Inondation et santé, 25/11/2002
- Currie, B.J., and Jacups, S.P. (2003). Intensity of rainfall and severity of melioidosis, Australia. *Emerging Infectious Diseases* **9**: 1538-1542.
- Curriero, F.C., Patz, J.A., Rose, J.B., and Lele, S. (2001). The Association Between Extreme Precipitation and Waterborne Disease Outbreaks in the United States, 1948–1994. *American Journal of Public Health* **91**: 1194-1199
- Dron, D. (2005). Impacts du changement climatique et adaptation. Ecoles des Mines, Paris.
- Epstein, P.R. (2001). *Microbes and Infection* **3**: 747-754.
- Epstein, P.R. Diaz, H.F., Elias, S. Grabherr, G., Graham, N.E., Martens, W.J.M., Mosley-Thompson, E., and Susskind, J. (1998). Biological and Physical Signs of Climate Change: Focus on Mosquito-borne Diseases. *Bulletin of the American Meteorological Society* **79**: 409-417.
- Etzel, R.A. (2007). Indoor and outdoor air pollution: Tobacco smoke, moulds and diseases in infants and children. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*: doi: 10.1016/j.ijheh.2007.07.016
- Evaluation de l'impact sanitaire de la vague de chaleur de juillet 2006 de l'InVS, 24 octobre 2006.
- Graneli, E., Yasumoto, T., Ferreira, C.E.L., Rodrigues, E., Neves, M.H.B. (2007). *Ostreopsis ovata* blooms on the Brazilian coast-climate change ?. *International Symposium on algal toxins*. Trieste, May 27-29, 2007.
- Gubler, D.J., Reiter, P., Ebi, K.L., Yap, W., Nasci, R., and Patz, J.A. (2001). Climate Variability and Change in the United States: Potential Impacts on Vector and Rodent-Borne Diseases. *Environmental Health Perspectives* **109**: 223-233.
- Guernier, V., Hochberg, M.E., and Guégan, J.-F. (2004). Ecology drives the worldwide distribution of human diseases. *PLoS Biology* **2**: 740-746.
- Health Protection Agency UK (2008). Health effects of climate Change in the UK.
- Hjelle, B., and Glass, G.E. (2000). Outbreak of Hantavirus Infection in the Four Corners Region of the United States in the Wake of the 1997–1998 El Niño–Southern Oscillation. *Journal of Infectious Diseases* **181**: 1569-1573.
- Hoebe, C.J.P., Cluitmans, J.J.M., and Wagenvoort, J.H.T. (1998). Two fatal cases of nosocomial *Legionella pneumophila* pneumonia associated with a contaminated cold water supply. *Eur. J. Clin. Microbiol. Infect. Dis.*, **17**: 740-749.
- InVS (2003a) Morbidité et mortalité dues aux maladies infectieuses d'origine alimentaire en France, rapport InVS, juin 2003
- InVS (2003b). Epidémie de distomatose à *Fasciola hepatica* dans la région Nord-Pas-de-Calais. Rapport (juin 2003)

- InVS Cire Sud, DRASS PACA, DDASS du Gard, Etude des conséquences psychologiques des inondations à partir de données de l'Assurance Maladie, département du Gard, Septembre 2002 ;
- InVS, CIRE SUD, Situation sanitaire dans l'Aude à la suite des inondations, bilan épidémiologique, rapport préliminaire, Décembre 1999.
- InVS. Programme de surveillance Air et Santé 9 villes. Surveillance des effets sur la santé liés à la pollution atmosphérique en milieu urbain – Phase II. Saint-Maurice 2002, 184 pages.
- Janda, J.M., Powers, C., Bryant, R.G. et coll. (1988). Current perspectives on the epidemiology and pathogenesis of clinically significant *Vibrio* spp. *Clin. Microbiol. Rev.* **1**:245-267.
- Kallio, E.R., Klingström, J., Gustafsson, E., Manni, T., Vaheri, A., Henttonen, H., Vapalahti, O., and Lundkvist, A. (2006). Prolonged survival of Puumala hantavirus outside the host: evidence for indirect transmission via the environment. *J. Gen. Virol.* **87**: 2127-2134.
- Kalluri, S., Gilruth, P., Rogers D., and Szczur, M. (2007). Surveillance of Arthropod Vector-Borne Infectious Diseases Using Remote Sensing Techniques: A Review. *PLoS Pathogens* **3**: e116. Cook, S.M., Glass, R.I., LeBaron, C.W., and Ho, M.S. (1990). Global seasonality of rotavirus infections. *Bulletin of the World Health Organization* **68**: 171–177.
