

# LE CHANGEMENT CLIMATIQUE : DES IMPACTS REGIONAUX AUX PISTES D'ADAPTATION, du Nord-Pas de Calais à l'Eurorégion

## Actes des conférences du CERCLE*

des 12 décembre 2013
et 3 avril 2015
à Lille

*Collectif d'Expertise Régionale sur le Climat et son Evolution

PROJET LABELLISÉ PARIS2015 COP21-CMP11

RÉGION NORD-PAS DE CALAIS

# Préface du Conseil régional

Les impacts du changement climatique sont multiples et touchent les systèmes naturels, sociaux, économiques. La lutte contre le changement climatique nous concerne tous. La Région Nord – Pas de Calais s'est engagée dans la lutte contre le changement climatique et la préservation de la biodiversité, à travers le Schéma Régional d'Aménagement et de Développement Durable du Territoire. Pour définir et mettre en œuvre les politiques d'adaptation au changement climatique, il importe de disposer de bases scientifiques solides, de mettre en lumière et d'accroître les connaissances dans ce domaine.

En 2013, le besoin d'un état des lieux des connaissances est apparu indispensable. Pour cela, la Région Nord – Pas de Calais a mobilisé des chercheurs et des experts en créant le Collectif d'Expertise Régionale pour le CLimat et son Evolution (CERCLE).

Le 12 décembre 2013 à Lille, la première conférence du CERCLE a mis l'accent sur les impacts du changement climatique sur la qualité de l'air, le littoral, les eaux continentales, la biodiversité. Le 3 avril 2015, la seconde conférence a permis de poursuivre cet état des lieux et de traiter des impacts du changement climatique sur la ville et sur la santé. Ces journées permettent de favoriser les échanges entre les chercheurs et les partenaires autour des enjeux complexes d'adaptation au changement climatique

Les travaux du CERCLE réunis dans ces Actes sont un support pour les décideurs et les représentants de la société civile pour mieux appréhender la réalité du changement climatique dans notre région, prévoir ses impacts et s'y adapter. Ils permettent de valoriser les travaux de recherche menés en Nord – Pas de Calais, en France et dans les régions transfrontalières.

Nous tenons à exprimer nos plus vifs remerciements à Yves FOUQUART pour le concours qu'il a bien voulu nous apporter dans la coordination scientifique de la démarche CERCLE, ainsi qu'à l'équipe de coordination composée de chercheurs de la région : Damien CUNY, Arnaud HEQUETTE, Claude KERGOMARD, Yves PIQUOT et Coralie SCHOEMAECKER ainsi qu'à tous les experts et scientifiques pour leur intervention aux cours de ces 2 conférences.

# Table des matières


Introduction ..... 5

Contexte général et projections de l'évolution climatique au niveau régional ..... 8

Impacts du changement climatique à l'échelle globale et régionale Yves FOUQUART ..... 9

DRIAS, les futurs du climat Eric BARBAY ..... 32

Impacts du changement climatique sur la mer et le littoral ..... 44

Variabilité pluri-décennale du trait de côte du Nord-Pas de Calais : le rôle des variations des conditions météo-marines et du bilan sédimentaire côtier Arnaud HEQUETTE ..... 45

Evolution passée et actuelle des dunes côtières du Nord - Pas de Calais : quelles perspectives pour l'avenir ? Marie-Hélène RUZ ..... 56

Impacts du changement climatique sur les estuaires Alain TRENTESAUX ..... 65

L'influence des paramètres hydroclimatiques et météo-marins sur le recul des côtes à falaises Guillaume PIERRE ..... 75

Solutions de gestion du littoral du Nord-Pas de Calais face au changement climatique Arnaud HEQUETTE ..... 82

Impacts du changement climatique sur les eaux continentales ..... 96

Impacts des changements climatiques sur le comportement des contaminants et de la qualité de l'eau de surface, souterraine et des sédiments Ludovic LESVEN ..... 97

Wateringues, des territoires menacés face au changement climatique ? Stéphane VANHÉE ..... 108

Impacts du changement climatique sur la biodiversité ..... 118

Impacts du changement climatique sur la biodiversité marine et les ressources exploitées Grégory BEAUGRAND ..... 119

Evolutions de la biodiversité en Nord - Pas de Calais dans le cadre des changements globaux Nina HAUTEKEETE ..... 126

Impacts du réchauffement climatique récent sur la flore forestière ; comparaison forêts de plaine et forêts de montagne Jonathan LENOIR ..... 135

La chalarose du frêne, scénarisation de l'impact du changement climatique Eric GOBERVILLE ..... 142

Impacts du changement climatique sur la qualité de l'air et l'atmosphère ..... 148

Analyse physicochimique de la pollution atmosphérique Esperanza PERDRIX ..... 149

Analyse d'un événement « extrême » de pollution : mars 2014 du satellite ... au microscope Philippe GOLOUB ..... 160

Pollution de l'air : des échelles météorologique et climatique Hervé DELBARRE ..... 172

Changement climatique : quelles conséquences sur la diffusion de la pollution atmosphérique en région en 2100 ? Valérie FEVRE-NOLLET ..... 180

Impacts du changement climatique sur la santé ..... 191
Changement climatique et risques allergo-polliniques Laëtitia DAVRANCHE ..... 192
Impact des températures extrêmes sur la mortalité Luc DAUCHET ..... 202
Impact du changement climatique sur la santé via la pollution atmosphérique Lydia NIKASINOVIC ..... 210
Impacts climatiques sur la santé ; Risques sanitaires émergents Régis MATRAN ..... 218
Impacts du changement climatique sur le milieu urbain et enjeux liés à l'adaptation ..... 226
Enjeux de l'adaptation climatique en région urbanisée, quelles spécificités pour le Nord-Pas de Calais ? Claude KERGOMARD ..... 227
Végétal et adaptation climatique des villes, les résultats du projet VegDUD Marjorie MUSY ..... 237
Villes futures et climat urbain, quels leviers pour l'adaptation ? Synthèse du projet ACCLIMAT Thomas HOUET ..... 244
Conclusion ..... 250
Annexes ..... 254
Annexe 1 : Coordonnées des auteurs et coordinateurs ..... 254
Annexe 2 : Mesures d'adaptation prévues dans le SRCAE ..... 257
Annexe 3 : Description des scénarios SRES et RCP ..... 258

# Introduction

Depuis un peu plus d'un siècle, la température moyenne de la planète a augmenté de 0,8 degré. En France, cette augmentation dépasse 1 degré. Pour les milliers de chercheurs qui se consacrent à ce sujet, la cause en est clairement l'augmentation de la concentration atmosphérique de gaz dits à effet de serre (GES), au premier rang desquels le gaz carbonique. L'origine anthropique de cette augmentation est incontestable et limiter les émissions de GES est essentiel car c'est leur concentration atmosphérique qui commande l'amplitude du changement climatique. Le rôle des négociations internationales est de fixer des objectifs en termes de réduction de ces émissions ; la COP 21 (21ième Conférence des Parties) qui se tiendra à Paris en décembre 2015 marque une étape cruciale dans ces négociations, mais quel qu'en soit le résultat, les émissions continueront pendant encore quelques décennies.

Dans ces conditions, il faut anticiper un réchauffement supplémentaire de l'ordre de 1 degré au minimum, voire 4 ou 5 degrés si rien n'est fait. Les incertitudes quant à la réponse du système climatique lui-même à une contrainte donnée sont certes importantes mais elles ne sont en aucune façon une excuse pour ne rien faire, bien au contraire. Il faut donc anticiper ce réchauffement et s'y préparer pour s'y adapter au mieux. Toute la planète est et continuera à être affectée par ce réchauffement mais avec de grandes disparités régionales.

Le Nord-Pas de Calais ne restera pas à l'écart, même s'il gardera très certainement un climat de type tempéré océanique. Le climat et la géographie de la région Nord-Pas de Calais la situent dans un ensemble, celui des régions côtières du Nord-Ouest de l'Europe, pour lesquelles l'exposition au risque climatique concerne principalement les effets de la hausse du niveau marin, des tempêtes (fréquence, intensité) et des surcotes associées, et secondairement du risque d'inondation lié aux changements du régime pluviométrique (intensité des pluies, répartition saisonnière) et à la difficulté à gérer l'écoulement des eaux continentales.

Les conséquences attendues des changements climatiques en termes de biodiversité sont potentiellement très importantes avec des impacts déjà mesurables sur les ressources naturelles exploitables, les stocks halieutiques en particulier. D'autres conséquences sont attendues avec l'extinction de certaines espèces ou l'arrivée de nouvelles, qui pourraient perturber durablement le fonctionnement des écosystèmes et affecter les équilibres écologiques dans la région.

La situation géographique de la région au cœur de l'Europe industrielle ajoute aux fortes émissions locales de polluants des sources d'émission multiples et parfois lointaines. La modification possible à la fois des émissions et des circulations atmosphériques peuvent entraîner des modifications importantes en termes de répartition des polluants et de qualité de l'air avec des conséquences significatives sur la santé.

A ces risques clairement identifiés, il faut ajouter la densité de la population, l'héritage du passé industriel, la concentration actuelle d'activités industrielles à risque et d'infrastructures, l'étendue des espaces urbanisés dans des territoires inondables et sur le littoral confèrent à la région une sensibilité élevée aux risques climatiques. Celle-ci est susceptible d'interagir avec des fragilités économiques, sanitaires et sociales préexistantes, qui aggravent la vulnérabilité de la région et interrogent sa capacité d'adaptation face aux impacts climatiques. Evaluer cette vulnérabilité avec le maximum de rigueur scientifique constitue une tâche complémentaire à la connaissance de l'évolution du climat et de ses impacts physiques.

C'est dans cette optique que le Collectif d'Expertise Régionale pour le CLimat et son Evolution, intitulé CERCLE, s'est mis en place.

L'équipe de coordination du CERCLE rassemble des chercheurs spécialistes de domaines tels que la climatologie, la géographie et la géomorphologie, la réactivité chimique et l'environnement, la biodiversité, la santé, les enjeux sociétaux. Elle a pour ambition de dresser un état des connaissances existantes ou en cours d'acquisition sur les effets du changement climatique à l'échelle régionale et plus largement de l'EuroRégion et de restituer ces connaissances auprès des acteurs de la société civile. Elle mobilise pour cela des chercheurs de la région Nord-Pas de Calais, des régions limitrophes (Picardie, de Belgique, des Pays-Bas) et au-delà. Le CERCLE n'a, en effet, pas l'ambition d'être ou de devenir compétent dans tous les domaines où le changement climatique opérera et selon les thématiques, il se veut un relais vers les organismes ou les chercheurs compétents extérieurs à l'EuroRégion.

Les textes recueillis dans cet ouvrage sont issus des présentations faites au cours de deux colloques organisés à Lille en décembre 2013 et avril 2015. Après une introduction présentant le contexte général et les diverses projections de l'évolution climatique au niveau régional, ils explorent plusieurs aspects des conséquences attendues du réchauffement, sur la qualité de l'air et l'atmosphère, le littoral, les eaux continentales, la biodiversité marine et terrestre, la santé et la ville... D'autres domaines devront être abordés lors de colloques à venir.



Photo : Yves Fouquart



Yves Fouquart a soutenu sa thèse d'Etat en 1975 sur l'analyse des spectres d'absorption présents dans la lumière solaire réfléchie par Vénus. Cela l'a conduit à participer au programme mondial de recherche sur le climat. Il a fait partie de son comité scientifique pendant 6 ans, puis a participé à la rédaction d'un des rapports du GIEC.

# Contexte général et projections de l'évolution climatique au niveau régional

Partie coordonnée par Yves Fouquart
Ancien membre du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) et ancien directeur du Laboratoire d'Optique Atmosphérique (LOA), UMR 8518 CNRS / Université de Lille - Sciences et Technologies

Le changement climatique est une question planétaire, le réchauffement observé est global mais inégal, avec de fortes disparités régionales. Dans cette section, on examine donc la réalité du changement climatique à différentes échelles, ses causes ainsi que son évolution possible au cours de ce siècle. Nous présentons également les outils d'analyses du climat. Les projections climatiques présentent de fortes incertitudes, encore amplifiées à l'échelle régionale. Mais moyennant des précautions d'utilisation et d'interprétation, on dispose là d'un outil très performant.

Cette partie présente les interventions suivantes :

- Impacts du changement climatique à l'échelle globale et régionale
  *Yves Fouquart, Ancien membre du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) et ancien directeur du Laboratoire d'Optique Atmosphérique (LOA), UMR 8518 CNRS / Université de Lille - Sciences et Technologies*
  Conférences CERCLE des 12 décembre 2013 et 3 avril 2015

- DRIAS, les futurs du climat
  *Eric Barbay, Météo France*
  Conférence CERCLE du 3 avril 2015

# Impacts du changement climatique à l'échelle globale et régionale

Yves FOUQUART

Ancien membre du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) et ancien directeur du Laboratoire d'Optique Atmosphérique (LOA), UMR 8518 CNRS / Université de Lille - Sciences et Technologies

La Figure 1 montre l'évolution de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone mesurée à Mauna Loa, à Hawaï. Ces mesures sont faites loin de toute source de pollution hormis les émissions volcaniques aisément détectables et éliminées. Elles sont donc assez représentatives de ce qui se passe dans l'atmosphère libre. D'autres mesures, sur d'autres sites d'étude comme, par exemple, celles de chercheurs français sur l'île d'Amsterdam confirment l'augmentation régulière de la concentration en $CO_2$ dès les années 70. Cette augmentation était telle que le réchauffement global paraissait évident.

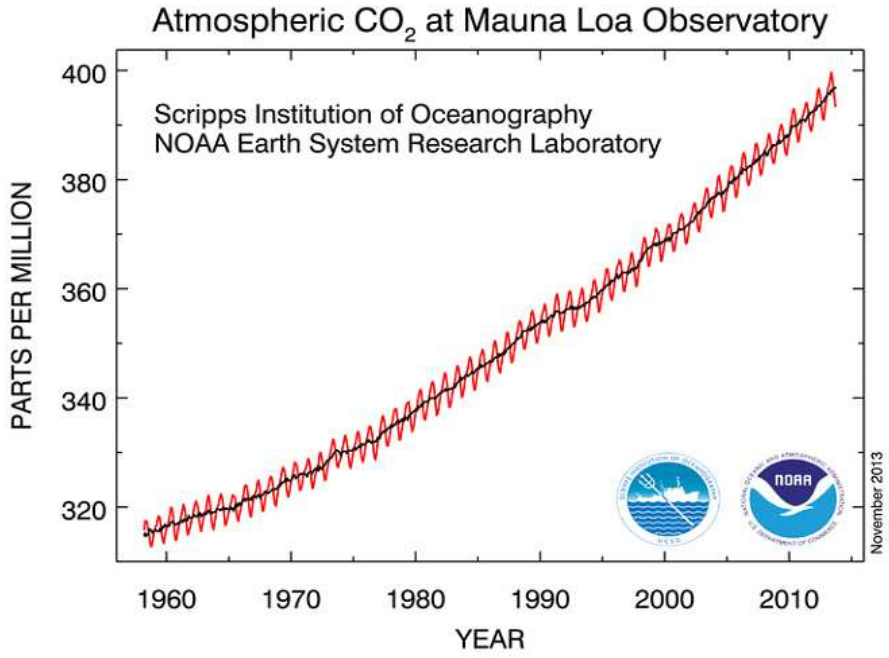



*Figure 1 : Evolution de la concentration atmosphérique en $CO_2$ mesurée à Mauna Loa (Hawaï). Les oscillations annuelles sont dues à la variation saisonnière des émissions et de l'absorption par la végétation de l'hémisphère Nord.*

Le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) a été créé en 1988 « en vue de fournir des évaluations détaillées de l'état des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques sur les changements climatiques, leurs causes, leurs répercussions potentielles et les stratégies de parade. »

### Le GIEC : une campagne de dénigrement systématique

Le GIEC a obtenu le prix Nobel de la paix en 2007. Cela a déclenché une campagne de dénigrement systématique, consistant à prétendre que les chercheurs étaient soit des comploteurs, soit des incapables, soit les deux. Par exemple, un journaliste de la BBC a réalisé en 2007 un film nommé *La grande arnaque du réchauffement climatique* – ce film a eu un certain succès -, en opposition au film d'Al Gore, *Une vérité qui dérange*. On y entend :

> *Le consensus sur le changement climatique est le résultat « d'une industrie mondiale de plusieurs milliards de dollars: créé par des écologistes fanatiques anti-industriels ; soutenus par des scientifiques colportant des histoires effrayantes pour récolter des fonds ; et consolidés par la complicité des politiciens et des médias. (The Great Global Warming Swindle)*

### Des scientifiques divisés, vraiment?

Le paroxysme de la polémique a eu lieu autour de la courbe de la Figure 2 appelée « la crosse de hockey ». Elle présente la reconstitution de l'évolution des températures en utilisant des informations climatiques produites par les cernes de croissance des arbres, les stalactites, les carottages que l'on peut faire dans le sol ou les calottes de glace. Cette reconstitution montrait qu'en fait, nous n'avions jamais connu de température aussi élevée depuis à peu près 1 000 ans. Cette campagne a été extrêmement violente puisque Phil E. Jones et Michael Mann à l'origine de la découverte de la « crosse de hockey » ont reçu des menaces de mort. Phil Jones a été démis de ses fonctions pendant un certain temps parce qu'il avait été mis en accusation de tricherie. Aujourd'hui, les choses se sont un peu calmées. Il y a eu d'autres études et commissions d'enquête qui confirment la réalité de « la crosse de hockey ». Plus précisément, en affinant la terminologie : sur les 1 000 dernières années, il n'y a jamais eu de réchauffement qui présentait à la fois ces trois caractéristiques :

- l'amplitude,
- la globalité,
- la vitesse du réchauffement.

On entend dire que les scientifiques sont divisés sur le sujet. Pourtant une étude (Cook et al, 2013) portant sur 12 000 articles scientifiques parus entre 1991 et 2011 et évoquant le climat à un titre ou un autre montre le contraire : parmi ces articles, 4000 évoquent une opinion sur l'origine anthropique ou non du réchauffement, les autres n'en parlent pas. Sur ces 4000 articles, **97 % attribuent l'essentiel du réchauffement à l'activité humaine.**

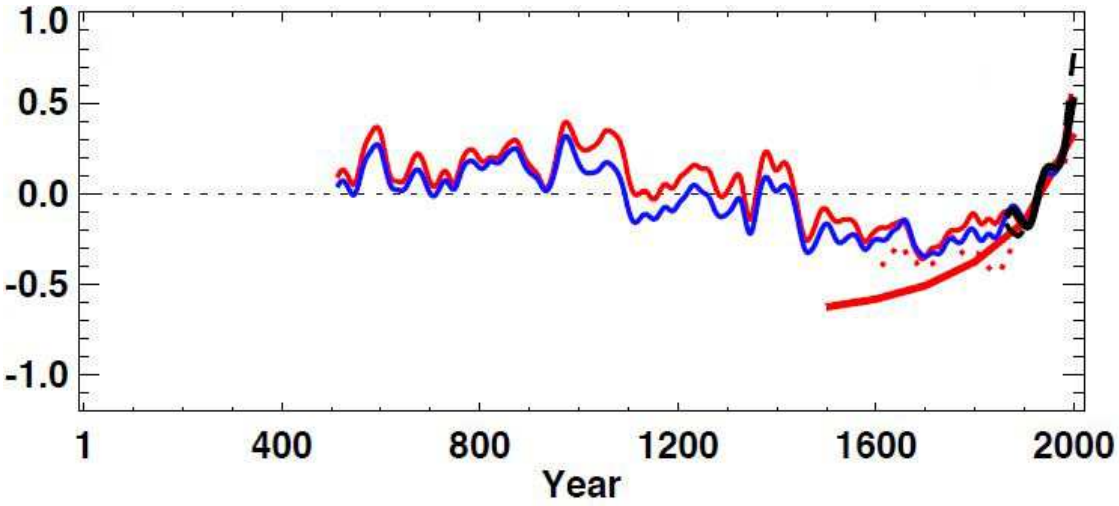



*Figure 2 : La crosse de hockey revisitée, (GIEC AR5, chap5, p409), les courbes rouges représentent des reconstructions des températures effectuées à partir de données continentales et la courbe bleue mélange continents et océans. La courbe noire correspond aux données modernes semblables à celles de la Figure 3.*

Depuis 1998, une autre polémique a éclaté autour de l'affirmation que le rythme du réchauffement se serait atténué voire que le réchauffement se serait arrêté. En réalité, il n'en est rien. En effet, 1998 est une année El Niño absolument exceptionnelle. Le phénomène El Niño correspond à un déplacement des eaux chaudes à l'intérieur du Pacifique équatorial et a pour conséquence un réchauffement naturel de la planète d'environ un ou deux dixièmes de degré. On pouvait attendre en prenant 1998 comme année de référence pour la mesure de l'évolution du climat à une inflexion du réchauffement (Karl et al. 2015). Or, il n'en n'est rien. Le climat se définit sur une moyenne d'au minimum une trentaine d'années. Sur des périodes aussi longues, la Figure 3 montre que l'augmentation de la température se poursuit à un rythme d'un peu moins de 0,2 degrés par décennie, 2014 étant tout à fait alignée avec cette tendance.

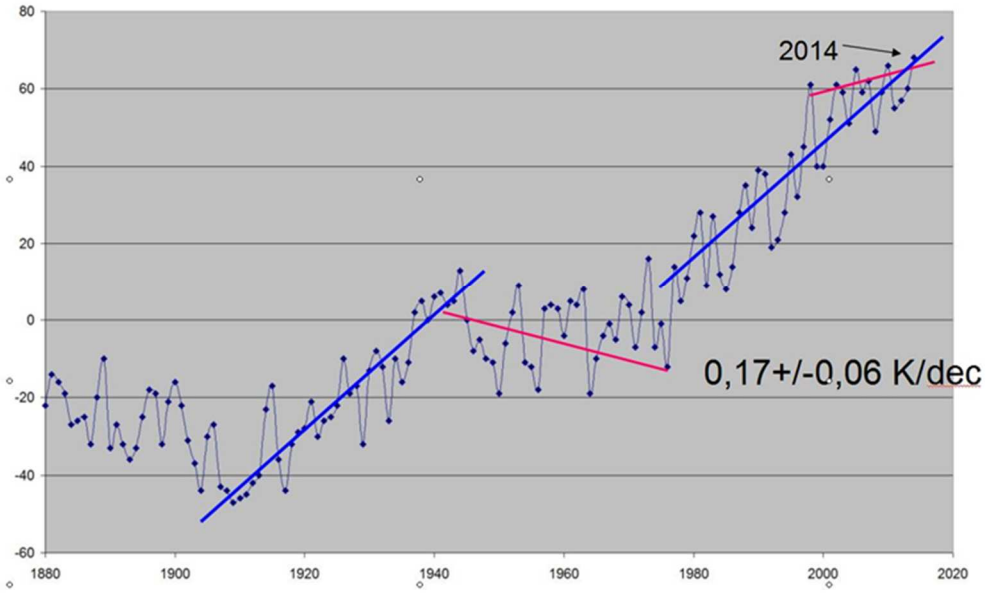



*Figure 3 : Evolution de la température moyenne du globe, les segments de droite en bleu illustrent la similitude des pentes sur une période de 30 ans. (Source: [http://data.giss.nasa.gov/gistemp/](http://data.giss.nasa.gov/gistemp/))*

Elle montre aussi que, même sur ces longues périodes, le rythme du réchauffement peut varier considérablement comme le montre la baisse de la température dans les années 40 à 80. En fait, il se passe un autre phénomène : depuis le très puissant El Niño de 1998, nous sommes plutôt passés à une phase dans laquelle les phénomènes El Niña, c'est-à-dire le phénomène inverse avec des eaux plutôt froides sont devenues prépondérantes, malgré cela le réchauffement continue.

### L'effet de serre et les forçages naturels

Les rapports du GIEC synthétisent régulièrement l'état des connaissances sur le climat et son évolution. De rapport en rapport, ils confirment et renforcent le constat que ce réchauffement est principalement dû aux activités humaines. En 2007, le GIEC concluait que la plus grande partie du réchauffement était d'origine humaine avec une probabilité de plus de 90 %. En 2013, cette probabilité est passée à plus de 95 %. Pourquoi cet entêtement ? D'abord, parce que l'on dispose d'une théorie qui est très solide quoi qu'en disent certains : l'effet de serre ne se sature pas. D'ailleurs, s'il se saturait, comment expliquer le fonctionnement d'un double vitrage et pourquoi un double vitrage isole-t-il mieux qu'un simple, pourquoi un triple vitrage isole-t-il mieux qu'un double et pourquoi un quadruple isolerait-il encore mieux qu'un triple ?

> Le GIEC maintient et renforce son avis, à savoir que la majeure partie du réchauffement observé depuis 1950 est d'origine anthropique. En 2007, on parlait d'une probabilité de 90 %, on parle maintenant de 95%.

Cette théorie est également largement validée. En effet, l'effet de serre s'appuie sur exactement la même théorie que celle que l'on utilise pour les sondages de température depuis les satellites. Chaque jour, ce sont donc des centaines de validations qui sont effectuées par comparaison aux radiosondages effectués, eux, depuis les ballons sondes.

La deuxième raison est que les forçages naturels n'expliquent pas le réchauffement observé. Non seulement ils ne l'expliquent pas globalement mais ils ne l'expliquent pas non plus quant à sa distribution spatiale et temporelle, que ce soit dans les différenciations entre l'augmentation de température sur les océans, sur les continents, en haute latitude, en basse latitude, dans la stratosphère, dans la troposphère… C'est ce que l'on appelle une empreinte digitale. Et cette empreinte digitale correspond parfaitement à un réchauffement dont l'origine est l'augmentation de l'effet de serre.

### Les incertitudes

Bien entendu, il reste des incertitudes. Le réchauffement est inéluctable, les spécialistes en étaient persuadés dès 1975, mais des questions subsistent quant à l'amplitude et la vitesse de ce réchauffement. L'amplitude dépend essentiellement des forçages et de la rétroaction des nuages. Les forçages correspondent à une contrainte que l'on applique à un système. Le système climatique répondra en fonction de cette contrainte mais également en fonction de ses caractéristiques propres, c'est à dire pour l'essentiel la rétroaction des nuages, celle de

la vapeur d'eau, de la glace de mer, etc. Ces rétroactions constituent les sources essentielles d'incertitude. Quant à la vitesse, c'est essentiellement une question d'interaction entre l'océan et l'atmosphère mais, au premier chef, ce qui commande l'amplitude du réchauffement, c'est l'intensité du forçage, c'est à dire, ici, la concentration de l'atmosphère en gaz à effet de serre.

### *L'amplitude*

Il existe trois causes majeures d'incertitude : les émissions, les aérosols et les nuages.

*Les émissions*

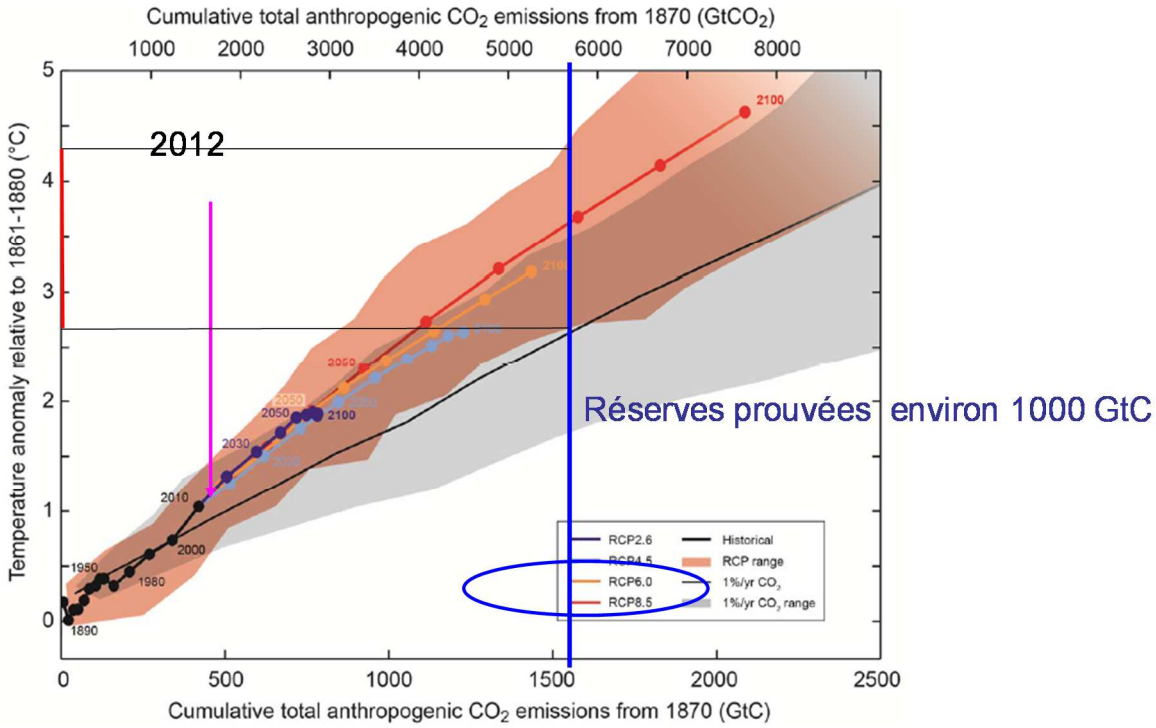



*Figure 4: Evolution des températures en fonction des émissions de gaz carbonique émis par l'Homme depuis 1870, d'après GIEC, AR5, Summary for Policy Makers, figure SPM.10,*

A l'intersection entre la droite bleue (tracée sur environ 1 500 gigatonnes) et la zone d'incertitude de dispersion des modèles, l'axe des ordonnées donne un réchauffement de l'ordre de 3 à 4 degrés en moyenne planétaire. Il s'agit de 3 à 4 degrés par rapport aux températures du début du XX$^{e}$ siècle. Puisque la température a déjà augmenté de 0,8 degré depuis cette date, il nous reste à subir une progression de 2 à 3 degrés de plus par rapport aux températures actuelles.