- Kim, E.J. et al. (2003). Effects of forest fire on the level and distribution of PCDD/Fs and PAHs in soil. *Sci. Total Environ.* **311**: 177-89.
- Kozak PP, Gallup J, Cummins LH et al., Factors of importance in determining the prevalence of indoor molds, *Ann Allergy*, 1979 ; 43 : 88-94.
- Kunzli N. et al. (2006). Health effects of the 2003 Southern California wildfires on children. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* **174**: 1221-1228.
- Laaidi, K., Laaidi, M., and Besancenot, J.-P. (1997). Pollens, pollinoses et météorologies. *La Météorologie* **8**: 41-56.
- Laaidi, M. (2000). Les Actes du Festival International de Géographie. Voir à http://fig-st-die.education.fr/actes/actes_2000/laaidim/article.htm
- Lee JH and Jo WK, Characteristics of indoor and outdoor bioaerosols at Korean high-rise apartment buildings, *Environmental Res* , 2006 ; 101 :11-17.
- Lefranc A. et Al., InVS, (PSAS) - Relations à court terme entre les niveaux de pollution atmosphérique et les admissions à l'hôpital dans huit villes françaises, 2006
- Lemoine, T., Germanetto, P., Giraud, P. (1999). Toxi-infection alimentaire collective à *Vibrio parahaemolyticus*. *Bulletin Epidémiologique Hebdomadaire* **10** : 37-38
- Lesne, J. et al. (1995). Coquillages et santé. Relations entre indicateurs environnementaux et sanitaires. Rapport scientifique, éditions ENSP, Rennes, 162 p.
- Li C and Kuo Y, Airborne characterisation of fungi indoors and outdoors, *J. Aerosol Sci.*, 1992 ; 23(S1) :s667-s670.
- Liang, S.Y., Linthicum, K.J., and Gaydos, J.C. (2002). Climate Change and the Monitoring of Vector-Borne Disease. *JAMA* **287**: 2286.
- Lindgren, E., and Gustafson, R. (2001). Tick-borne encephalitis in Sweden and climate change. *The Lancet* **358**: 16-18.
- Lindsay, S., Bodker, R., Malima, R., Msangeni, H., and Kisinza, W. (2000). Effect of 1997-1998 El Nino on highland malaria in Tanzania. *The Lancet* **355**: 989-990.
- Linthicum, K.J., Anyamba, A., Tucker, C.J., JKelley, P.W., Myers, M.F., and Peters, C.J. (1999). Climate and Satellite Indicators to Forecast Rift Valley Fever Epidemics in Kenya. *Science* **285**: 397-400.

- Liu R and Huza MA, Filtration and indoor air quality : a practical approach, *ASHRAE Journal*, 1995 ; 37 :18.
- Malloch D, Mould : their isolation, cultivation and identification. Toronto : department of Botany, University of Toronto, 1997.
- Matsunaga, J., Lo, M., Bulach, D.M., Zuerner, R.L., Adler, B., and Haake, D.A. (2007). Response of *Leptospira interrogans* to Physiologic Osmolarity: Relevance in Signaling the Environment-to-Host Transition. *Infection and Immunity* **75**: 2864-2874.
- McLaughlin, J.B., DePaola, A., Bopp, C.A. et coll. (2005). Outbreak of *Vibrio parahaemolyticus* gastroenteritis associated with Alaskan oysters. *N. Engl. J. Med.* **353**:1463-1470.
- Meklin T, Nevalainen A, Jouzaitis A, et al., Characterizing the mold exposure in school : comparison of the new single-stage impactor and Andersen six-stage impactor, *J. Aerosol Sci.*, 1995 ; 26(S1) :s881-s882.
- Météo France : http://www.meteofrance.com/FR/sante/doss_pollens.jsp
- Moe, K., and Harper, G.J. (1983). The effect of relative humidity and temperature on the survival of bovine rotavirus in aerosol. *Archives for Virology* **76**: 211–216.
- Moolgavkar SH., Air pollution and hospital admissions for chronic obstructive pulmonary disease in three metropolitan areas in the United States. *Inhal Toxicol* 2000; 12:75-90.
- Mott, J.A.. et al. (2002). Wildland forest fire smoke : health effect and intervention evaluation, Hoopa, California, 1999. *West. J. Med.* **176**: 157-162.
- Murgue B, Murri S, Zientara S, Labie J, Durand B, Durand JP, Zeller H (2001b) West Nile in France in 2000 : the return 38 years later. *Emerg Infec Dis*, **7** (4): 692-696.