Le réchauffement ne dépend au premier ordre que de la quantité totale de gaz carbonique qui sera émis dans l'atmosphère pour autant que l'on émette ce gaz carbonique à l'échelle d'un siècle. Sur 500 ans, ce serait différent car une partie du gaz carbonique émis aurait le temps d'être enfoui dans l'océan profond. A l'échelle d'un siècle, c'est donc la quantité totale émise qui est importante et qui dépend de la quantité totale de charbon, de pétrole et de gaz naturel utilisés.

**Depuis le début de l'ère industrielle** nous avons brûlé à peu près 500 Gigatonnes de carbone sous forme de houille et autres sources fossiles. Les réserves prouvées sont de l'ordre de 1 000 gigatonnes (1 000 milliards de tonnes) de carbone sous forme de pétrole, de charbon, de gaz naturel, incluant les gaz de schiste. Les réserves estimées pourraient être de l'ordre de 3 000 gigatonnes. Si on s'en tient aux réserves prouvées, au rythme actuel de consommation, la totalité du stock sera brulé au mieux d'ici à 2100, mais plus probablement d'ici à 2070 ou 2080. Il faut donc s'attendre à ce que la température moyenne de la planète augmente encore de 2 à 3 degrés.

*Les aérosols*

La deuxième cause d'incertitude est liée aux aérosols. Cette question est plutôt liée à l'impact climatique des aérosols qu'à leur émission. Cette incertitude perdure mais elle semble se restreindre un peu.

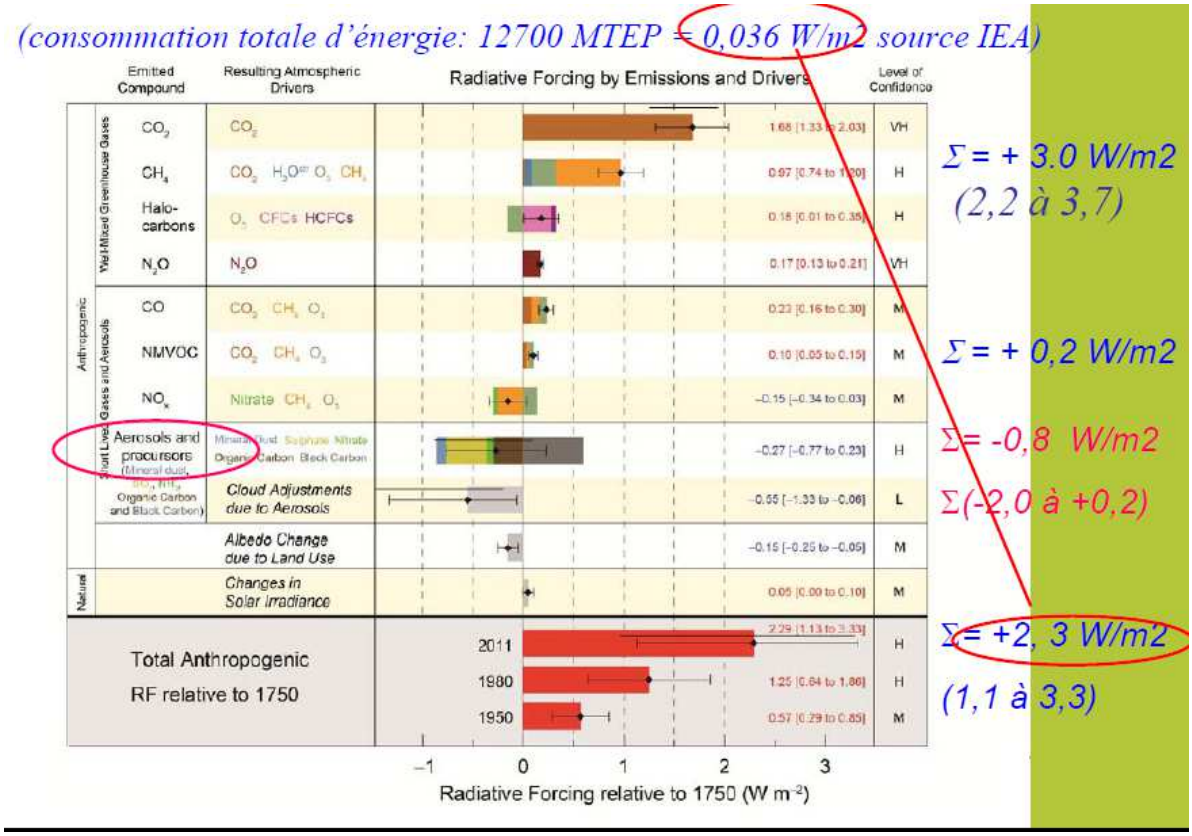



*Figure 5 : Tableau récapitulatif des forçages auxquels est soumis le climat depuis 1750 d'après GIEC, AR5, Summary for Policy Makers, figure SPM.5*

Le tableau de la Figure 5 est issu du dernier rapport du GIEC, il montre les forçages auxquels est soumis le climat depuis 1750. Un forçage est un déséquilibre du bilan d'énergie de la planète. Si l'on met plus d'énergie, la planète chauffe. Si l'on en met moins, la planète se refroidit. Le supplément d'énergie pour la planète est de 3 $W/m^2$ pour les gaz à effet de serre à longue durée de vie et de 0,2 pour les gaz à effet de serre à courte durée de vie. En rouge, on trouve l'effet des aérosols qui tendent, eux, à provoquer un forçage négatif, un effet parasol,

c'est-à-dire une limitation du réchauffement. Pour les aérosols purs, il s'agit, en fait, d'un refroidissement. Néanmoins, la marge d'incertitude est tout à fait considérable. En fait, la marge d'incertitude sur l'ensemble des forçages depuis 1750 provient essentiellement de l'incertitude sur les aérosols.

Incidemment, on se pose parfois la question de savoir quelle est la part du réchauffement qui serait due à la chaleur directement produite par l'énergie consommée. Selon l'Agence Internationale de l'Energie, la consommation totale d'énergie s'est élevée à 12 700 Mtep (Méga tonnes d'énergie primaire) en 2013 ce qui représente 0,03W/m² alors que le forçage total, c'est à dire le déséquilibre énergétique total, provoqué par les gaz à effet de serre est lui de un peu plus de 2 W/m². Il y a donc près d'un rapport 100 entre ces deux chiffres. Autrement dit, ce n'est pas la chaleur dissipée elle-même qui a une quelconque influence sur le climat, c'est le gaz carbonique produit.

*Les nuages*

La troisième cause d'incertitude provient des nuages. Les nuages sont la manifestation instantanée et locale de la météorologie. Trouver dans l'évolution de la couverture nuageuse mondiale un signal qui dépend du réchauffement climatique est une gageure. Elle est telle que l'on n'arrivera peut-être pas à trouver le signal. Cependant, certaines observations attestent du fait que la rétroaction nuageuse dont on dit qu'elle est capable de bouleverser les choses dans un sens ou dans l'autre est probablement surévaluée. Un autre élément va en ce sens : le climat a déjà varié dans le passé sous l'influence de forçages volcaniques ou de forçages orbitaux qui sont responsables des glaciations à une échelle de 100 000 ans avec une influence de la rétroaction des nuages qui apparait finalement relativement faible. Actuellement, on tend à dire qu'elle serait plutôt positive, c'est-à-dire qu'elle augmenterait le réchauffement initial. Il reste possible que cette rétroaction soit négative et contribue à diminuer le réchauffement mais son effet resterait dans tous les cas limité.

### *La vitesse*

La question de la vitesse à laquelle ce réchauffement se produira est évidemment très importante. Cela dépend essentiellement des interactions entre l'océan et l'atmosphère. Le système climatique présente une variabilité interne telle que, indépendamment de tout contrainte externe, la température moyenne présenterait de toute manière des variations d'une année sur l'autre et même d'une décennie sur l'autre. La réponse apparente du système climatique à un forçage est donc la somme de cette variabilité interne et de la réponse au seul forçage, telle qu'on l'observerait une fois lissée de toute variabilité. La variabilité interne est due essentiellement aux interactions entre les différents compartiments du système : l'océan, la glace, l'atmosphère. Elle est, en particulier, responsable de sauts dans le réchauffement aux échelles pluridécennales. Par exemple, la courbe de la Figure 3 montre que dans les années 40 à 70, il n'y avait pas eu de réchauffement et que la pente du réchauffement dans les

années précédentes et les années suivantes était quasiment similaire. Une interaction qui produirait plutôt une tendance par les océans à amener de l'eau froide en surface contrecarrerait la tendance au réchauffement climatique mais provisoirement. En effet, si une oscillation de ce type se produit, une dizaine, une vingtaine ou une trentaine d'années plus tard, c'est l'effet inverse qui se produit, les eaux chaudes s'amoncellent en surface et, cette fois, le réchauffement s'accélère.

A l'échelle globale, le rythme du réchauffement est commandé par les oscillations océan - atmosphère, l'océan absorbant plus de 90 % du déséquilibre énergétique causé par l'augmentation de l'effet de serre. La principale oscillation du système climatique est ce que l'on appelle l'« ENSO », c'est à dire l'alternance dans le Pacifique entre le phénomène El Niño et le phénomène « La Niña ». La Figure 6 montre que quand on aligne toutes les années d'un phénomène El Niño, toutes les années d'un phénomène La Niña et toutes les années neutres, on obtient pratiquement trois droites parallèles. En rouge, les années « El Niño », toutes plus chaudes que les autres ; en bleu, les années « La Niña », toutes plus froides que les autres, mais toutes montrent une augmentation de la température.

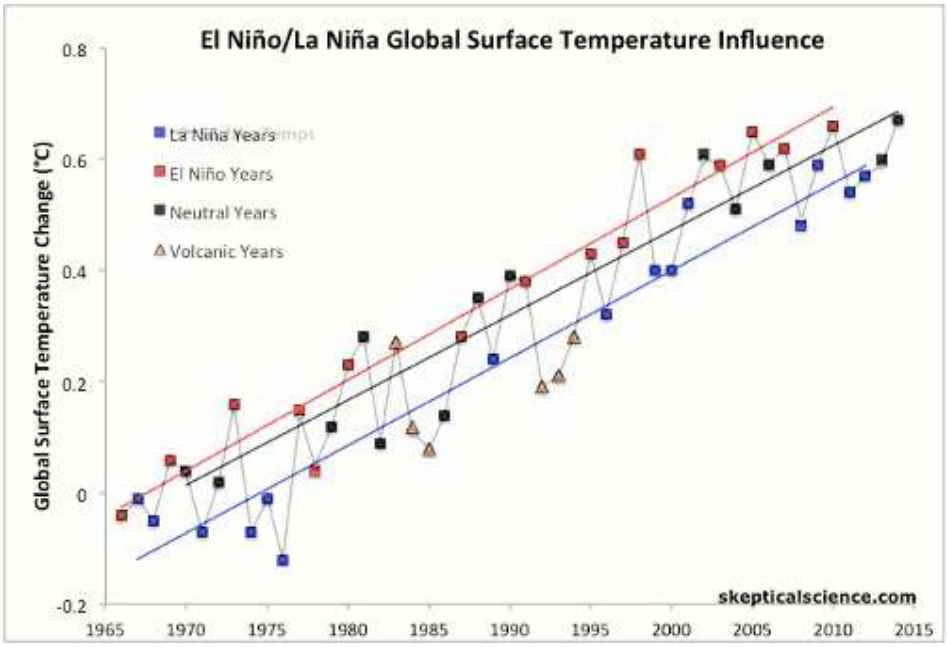



*Figure 6 : discrimination des anomalies de température globale annuelle en fonction des phases de l'ENSO*

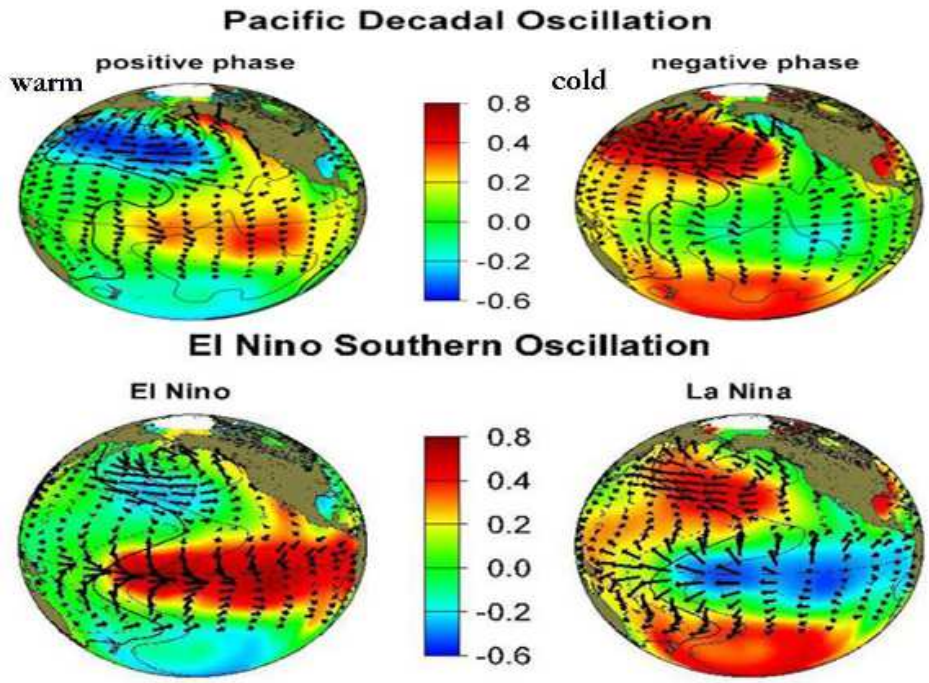



*Figure 7 : Anomalies de la température de surface de l'océan Pacifique dans les phases de l'Oscillation Pacifique décennale (PDO) en haut et de l'ENSO en bas. Aux couleurs rouges, les cycles s'étalent sur des pseudo-périodes de plusieurs dizaines d'années, l'ENSO concerne le Pacifique tropical et ses différentes phases durent en général quelques mois.*

Pour fixer les idées, la Figure 7 en bas représente l'oscillation des températures de la surface de la mer pour « El Niño ». Les régions anormalement chaudes sont représentées en rouge, les régions anormalement froides en bleu. L'ENSO occupe le Pacifique tropical. Il y a aussi une oscillation à l'échelle multi décennale (en haut) de 20, 30 ou 40 ans qui concerne maintenant l'ensemble du Pacifique où l'on voit une espèce de dipôle entre les zones froides et chaudes, en particulier dans le Pacifique Nord-Ouest. Ces phénomènes sont responsables de la plus grande partie de la variabilité de la température d'une année sur l'autre, et même d'une décennie sur l'autre. À cela s'ajoute la tendance générale au réchauffement.