- Murua, R., Gonzalez, L.A., and Lima, M. (2003). Population dynamics of rice rats (a Hantavirus reservoir) in southern Chile: feedback structure and non-linear effects of climatic oscillations. *Oikos* **102**: 137-145.
- Nasci, R.S., and Moore, C.G. (1998). Vector-borne disease surveillance and natural disasters. *Emerging Infectious Diseases* **4**: 333-334.
- Ogden, N.H., Maarouf, I.K., Barker, M., Bigras-Poulin, L.R., Lindsay, M.G., Morshed, C.J., O'Callaghan, F., Ramay, F., Waltner-Toews, D., Charron, D.F. (2006). Climate change and the potential for range expansion of the Lyme disease vector *Ixodes scapularis* in Canada. *International Journal of Parasitology* **36**: 63-70.
- Olsson, G.E., Dalerum, F., Hörnfeldt, B., Elgh, F., Palo, T.R., Juto, P., et coll. (2003). Human hantavirus infections, Sweden. *Emerging Infectious Diseases* [serial online]. Available from: URL: <http://www.cdc.gov/ncidod/EID/vol9no11/03-0275.htm>.
- OMS, « Feux de végétation », août 2000, aide mémoire n°254 disponible sur le site www.who.int
- OMS (2005). Using climate to predict infectious disease epidemics, 54p.
- OMS Europe, aide mémoire 05/02 Inondations, conséquences sanitaires et mesures préventives ;
- ONERC (2007), Changements climatiques et risques sanitaires en France, rapport au Premier ministre et au Parlement.
- ONERC (2007). Changements climatiques et risques sanitaires en France. Rapport au Premier Ministre et au Parlement. Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique.
- Organisation Mondiale de la Santé (2007). Problèmes de sécurité sanitaire dans la région européenne de l'OMS. Augmentation du nombre de catastrophes naturelles et de situations d'urgence. Aide-mémoire EURO/03/07, 4p.
- ORS Picardie, Cire Nord-Pas-de-Calais, CHU d'Amiens, Enquête santé chez les inondés de la Somme au printemps 2001 deux ans après ;

- Patz, J.A., and Kovats, R.S. (2002). Hotspots in climate change and human health. *British Medical Journal* **325**: 1094-1098.
- Patz, J.A., Cambell-Lendrum, D., Holloway, T., and Folley, J.A. (2005). Impact of regional climate change on human health. *Nature* **438**: 310-317.
- Patz, J.A., McGeehin, M.A., Bernard, S.M; and coll. (2000). The Potential Health Impacts of Climate Variability and Change for the United States: Executive Summary of the Report of the Health Sector of the U.S. National Assessment. *Environmental Health Perspectives* **108**: 367-376.
- Piarroux, R., and Bompangue, D. (2007). Needs for an Integrative Approach of Epidemics: The Example of Cholera. In: *Encyclopedia of Infectious Diseases: Modern Technologies* (ed. M. Tibayrenc). Wiley & Sons Inc., New-York, USA, pp. 639-653.
- Planton, S., et Terray, L. (2007). Détection et attribution à l'échelle régionale : le cas de la France. « Livre blanc » ESCRIME (Etude des Scénarios Climatiques Réalisés par l'IPSL et Météo-France), www.insu.cnrs.fr/a2065,livre-blanc-du-projet-escrime.html. pp 61-68.
- Prange, J.A. *et al.* (2003). Assessing forest fire as a potential PCDD/F source in Queensland, *Australian Environ. Sci. Technol.* **37**: 4325-4329.
- PSAS, Cassadou S., Chardon B., D'Helf M., Declercq C., Eilstein D., Fabre P., Filleul L., Jusot J-F., Lefranc A., Le Tertre A., Medina S., Pascal L., Prouvost H., Ledrans M. Vague de chaleur de l'été 2003 : relations entre température, pollution atmosphérique et mortalité dans neuf villes françaises. Institut de veille sanitaire. Septembre 2004.
- Randolph, S.E. (2001). The shifting landscape of tick-borne zoonoses: tick-borne encephalitis and Lyme borreliosis in Europe. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, série B **356**: 1045-1056.
- Relations à court terme entre les niveaux de pollution atmosphérique et les admissions à l'hôpital dans huit villes françaises. Novembre 2006.
- Reponen T, Lehtonen M and Raunemaa T, Effect of indoor sources on fungal spore concentration and size distribution, *J. Aerosol Sci.*, 1992 ; 23 :s663-s666.
- Rodo, X., Pascual, M., Fuchs, G., and Faruque, A.S.G. (2002). ENSO and cholera: A nonstationary link related to climate change? *PNAS* **99**: 12901-12906.