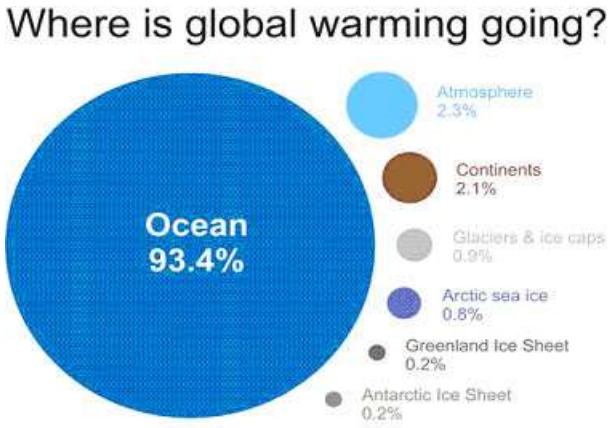



*Figure 8 : Où va le réchauffement climatique ? Plus de 90 % du déséquilibre énergétique dû à l'augmentation de l'effet de serre, ne va pas dans l'atmosphère mais dans l'océan à cause des différences entre les capacités calorifiques de l'atmosphère, très mince et très légère et de l'océan, profond de 3 000 mètres d'eau en moyenne.*

Depuis une dizaine d'années (faute de moyens d'observation auparavant), on observe un réchauffement des couches océaniques en profondeur moyenne, soit en dessous de la thermocline (700 mètres). Ce réchauffement est tout à fait cohérent avec le fait que nous sommes passés dans une période où les événements Niña l'emportent sur les événements Niño. Cette prédominance d'un type donné d'évènements, « La Nina » ou « El Nino », est liée à une oscillation que l'on appelle l'oscillation décadale du Pacifique. Cette oscillation a une période de l'ordre d'une cinquantaine ou d'une soixantaine d'années – on manque de recul sur ces phénomènes. Les modèles eux-mêmes simulent des fluctuations de ce genre, donc des périodes pendant lesquelles le réchauffement se ralentit et s'accélère. Néanmoins, il semble qu'une partie de la chaleur soit évacuée en profondeur, c'est-à-dire dans l'océan abyssal en dessous des 2 000 mètres. S'il est évacué en dessous de 2 000 mètres, alors nous avons peut-être un peu de répit parce que le temps de réponse de l'océan abyssal ne se mesure plus en dizaines d'années mais en centaines d'années. Il faut savoir cependant que la quantité de chaleur qui semble partir en profondeur n'est qu'une petite partie du réchauffement total. Néanmoins, cela crée une source d'incertitude supplémentaire.

### A quoi doit-on s'attendre?

La Figure 9 présente les projections du dernier rapport du GIEC pour deux scénarios d'évolution des forçages anthropiques[1]. Selon toute vraisemblance, nous nous trouverons entre ces deux cas, celui où nous n'avons pas brûlé toutes les réserves énergétiques (RCP 2.6) et celui où nous avons brûlé un peu plus que les réserves énergétiques prouvées (RCP 8.5).

La distribution du réchauffement est en haut et les précipitations en bas. On voit évidemment qu'un réchauffement planétaire de l'ordre de 5 à 6 degrés (trajectoire 8.5) n'est pas homogène à la surface de la planète. Le réchauffement sera beaucoup plus conséquent en haute latitude et sur les continents. Les précipitations augmenteront dans les zones où il y a déjà beaucoup de précipitations et diminueront dans les zones où il y en a déjà peu. Enfin, il se produira très probablement un assèchement tout autour du bassin méditerranéen.

[1] Description des scénarios en annexe 3

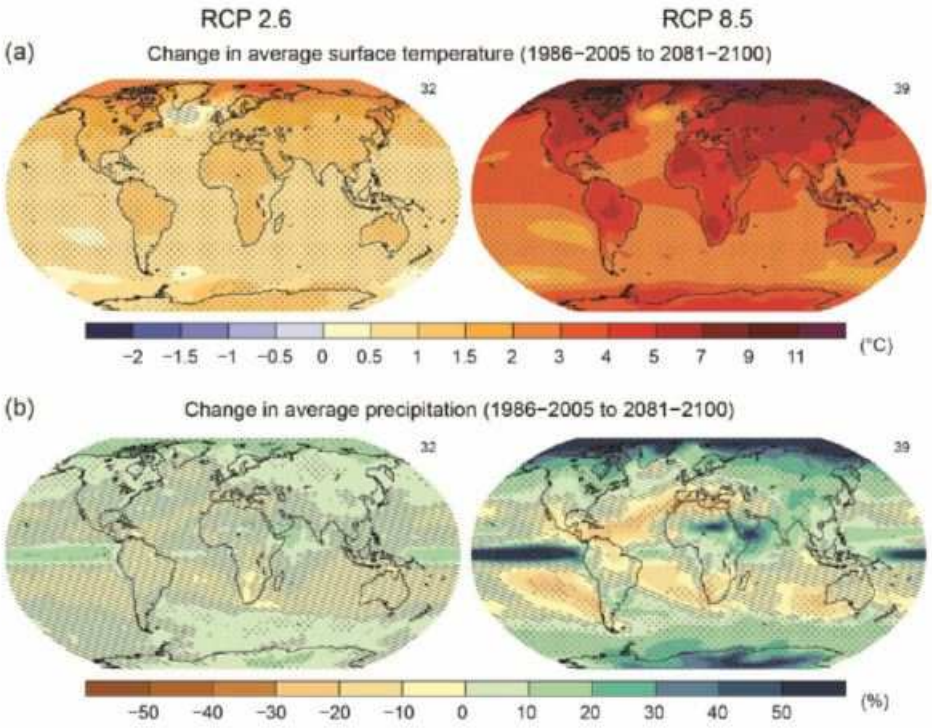



*Figure 9 : Evolutions de températures et de précipitations entre 1986-2005 et 2081-2100 selon deux modèles (RCP 2.6 et RCP 8.5)*

### Les risques et les possibilités d'adaptation (rapport du Groupe 2 du GIEC)

Le rapport du deuxième groupe du GIEC sur les problèmes d'impact, d'adaptation et de vulnérabilité est paru en 2014.

Le risque est le croisement entre les aléas, c'est-à-dire la probabilité d'un événement extrême ou d'un événement gênant, l'exposition à cet événement et la vulnérabilité (Figure 10). C'est ainsi que le GIEC a essayé d'estimer les risques encourus par telle ou telle région ; sans oublier que le problème essentiel, ce n'est pas la moyenne mais ce sont les extrêmes. Le cyclone Pam qui a dévasté les Vanuatu en mars 2015 est un exemple d'événement extrême. En Europe de l'Ouest, ces extrêmes sont surtout les vagues de chaleur, la vague de chaleur de 2003 étant particulièrement exceptionnelle.

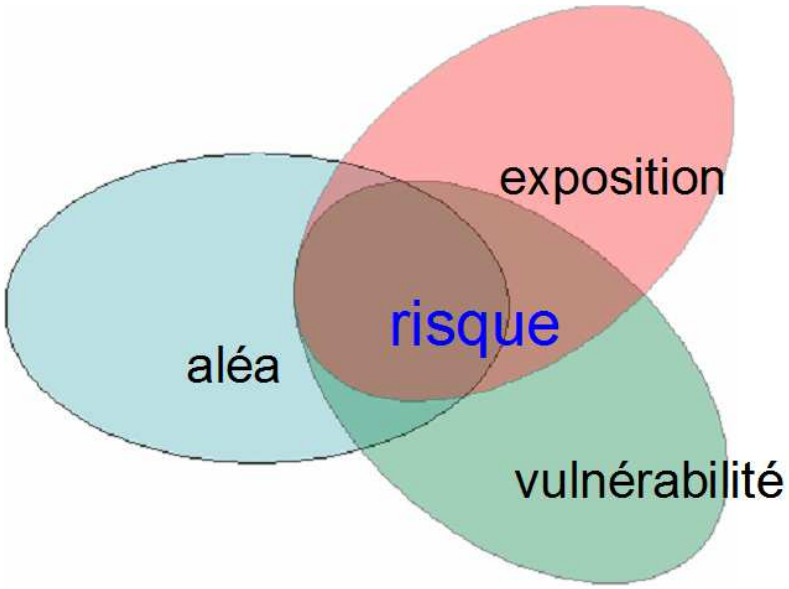



*Figure 10 : Le risque est le résultat de l'exposition aux aléas et de la vulnérabilité d'une population*

La Figure 11 est la statistique des températures moyennes des étés depuis 1900 en Suisse. Les températures se distribuent assez bien sur une courbe de Gauss (en vert) centrée aux environs de 17 degrés. L'été 2003 sort totalement de la statistique.

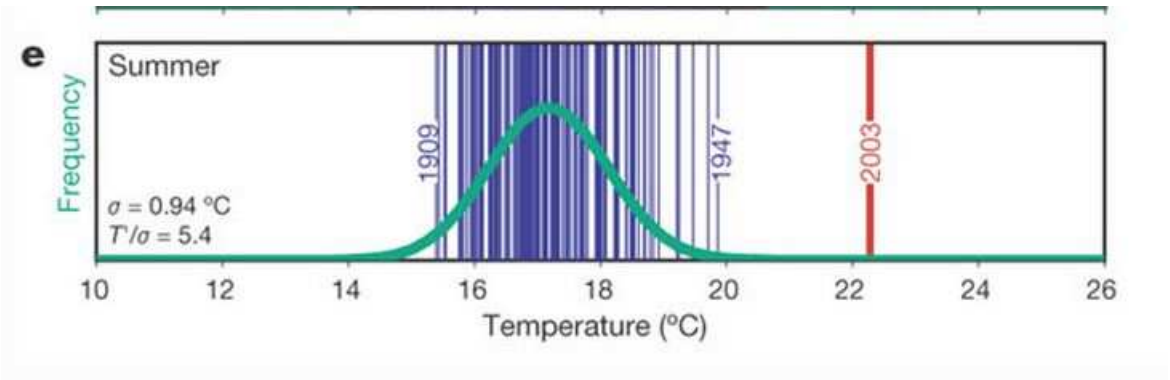



*Figure 11 : Statistique des températures moyennes des étés en Suisse entre 1900 et 2004 (d'après Schär et al, Nature, 2004).*

Les modèles utilisés pour simuler ce qui se passera au cours du XXIe siècle ont été validés sur les températures observées au XXe siècle (Figure 12, en haut). En ce qui concerne le réchauffement, la statistique s'élargit très fortement vers la fin du XXIe siècle avec un décalage, mais également un élargissement. Cela signifie que les vagues de chaleur extrêmes seront bien plus extrêmes que les vagues de chaleur actuelles. Une vague de chaleur comme celle de 2003 ne sera plus exceptionnelle. Les figures ci-après donnent une idée du réchauffement sur l'ensemble de l'Europe et des zones où la variabilité sera maximale, que l'on repère sur la figure de droite.

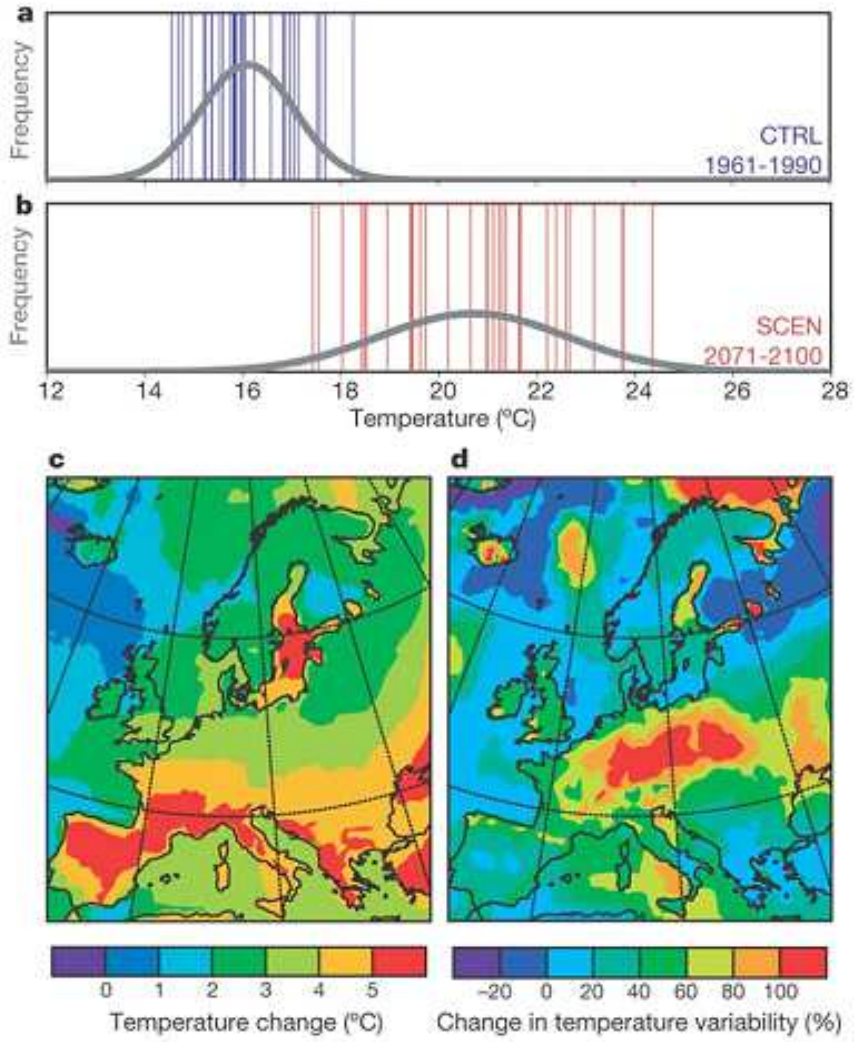



*Figure 12 : Simulation des températures moyennes en été en Suisse pour la période de contrôle (a), projections pour la fin du siècle (2010-2100) (b), répartition des anomalies (c) et répartition de la variabilité d'une année sur l'autre (d) d'après Schär et al, Nature , 2004.*

La Figure 13 résume les risques estimés par le Groupe II du GIEC pour l'Europe. Le risque clé est noté dans la colonne de gauche du tableau : les inondations, la raréfaction de la ressource en eau, les vagues de chaleur et leur impact sur la santé, la productivité, la qualité de l'air, les incendies. La colonne qui suit est l'indice de confiance : la confiance est élevée pour les inondations, la raréfaction des ressources en eau, mais assez moyenne sur les impacts des vagues de chaleur sur la santé.