- RNSA (Réseau National de Surveillance Aérobiologique): <http://www.pollens.fr/accueil.php>
- Santé Canada (2006). Les bactéries pathogènes d'origine hydrique : micro-organismes préoccupants courants et émergents. Préparé par Le Comité fédéral-provincial-territorial sur l'eau potable du Comité fédéral-provincial-territorial sur la santé et l'environnement, 39p. (rapport disponible à http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/alt_formats/hecs-sesc/pdf/pubs/water-eau/pathogens-pathogenes/pathogens-pathogenes_f.pdf).
- Sénat (2008). L'ampleur des changements climatiques, de leurs causes et de leur impact possible sur la géographie de la France à l'horizon 2005, 2050 et 2100 (Tome 1 : Rapport). Document à <http://www.senat.fr/rap/r01-224-1/r01-224-165.html>
- Sinigalliano, C.D., Gidley, M.L., Shibata, T., Whitman, D., Dixon, T.H. et al. (2007). Impacts of Hurricanes Katrina and Rita on the microbial landscape of the New Orleans area. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* **104**: 9029-9034.
- Small, J., Goetz, S., and Hay, S.I. (2003). Climatic suitability for malaria transmission in Africa, 1911-1995. *PNAS* **100**: 15341-15345.
- Sousa, (de) R., Luz, T., Parreira, P., Santos-Silva, M., Bacellar, F. (2006). Boutonneuse Fever and Climate Variability. *Annals of the New-York Academy of Sciences* **1078**: 162–169.

- Sumilo, D., Asokliene, L., Bormane, A., Vasilenko, V., Golovljova, I., and Randolph, S.E; (2007). Climate Change Cannot Explain the Upsurge of Tick-Borne Encephalitis in the Baltics. *PLoS ONE* **2**: e500.
- Vague de chaleur et climatisation, Institut National de Santé publique du Québec, volume 16, numéro 3, mai-juin 2005 paru dans le bulletin d'information en santé environnementale.
- Vagues de chaleur et mortalité dans les grandes agglomérations urbaines, environnement, risques&santé Septembre-octobre 2002 de Jean-Pierre Besancenot
- Vesper SJ and Vesper MJ, Stachylysin may be a cause of hemorrhaging in humans exposed to *Stachybotrys chartarum*. *Infect Immunol*, 2002 ; 70 : 2065-2069.
- Viboud, C., Pakdaman, K., Boëlle, P.-Y., Wilson, M.L., Myers, M.F., Valleron, A.-J., and Flahault, A. (2004). Association of influenza epidemics with global climate variability. *European Journal of Epidemiology* **19**: 1055-1059.
- Vincent M., Géosciences n°3 mars 2006, le changement climatique
- Wachtel, M.R., Whitehand, L.C., Mandrell, R.E. (2002b). Prevalence of *Escherichia coli* Associated with a Cabbage Crop Inadvertently Irrigated with Partially Treated Sewage Wastewater. *J. Food Prot.* **65**: 471-475.
- Wachtel, M.R., Whitehand, L.C.,Mandrell, R.E. (2002a). Association of *Escherichia coli* O157:H7 with Preharvest Leaf Lettuce upon Exposure to Contaminated Irrigation Water. *J. Food Prot.* **65**:18-25.
- Wake D, Redmayne AC, Thorpe A, *et al.*, sizing and filtration of microbiological aerosols, *J. Aerosol Sci.*, 1995 ; 26(S1) :s529-s530.
- Walker, S.C., and Toth, T.E. (2000). Proteolytic inactivation of simian-11 rotavirus: a pilot study. *Veterinary Microbiology* **74**: 195-206.
- Ward, T.J. and Lincoln, E. (2006). Concentrations of PM_{2,5} – associated OC, EC, and PCDD/Fs measured during the wildfire season in Missoula, Montana. *Environ. Monit. Assess.* **115**: 39-50.
- Yang, Q.Y., Chen, Y., Shi, Y.L., *et al.* (2003). Association between ozone and respiratory admissions among children and the elderly in Vancouver, Canada. *Inhal Toxicol* **15**:1297-1308.
- Zeller, H.G., Deubel, V., and Murgue, B. (2001). West Nile: un regain de circulation dans le bassin méditerranéen et une émergence inattendue en Amérique du Nord. *Virologie* **5** : 409-417.
- Zientara, S. (2002). Infection à virus West Nile. Situation épidémiologique. Risques pour l'homme. Epizootie en France en 2000-2001. *Bulletin de l'Académie Vétérinaire de France* **155** : 67-72.