À droite, la barre hachurée représente le risque dans une échelle qui va de risque très faible à risque très élevé. La totalité de la barre, parties pleine et hachurée, représente le risque estimé avec les moyens d'adaptation que possède l'Europe actuellement. La partie pleine est le risque avec des moyens d'adaptation idéaux. Développer les moyens d'adaptation pour tenir compte de ce risque élevé est ce que l'on peut faire de mieux pour faire face à ces aléas.

Pour le long terme, deux scénarios sont possibles : un scénario correspondant à un réchauffement de 2 degrés à la fin du siècle et un scénario à 4 degrés. Pour le scénario à 2 degrés, on attend, vers la fin du siècle, un risque moyen à élevé en ce qui concerne les inondations, un risque moyen à élevé également pour la raréfaction de la ressource en eau et un risque à peu près du même ordre pour l'impact des vagues de chaleur, ceci sans adaptation. En Europe, des capacités d'adaptation élevées pourraient permettre de rester dans des limites tout à fait soutenables. C'est justement le problème qu'aborde la démarche CERCLE. Comment s'adapter à un monde qui sera changeant ? Comment s'arranger pour que les risques soient dans la partie pleine et non dans la partie hachurée ? Comment rester sur des risques très faibles à moyens ?

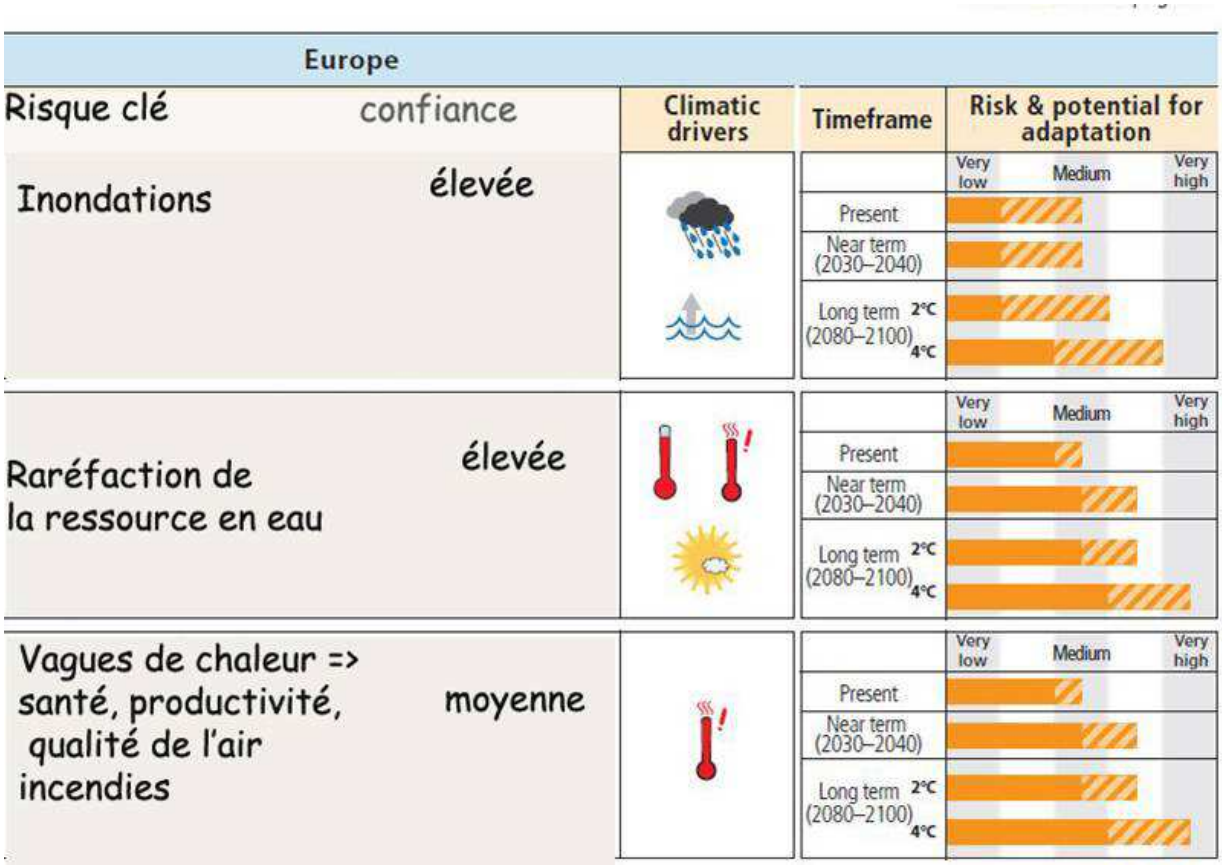



*Figure 13 : Principaux risques, degré de confiance, niveaux de ces risques et possibilités d'adaptation pour l'Europe (colonne de droite). La barre horizontale entière (plein + hachuré) représente l'évaluation du risque pour les conditions actuelles d'adaptation, la partie pleine correspond au risque pour une adaptation maximum. (GIEC, AR5, WG2 Summary for Policy Makers).*

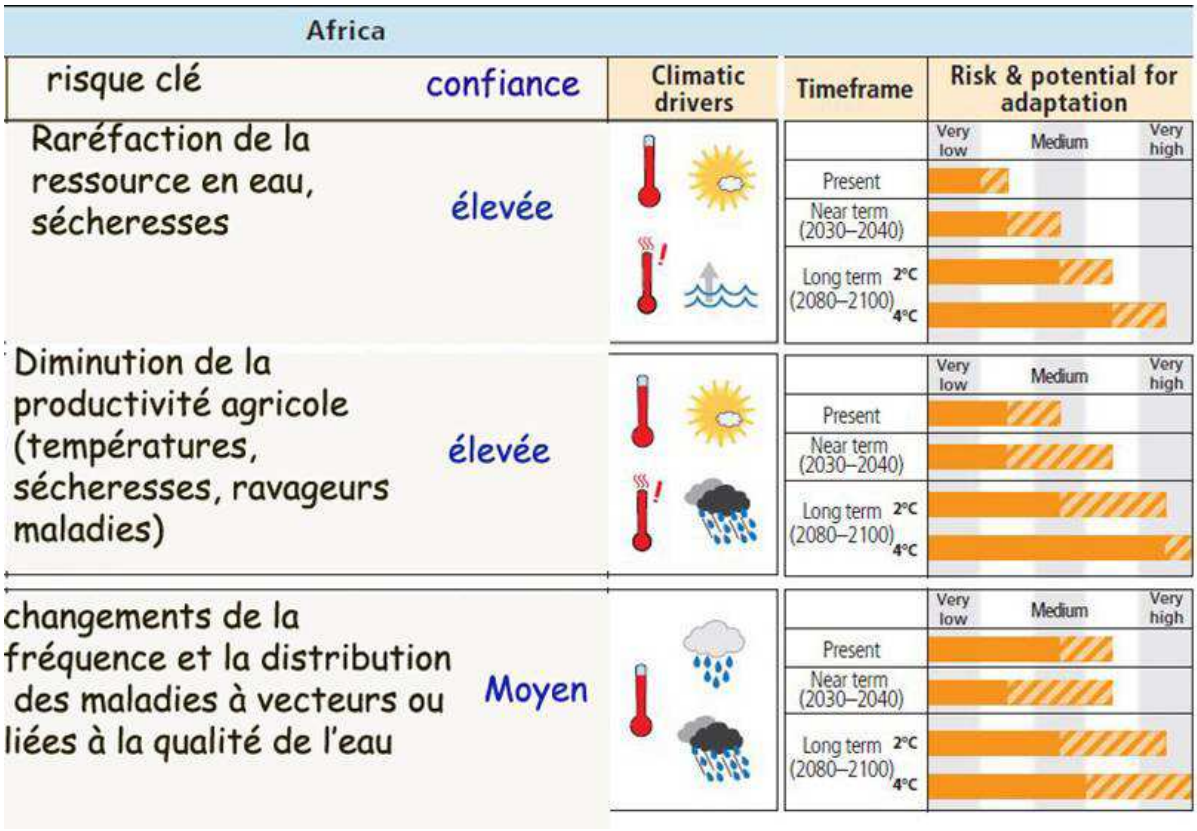



*Figure 14: Principaux risques, degré de confiance, niveaux de ces risques et possibilités d'adaptation pour l'Afrique (colonne de droite). La barre horizontale entière (plein + hachuré) représente l'évaluation du risque pour les conditions actuelles d'adaptation, la partie pleine correspond au risque pour une adaptation maximum. (GIEC, AR5, WG2 Summary for Policy Makers).*

L'Europe ne sera pas la région la plus martyrisée par le réchauffement climatique. L'Afrique connaîtra une situation bien pire. Par exemple, les barres horizontales, y compris la partie hachurée, c'est à dire avec les capacités d'adaptation actuelles montrent des risques très élevés, que ce soit pour la ressource en eau ou pour la diminution de la productivité agricole. Pour ces risques, le degré de confiance[2] est élevé. Pour ce qui concerne les risques sanitaires, il est très élevé mais la confiance reste moyenne. L'Afrique compte actuellement 1,2 milliard d'habitants, en comptera 2,5 milliards vers 2050 et possiblement 4 milliards à la fin du XXIème siècle avec une exposition au risque tout à fait considérable. Il faut s'attendre à ce qu'une partie des problèmes du réchauffement climatique soit, en fait, importés et se traduisent par des crises géopolitiques en particulier au travers d'une augmentation des flux migratoires.

2 Le degré de confiance est une estimation qualitative basée sur l'état des connaissances actuelles des facteurs qui interviennent pour la région concernée dans les trois facteurs de la Figure 10.

### La régionalisation

A quoi faut-il s'attendre dans la région ? Les températures, dans la région et sur la France dans son ensemble, augmenteront probablement de 3 ou 4 degrés.

Dans le Nord - Pas de Calais, le climat est marqué par l'influence océanique de l'Atlantique Nord. Il y a deux centres d'actions majeurs. Le premier est l'anticyclone des Açores, qui appartient à la ceinture des anticyclones tropicaux induits par la circulation atmosphérique générale. Il est permanent mais sa position et son intensité varie. Le deuxième est une dépression quasi permanente sur l'Islande. Elle est liée à la dynamique, c'est-à-dire au flux d'ouest, caractérisée en altitude par les *jet streams* et défléchie par les Rocheuses et par le contraste entre océan et continent. Si, par exemple, l'anticyclone des Açores devient plus puissant et qu'en même temps, la dépression de l'Islande se creuse, on a une phase d'oscillation nord-atlantique positive (ONA+). Dans ce cas, l'application de ce que l'on appelle le vent géostrophique fait que l'air circule rapidement d'Ouest en Est entre dépression et anticyclone. C'est le temps typique des successions de perturbations ou de tempêtes. Plus le gradient de pression est élevé entre les deux centres, plus la vitesse du vent est élevée.

Nous connaissons bien ce phénomène car, dans les phases positives, l'Europe du Nord (au-delà de 45 degrés de latitude, soit au nord de la Loire) subit ces tempêtes. Dans sa phase négative, les pressions sur l'anticyclone des Açores s'affaiblissent, la dépression est moins creusée. Les tempêtes circulent plus au nord. Elles sont d'ailleurs moins puissantes puisque le gradient de pression est moins élevé. A ce moment, l'Europe du Sud reçoit sa part de perturbations.

Quel régime de temps cela donne-t-il ? On trouve quatre types de régime de temps à peu près équi-répartis dans leur proportion. La situation est plus claire en hiver qu'en été.

(1) Dans la phase positive ONA +, nos latitudes connaissent davantage de précipitations mais les températures sont relativement douces.

(2) En phase négative, il pleut plus au sud et il fait plus froid sur l'Europe du Nord.

(3) Une autre situation est celle pour laquelle l'anticyclone des Açores gonfle, les températures sont à peu près dans la moyenne hivernale. Lorsque cet anticyclone s'étend sur l'Europe de l'Ouest, il fait beau.

(4) La dernière situation est celle où l'anticyclone des Açores est fortement décalé vers l'Ouest et est devenu l'anticyclone des Bermudes. La dépression islandaise a quasiment disparu. Il y a un anticyclone puissant sur la Scandinavie. Il en résulte sur la région un flux d'air froid et des tempêtes de neige. Cela représente à peu près 30 % des cas.

Chacun de ces régimes, quand il est établi, dure une à deux semaines. Le quatrième régime, celui du blocage, peut durer éventuellement un peu plus longtemps car le froid a tendance à stabiliser les choses.

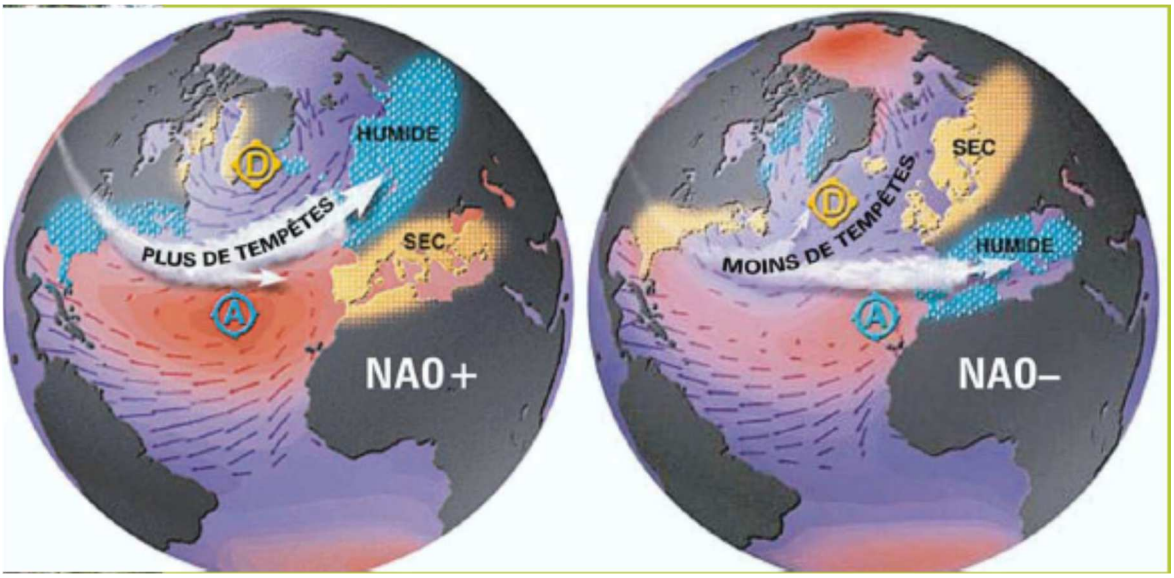



*Figure 15 : L'oscillation Atlantique Nord (NAO)*

Que va-t-il se passer dans un contexte de réchauffement ?

Le plus improbable serait que rien ne change. En effet, que l'une de ces opportunités augmente par rapport aux autres semble relativement logique. Laquelle ? Il n'est pas très évident de répondre à cette question. Le signal que donnent les modèles et le raisonnement est que le rail des perturbations, celui que suivent toutes ces dépressions se décalera un peu plus au nord. Cela donnera une prépondérance des phases d'oscillation positives, c'est-à-dire davantage de précipitations et de tempêtes en hiver. Cela n'est pas établi avec une certitude totale, mais semble relativement cohérent. Il faut également s'attendre à ce que ce système se déplace un peu vers le nord et qu'au Nord de la France, nous soyons pratiquement en limite. La Hollande, le Danemark, entre autres sont plus directement concernés.

### Une nécessaire modélisation

Pour aller au-delà, il faut modéliser. Or, modéliser le climat à l'échelle régionale ne se fait pas aisément car les modèles de circulation générale, les modèles climatiques ont une maille de résolution au sol, de l'ordre de 200 kilomètres, soit toute la région Nord - Pas de Calais.

Pour tenir compte dans certaines régions de l'orographie[3] ou de la proximité de la mer par exemple, il faut utiliser des modèles qui ont une échelle beaucoup plus fine, de l'ordre d'une dizaine de kilomètres. Une dizaine de kilomètres à l'échelle de la planète n'est pas aisée à réaliser. D'abord, cela demande des temps de calcul absolument fantastiques. De plus, de nombreux petits phénomènes apparaissent dont il faudra tenir compte. En général, on utilise une méthode de poupées russes : on emboîte les modèles les uns dans les autres. On prend un modèle régional à aire limitée sur l'Europe de l'Ouest, on le nourrit aux frontières par les sorties des modèles climatiques à grande échelle. Au début, cela était très difficile, les instabilités numériques étaient nombreuses. Maintenant, cela fonctionne plutôt bien.

[3] Description du relief terrestre

La deuxième méthode est très élégante mais, malheureusement, ne donne pas forcément de meilleurs résultats. Cette méthode a été développée par les Français. Elle consiste à utiliser un modèle dont la maille s'adapte. La maille peut donc être restreinte sur la France, de l'ordre de 50 kilomètres aux dépens d'une maille très large sur l'Australie (de l'ordre de 400 ou 500 kilomètres). Il y a moins d'instabilité numérique mais on ne descend pas en dessous de 40 ou 50 kilomètres.

Il existe un site sur lequel on dispose actuellement de toutes ces données accessibles gratuitement, c'est DRIAS (voir l'article de Eric Barbay dans ce recueil). Météo France et l'Institut Pierre-Simon Laplace ont rendu disponible l'ensemble de leurs données. La suite est issue des données disponibles grâce à ce portail.

La Figure 16 présente l'évolution des températures et des précipitations pour Lille dans le cas du scénario intermédiaire A1B.

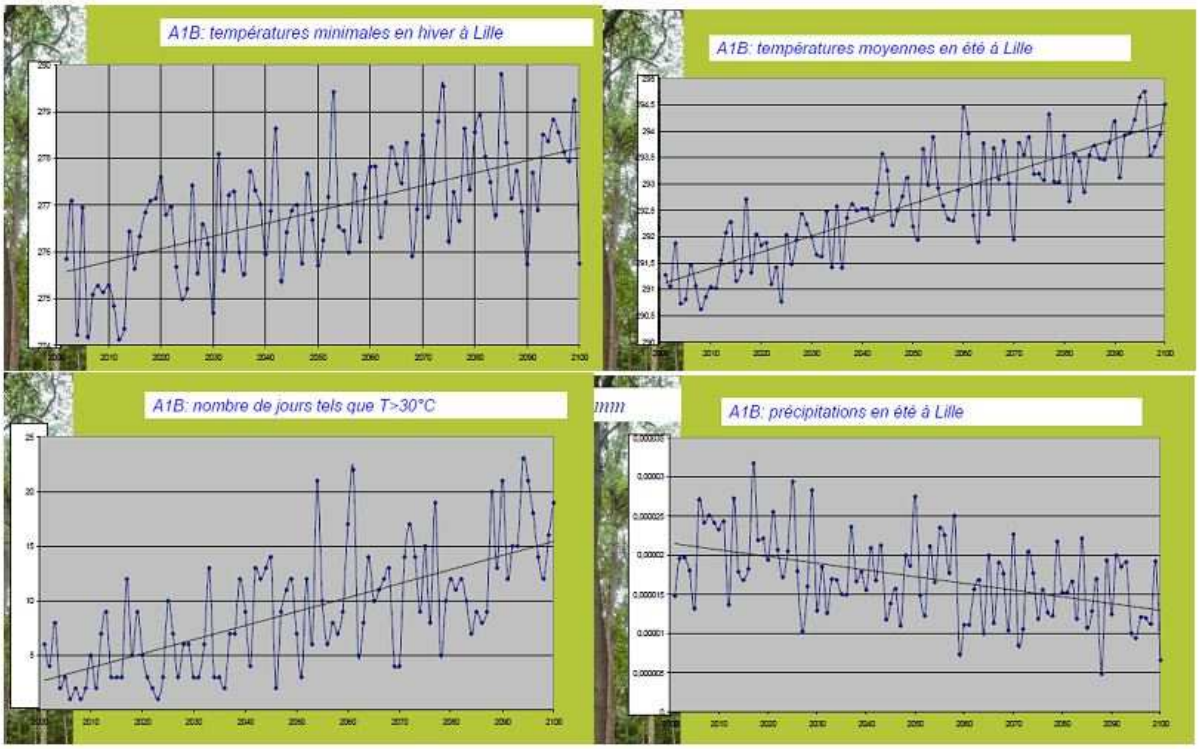



*Figure 16 : Evolution des températures et des précipitations à Lille en fonction du scénario A1B proposé par le GIEC (source DRIAS)*

Les températures moyennes en hiver (en haut, à gauche) évoluent bien sûr à la hausse mais avec beaucoup d'oscillations d'une année sur l'autre. Il y aura encore des années froides, des années avec beaucoup de précipitations, d'autres avec peu. Ce ne sont pas les moyennes qui importent, ce sont les extrêmes climatiques car ce sont eux qui rendent la vie difficile.

Le scénario A1B (Figure 16) est un scénario assez probable si les efforts de réduction des émissions tardent à porter leurs fruits. Pour ce scénario les 1 000 gigatonnes de réserve évoquées plus haut seront brûlées d'ici à 2080 à peu près. Dans ce contexte, les précipitations diminueront. Le nombre de jours dans la région où la température sera supérieure à 30 degrés augmentera sensiblement.

Avec ce scénario, la région de Lille connaîtrait 9 vagues de chaleur sur les 20 dernières années du siècle

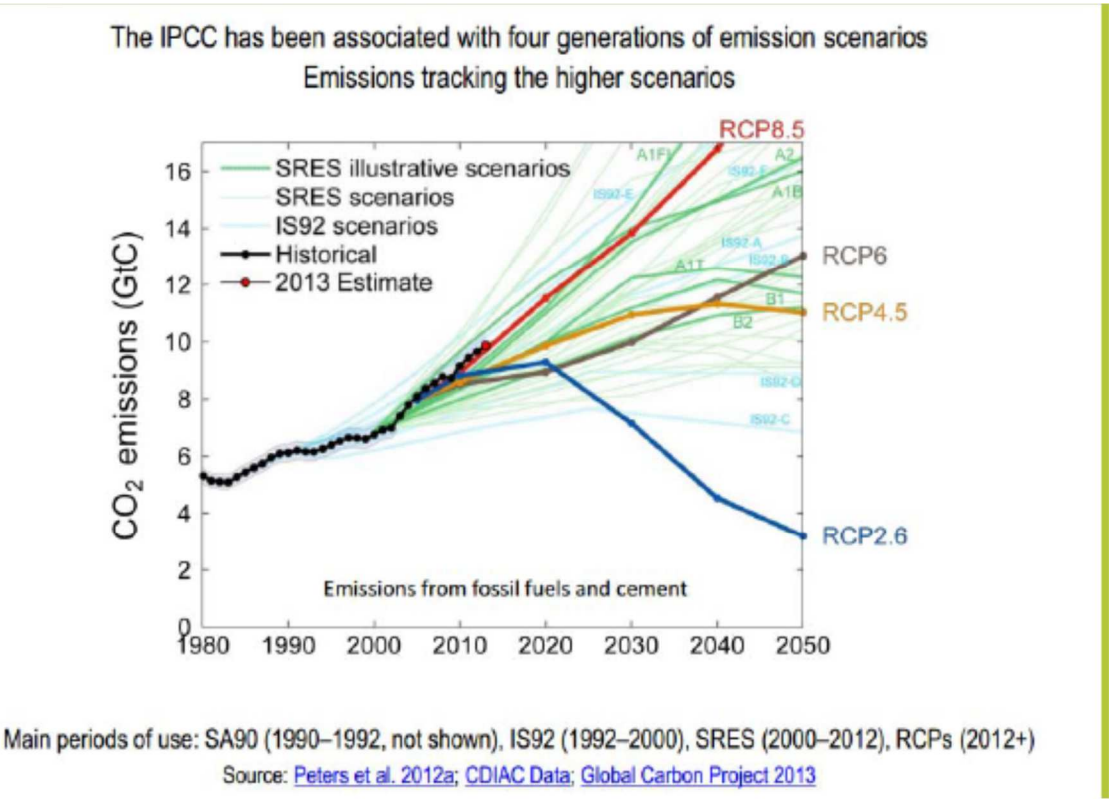



*Figure 17 : Les scénarios proposés par le GIEC*

### La hausse du niveau de la mer

Dans ce contexte, la question posée est celle de la hausse du niveau de la mer. Selon la synthèse du GIEC, le niveau de la mer monterait de 30 à 60 centimètres. Dans le cas du scénario le plus pessimiste où nous brûlons plus que 1 000 gigatonnes, nous pourrions friser le mètre.

En réalité, cette estimation est fort restrictive. En effet, elle ne tient pas compte des phénomènes non linéaires, liés essentiellement à la décharge des glaciers des grandes calottes que sont le Groënland et l'Antarctique Ouest (la péninsule Antarctique). Si on en tient compte, on dispose d'un élément de comparaison : lors de la dernière interglaciation, il y a 120 000 ans (cette période s'appelle l'Eémien), les températures étaient de l'ordre de 2 degrés plus élevées qu'au début ou qu'au milieu du XX$^{e}$ siècle, c'est-à-dire un gros degré de plus que maintenant. Le niveau de la mer a été de 6 mètres plus élevé que le niveau actuel.



*Figure 18 : Zones inondées en permanence pour une hausse du niveau de la mer de 1 mètre (http://www.floodmap.net/).*

Cela ne s'est pas fait du jour au lendemain. Cela ne s'est pas fait en 100 ans non plus. La température a été plus élevée de 2 degrés ou peut-être d'un peu plus pendant plusieurs siècles voire plusieurs millénaires. A la fin de cette période, le niveau de la mer a augmenté de 6 mètres. Cela correspond à seulement une partie de la fonte des calottes du Groënland et de l'Antarctique Ouest. Si ces deux calottes disparaissaient, le niveau des eaux monterait de 15 m. Certains éléments nous permettent donc de penser qu'une augmentation de 4 à 5 degrés conduirait à une décharge de ces calottes. Cette décharge a déjà commencé au Groenland. Ces calottes ne se déchargeront pas en un siècle mais elles commenceront probablement à le faire au cours de ce siècle-ci. Cette décharge contribuera à une hausse du niveau de la mer dont nombre de chercheurs disent qu'elle pourrait atteindre 2 mètres à l'horizon de la fin du siècle. Il y a dans la région des zones inondables pour seulement 1 mètre de hausse du niveau de la mer ; Gravelines, se trouverait donc sur une île (Figure 18).

La hausse moyenne du niveau de la mer n'est pas ce qui importe. Là encore, ce sont les extrêmes qui comptent, c'est-à-dire les hauteurs records. Des chercheurs de l'université de Southampton ont relevé les hausses du niveau de la mer et essayé de prévoir le temps de retour d'un événement extrême dans les villes anglaises (Figure 19). Douvres n'est pas très loin des villes côtières du Nord - Pas de Calais. On peut voir qu'en moyenne, un événement qui avait en 2000 un temps de retour de l'ordre de 60 ans aura une fréquence quasiment annuelle à l'horizon de 2100 et ceci avec l'hypothèse du GIEC et non avec l'hypothèse d'une hausse moyenne de 2 mètres. Cela ne tient pas compte d'une éventuelle intensification des épisodes de tempête.

| Site | 2000 | 2010 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 | 2060 | 2070 | 2080 | 2090 | 2100 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| St. Mary's | 58 | 33 | 19 | 10 | 6 | 3 | 2 | *360d* | *307d* | *119d* | *72d* |
| Newlyn | 61 | 37 | 22 | 13 | 7 | 4 | 2 | 1 | *254d* | *142d* | *81d* |
| Devonport | 65 | 42 | 27 | 17 | 10 | 6 | 4 | 2 | 1 | *237d* | *135d* |
| Weymouth | 63 | 39 | 23 | 14 | 8 | 4 | 2 | 1 | *260d* | *138d* | *76d* |
| Southampton | 68 | 45 | 30 | 19 | 12 | 7 | 4 | 3 | 1 | *306d* | *173d* |
| Portsmouth | 65 | 42 | 26 | 16 | 9 | 5 | 3 | 2 | *342d* | *190d* | *101d* |
| Newhaven | 75 | 54 | 38 | 26 | 18 | 11 | 7 | 4 | 2 | 1 | *299d* |
| Dover | 81 | 65 | 51 | 40 | 30 | 22 | 16 | 11 | 8 | 5 | 4 |
| Sheerness | 80 | 63 | 49 | 37 | 28 | 21 | 15 | 11 | 8 | 5 | 4 |
| Average | 69 | 47 | 32 | 21 | 14 | 9 | 6 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| Factor increase | 1·5 | 2·1 | 3·2 | 4·7 | 7·1 | 10·7 | 16 | 25 | 38 | 59 | 100 |

Where return periods are < 1 year, the return period is converted to days rather than years and the number is followed by the letter *d* and is in italics.

Table 3. Changes to the return periods (years) of the return level with a 100 year return period in 1990 through the twenty-first century for the medium emissions relative sea-level rise scenario

*Figure 19 : Prévision de hausse du niveau de la mer dans les villes côtières anglaises (Nicholls et Wells: http://www.scopac.org.uk/meeting_10.02.12/ICE_maen164-081.pdf)*

### Quels sont les impacts positifs ?

Pour finir sur une note plus optimiste, pourquoi ne pas penser à de possibles impacts positifs ? Nous habitons une région tempérée. La température augmentera mais la région restera tempérée. Une nuit tropicale est une nuit où la température ne descend pas en dessous de 20 degrés. C'est un événement difficile à vivre. La Figure 20 montre que le nombre de nuits tropicales dans le Sud-Est et même dans le Sud-Ouest sera assez conséquent.

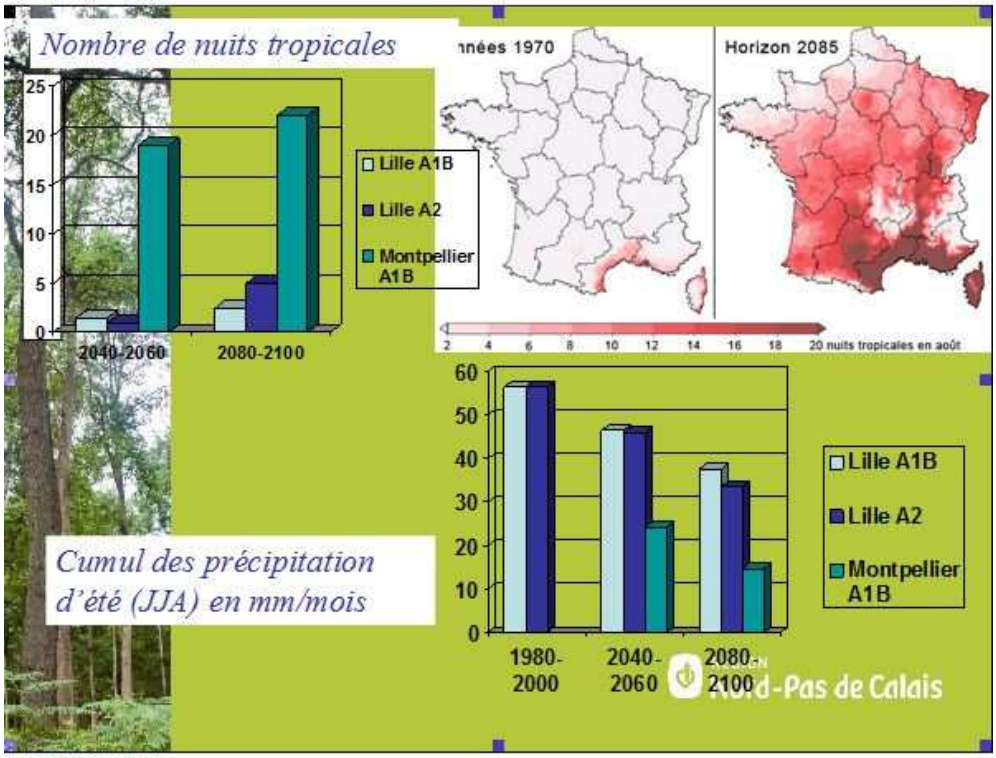



*Figure 20 : Les évolutions du climat – Comparaison entre Montpellier et Lille*

Le Nord - Pas de Calais connaîtra aussi des nuits tropicales mais fort peu, même dans le cas du scénario le plus pessimiste (A2). La région reste tempérée. A l'horizon de 2100, la fréquence des nuits tropicales à Montpellier pourrait atteindre 20 nuits par mois d'été contre 4 ou 5 à Lille.

En ce qui concerne les précipitations, elles diminueront en été mais resteront conséquentes, tandis que les régions du Sud-Est, Montpellier en particulier, passeront en régime de quasi sécheresse pendant les mois d'été.

On ne peut certes pas parler d'impacts directement positifs mais la situation de la région sera très probablement plus favorable ou nettement moins défavorables que pour d'autres. Il y a là peut être un avantage disons concurrentiel à ne pas négliger.

Jusqu'à présent notre capacité à prédire le futur reposait sur le passé. On disait que cela s'était produit et risquait d'arriver à nouveau. Il y a encore beaucoup de gens pour dire que c'est cyclique. Il faut se déshabituer de cela car ce que nous avons connu dans le passé ne se reproduira pas nécessairement. Nous sortons des limites de l'épure et nous voyons qu'avec cette augmentation très probable de 3 ou 4 degrés, nous entrons en zone inconnue. Certes la Terre a connu des températures nettement plus élevées mais seulement dans un passé lointain, un passé dans lequel l'homme n'était pas même présent.

On dépasserait donc cette limite des 2 degrés. Cette limite n'est évidemment pas à assimiler à une frontière qui nous séparerait du chaos, mais elle indique les limites d'un monde connu.

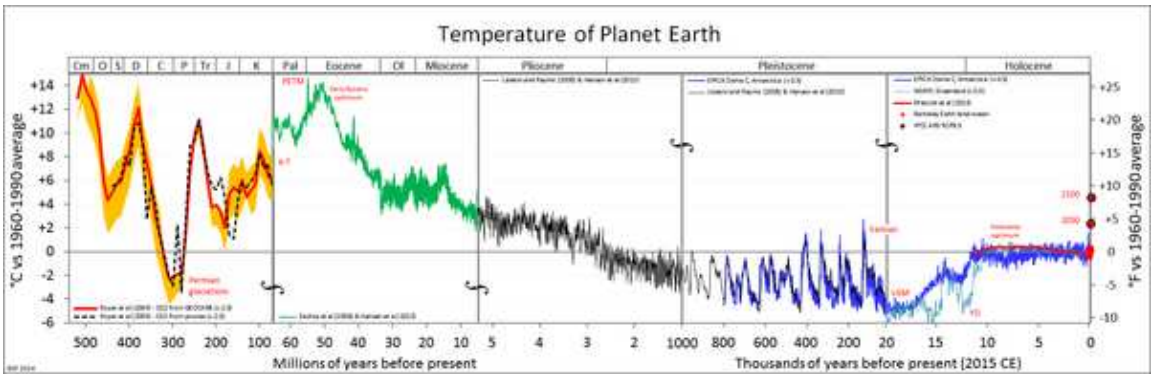



*Figure 21 : Variations de la température moyenne de la Terre au cours des 500 derniers millions d'années (http://en.wikipedia.org/wiki/Paleoclimatology)*

La Figure 21 représente les paléo-enregistrements de température depuis 500 millions d'années. L'échelle varie. Sur la gauche, elle va de 100 à 500 millions d'années alors que sur la droite, est présenté le dernier million d'années. Les températures sont estimées à partir de « proxys », c'est-à-dire de quantités dont les variations témoignent de celles de la température : carottes de glace, fossiles que l'on trouve dans les sédiments marins et sur lesquels on analyse les rapports de concentration des isotopes de l'oxygène, etc.

Ainsi, depuis un bon million d'années, la température n'a jamais augmenté de plus de 2 degrés. Cela va même plus loin. Depuis 1,5 million à 2 millions d'années, la température est restée sensiblement dans cette limite. Il ne s'agit évidemment pas d'un chiffre précis, ce pourrait être 2,5 degrés. Personne évidemment n'imagine sérieusement que si la température planétaire augmentait de plus de 2 degrés ou même 2,5 degrés cela serait une catastrophe immédiate pour tout le monde mais tout au moins, on sait que si dans le passé, la planète a connu des températures plus chaudes qu'aujourd'hui de 2 degrés ou un peu plus, cela n'a pas entraîné de changement radical du climat puisque l'alternance des glaciations a perduré. Au-delà de ces 2 degrés, on entre en terre inconnue. Rester sous ces 2 degrés relève en quelque sorte du principe de précaution.

Evidemment, on peut espérer que la conférence qui aura lieu à Paris en décembre 2015 aboutisse à une réelle limitation des émissions mais il vaut mieux prévoir de s'adapter car de toute manière, le réchauffement est devant nous.

### Alarmisme ?

La quasi-totalité des spécialistes du climat se reconnaissent dans les conclusions du GIEC. Est-on alarmiste ? Le météorologiste Lorenz disait en substance que le battement d'ailes d'un papillon quelque part en Amazonie pouvait provoquer, trois semaines plus tard, une tempête de force 10 sur l'Est de l'Atlantique. On cite souvent cet exemple à propos de la théorie du chaos mais cela ne s'applique pas seulement au fonctionnement dynamique de l'atmosphère. C'est tout le système qui est totalement interconnecté. Nos sociétés sont, quoi que l'on en pense, extrêmement interdépendantes avec leur environnement.

Cela gêne car, philosophiquement, nous avons été élevés dans l'idée que ce monde nous appartenait, que l'on pouvait en faire ce que l'on voulait et y rejeter tout ce que l'on voulait, que les ressources et les puits étaient infinis, que l'on pouvait y aller sans se limiter. On s'aperçoit maintenant que ce n'est pas vrai. Nous vivons dans un monde totalement interconnecté et pas seulement du point de vue de Facebook ou Twitter. Il est également interconnecté par les mouvements de l'atmosphère et de l'océan, et la biologie interagit avec la chimie de l'atmosphère et par là avec le réchauffement climatique. Nous sommes totalement dépendants de cela.

### Références bibliographiques


Cook, J., Nuccitelli, D., Green, S.A., Richardson, M., Winkler, B., Painting, R., Way, R., Jacobs, P., Skuce, A., 2013. Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature. *Environ. Res. Lett.* 8

IPCC, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer, eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

Mann, M.E., Bradley, R.S., Hughes, M.K., 1998. Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature* 392 (6678), p. 779–787

# DRIAS, les futurs du climat

Eric BARBAY

Météo France

L'objectif de cet exposé est de présenter DRIAS (http://www.drias-climat.fr/), un portail à la disposition du public qui rassemble un grand nombre de simulations sur le climat effectuées par des organismes dont Météo France et l'Institut Pierre-Simon Laplace. DRIAS est un projet du ministère de l'Écologie qui a commencé en 2008 et s'est terminé en 2012, coordonné par la direction de la climatologie de Météo France et a rassemblé différents groupes de modélisation (le centre de recherche de Météo France, l'Institut Pierre Simon Laplace, le CERFACS : Centre européen de calcul scientifique). Il a été validé par un comité d'utilisateurs. Les informations qui sont sur DRIAS sont gratuites et libres d'exploitation.

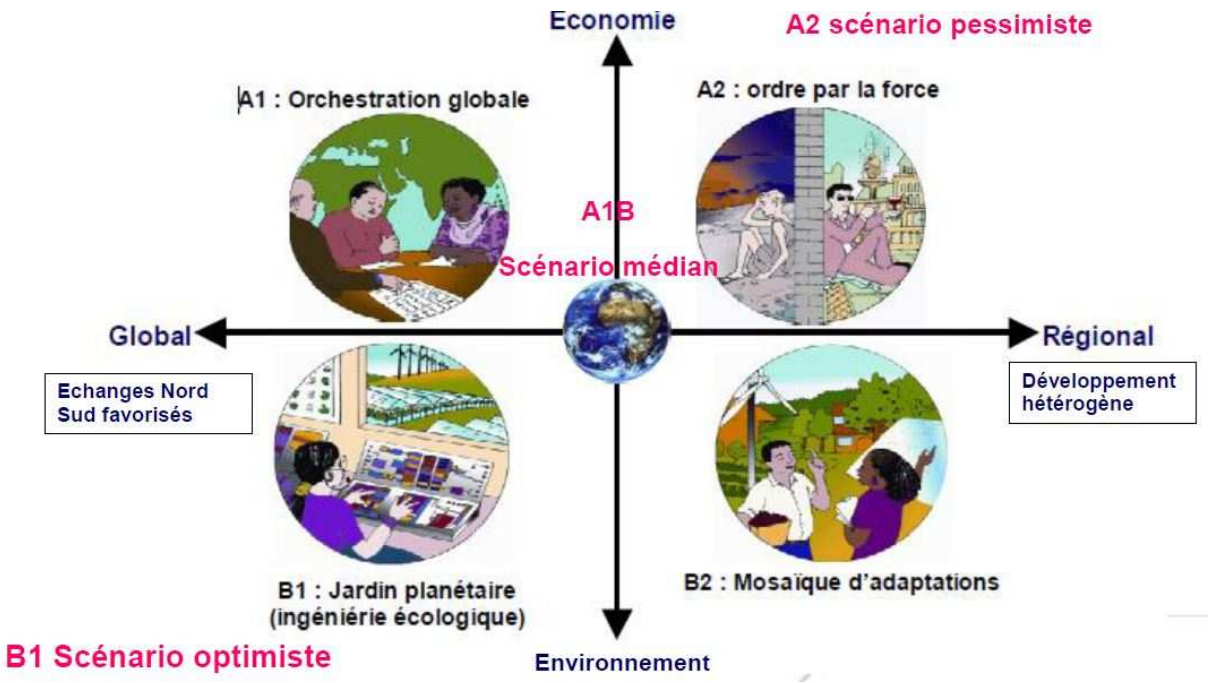



*Figure 1 : les anciens scénarios du GIEC basés sur des hypothèses de développement économique dont on déduit l'évolution des concentrations en gaz à effet de serre*

Le schéma de la Figure 1 rappelle les anciens scénarios, correspondant au sigle SRES[1], qui étaient des scénarios d'évolution des émissions de gaz à effet de serre et d'évolutions économiques. Les nouveaux scénarios sont appelés RCP, pour Representative concentration pathways. L'intérêt est de pouvoir découpler le travail des chercheurs sur les scénarios du climat et sur les scénarios économiques autour de trajectoires RCP imposées. Les quatre

[1] Special Report on Emissions Scenarios

scénarios s'appellent RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6 et RCP 8.5, le chiffre correspondant au forçage radiatif en watt par mètre carré. Un forçage radiatif est un déséquilibre du bilan énergétique de la planète provoqué dans le cas présent par l'augmentation de l'effet de serre. RCP 2.6 correspond à un forçage de 2,6 watts par mètre carré, RCP 8.5, qui est le plus « pessimiste », à un forçage de 8,5 watts par mètre carré en 2100. D'après les projections, seul le scénario RCP 2.6 permet de rester en dessous du seuil de + 2 degrés, et nous sommes actuellement plutôt vers le scénario 8.5. Cela signifie que, pour arriver au scénario 2.6, un effort considérable est à fournir.

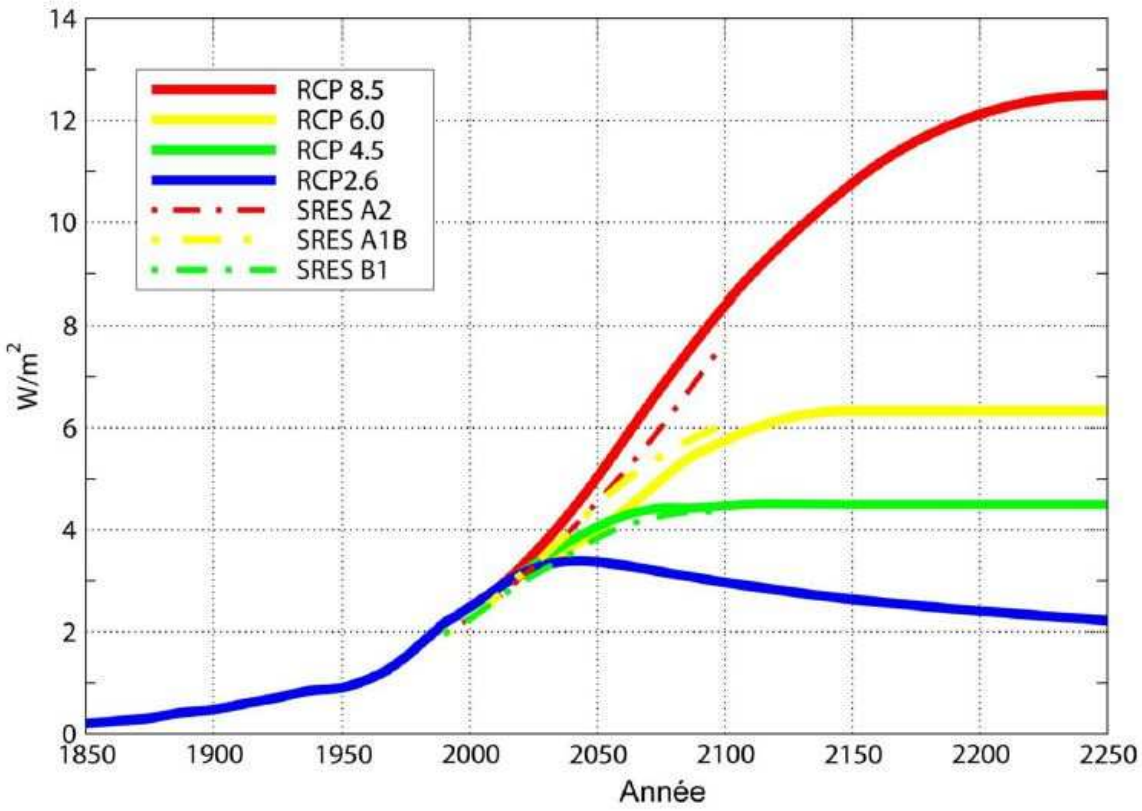



*Figure 2 : Comparaison de l'évolution des forçages radiatifs pour les anciens et les nouveaux scénarios du GIEC*

En termes quantitatifs, les scénarios sont proches (Figure 2) : en ordonnée le forçage radiatif et en abscisse le temps ; en pointillé les anciens scénarios SRES et en traits pleins les nouveaux RCP. On peut voir que, jusqu'à 2100, les courbes sont proches. Sur le plan d'évaluation des émissions, c'est surtout le découplage sur les scénarios économiques et climatiques qui marque une évolution.

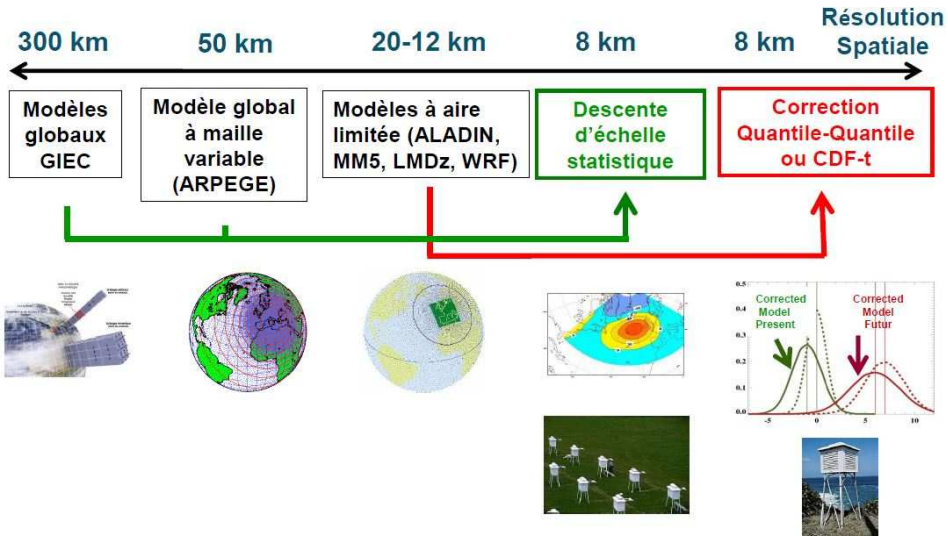



*Figure 3 : Modélisation climatique et descente d'échelle*

Les modèles disponibles dans DRIAS sont des modèles globaux et des modèles à échelle fine. La Figure 3 retrace les différences et les opérations nécessaires pour passer de l'un à l'autre. Les modèles globaux sont utilisés pour les simulations du GIEC. Ils ont une maille de l'ordre de 300 km. Avec une telle maille, les montagnes, notamment, sont mal représentées : les Alpes à peine et le Jura pas du tout. On superpose donc à ces modèles de grande échelle des modèles à maille plus fine. Le modèle à maille variable Arpège est une maille étirée qui permet de réduire la dimension de la maille à un endroit plus précis, par exemple l'Europe. Ensuite, les modèles à maille limitée tels qu'Aladin etc., sont forcés par les conditions de grande échelle des modèles globaux et permettent de descendre à des mailles de 20 à 12 km.

Il existe également des modèles de descente d'échelle qui sont purement statistiques. On regarde les relations statistiques entre les paramètres de grande et de petite échelle dans le présent ou le passé et on considère que cette relation est conservée dans l'avenir. Cela veut dire que l'information sur un changement climatique est dans la projection de grande échelle. Ensuite, on fait l'hypothèse que les mêmes lois statistiques de transfert d'échelle resteront valables dans l'avenir. Cela permet de descendre à des échelles de 8 km et de représenter de façon réaliste les projections dans le climat local. On opère également des corrections quantile-quantile[2] quand on veut s'intéresser aux extrêmes. On essaye de transposer les courbes de variabilité du passé-présent vers l'avenir pour corriger les projections du modèle.

[2] Méthode de correction permettant de corriger le biais d'une simulation climatique. Cette méthode consiste à corriger les valeurs des quantiles calculés par le modèle par ceux issus des observations. En chaque point du modèle, pour chaque variable météorologique, les 99 centiles des séries quotidiennes sont calculés. Il en est de même pour les séries observées. La fonction de correction associe chaque centile du modèle au centile observé. Ainsi toute la distribution statistique d'une variable météorologique simulée est corrigée quantile par quantile, étant donné le biais pour chaque quantile établi sur le climat présent.

Ces différents modèles sont présents dans DRIAS (Figure. 4). Des scénarios que l'on appelle des SCRATCH correspondent à des descentes d'échelle statistiques. Des scénarios SCAMPEI sont des descentes d'échelle dynamiques ; SCAMPEI était un projet qui visait à faire des projections à échelle fine, pour représenter en particulier le climat montagneux, ce qui manquait au scénario de grande échelle, ainsi que la variabilité climatique, en utilisant des corrections quantile-quantile. Les scénarios IPSL correspondent à des descentes d'échelle dynamique. Sur DRIAS, sont nommés l'expérience, le modèle, le scénario disponible et l'organisme qui l'a fait. Il y a également des modèles CNRM et IPSL.

En résumé (Figure 5), ces différentes expériences qui correspondent à différents modèles ont des conditions d'application qui peuvent être différentes. SRATCH est plutôt basé sur une descente d'échelle statistique ; il a été optimisé pour les applications hydrologiques et pour essayer de représenter l'échelle fine et plutôt les tendances et les dépassements de seuil. En revanche, pour les épisodes extrêmes, ce sont plutôt les descentes d'échelle dynamique qu'il faut utiliser, SCAMPEI par exemple, avec une bonne représentation des processus d'échelle fine, les montagnes, elles sont adaptées à l'étude des extrêmes et des dépassements de seuil.

Le portail DRIAS lui-même a trois espaces. L'espace d'accompagnement décrit les informations disponibles dans le portail avec des notions de base sur le changement climatique et un glossaire. L'espace découverte permet de visualiser des cartes de façon interactive d'indices climatiques (essentiellement température et précipitations mais pas seulement). La carte s'affiche avec les différents scénarios où l'on peut faire des zooms à l'échelle régionale. L'espace données et produits permet de télécharger des données.

Dans l'espace découverte, il existe deux niveaux de parcours : Initiation et Expert. Si l'on clique sur l'une des cartes dans le parcours initiation, par exemple « température », on a un modèle climatique avec plusieurs scénarios d'émission verticalement, et plusieurs horizons de projection horizontalement. Cela donne (Figure 6), si l'on prend une diapositive au centre, scénario RCP 4.5, horizon moyen, la représentation de la France avec un des modèles.

▪**SCRATCH08 : Descente d'échelle statistique**

Arpege étiré

Modèles globaux du GIEC

| Expérience | Identifiant | Scénario | Période | Modèle | Produc |
|---|---|---|---|---|---|
| SCRATCH08 | ARPEGE_RETIC | Référence | 1950-2000 | ARPEGE grille étirée NEC | Météo-France CNRM/GMGEC |
| SCRATCH08 | ARPEGE_RETIC | A1B | 2001-2100 | ARPEGE grille étirée NEC | Météo-France CNRM/GMGEC |
| SCRATCH08 | ARPEGE_RETIC | A2 | 2001-2100 | ARPEGE grille étirée NEC | Météo-France CNRM/GMGEC |
| SCRATCH08 | GIEC_France_CNRM | Référence | 1961-2000 | ARPEGE - Coupled Model 3 | Météo-France CNRM |
| SCRATCH08 | GIEC_France_CNRM | A1B | 2046-2065, 2081-2100 | ARPEGE - Coupled Model 3 | Météo-France CNRM |
| SCRATCH08 | GIEC_France_IPSL | Référence | 1961-2000 | CM4 | Institut Pierre-Simon Laplace |
| SCRATCH08 | GIEC_France_IPSL | A1B | 2046-2065, 2081-2100 | CM4 | Institut Pierre-Simon Laplace |
| SCRATCH08 | GIEC_Allemagne | Référence | 1961-2000 | ECHAM5 | Max Planck Institut for Meteorology |
| SCRATCH08 | GIEC_Allemagne | A1B | 2046-2065, 2081-2100 | ECHAM5 | Max Planck Institut for Meteorology |
| SCRATCH08 | GIEC_Canada | Référence | 1961-2000 | Coupled Global Climate Model 3 | Canadian Centre for Climate Modelling and An |
| SCRATCH08 | GIEC_Canada | A1B | 2046-2065, 2081-2100 | Coupled Global Climate Model 3 | Canadian Centre for Climate Modelling and An |
| SCRATCH08 | GIEC_USA_NCAR | Référence | 1961-2000 | Community Climate System Model | National Center for Atmospheric Research |
| SCRATCH08 | GIEC_USA_NCAR | A1B | 2046-2065, 2081-2100 | Community Climate System Model | National Center for Atmospheric Research |

▪**SCAMPEI : Descente d'échelle dynamique + correction Quantile - Quantile**

Aladin

LMDz

| Expérience | Identifiant | Scénario | Période | Modèle | Producteur |
|---|---|---|---|---|---|
| SCAMPEI | ALADIN | Référence | 1961-1990 | Régional Aladin | Météo-France |
| SCAMPEI | ALADIN | A1B | 2021-2050, 2071-2100 | Régional Aladin | Météo-France |
| SCAMPEI | ALADIN | A2 | 2021-2050, 2071-2100 | Régional Aladin | Météo-France |
| SCAMPEI | ALADIN | B1 | 2021-2050, 2071-2100 | Régional Aladin | Météo-France |
| SCAMPEI | LMDZ | Référence | 1961-1990 | LMDz (zoomé sur la France) | Laboratoire de Météorologie Dynamique |
| SCAMPEI | LMDZ | A1B-1 | 2021-2050, 2071-2100 | LMDz (zoomé sur la France), avec ΔT IPSL | Laboratoire de Météorologie Dynamique |
| SCAMPEI | LMDZ | A1B-2 | 2021-2050, 2071-2100 | LMDz (zoomé sur la France), avec ΔT CNRM | Laboratoire de Météorologie Dynamique |

▪**IPSL 2012 : Descente d'échelle dynamique + correction CDF-t**

LMDz

MM5

| Expérience | Identifiant | Scénario | Période | Modèle | Producteur |
|---|---|---|---|---|---|
| IPSL2012 | LMD | Référence | 1961-2000 | LMDz (zoomé sur la France) | IPSL (Institut Pierre Simon Laplace, Paris, France) |
| IPSL2012 | LMD | A1B | 2021-2050 | LMDz (zoomé sur la France) | IPSL (Institut Pierre Simon Laplace, Paris, France) |
| IPSL2012 | MM5 | Référence | 1961-2000 | Régional MM5 | IPSL (Institut Pierre Simon Laplace, Paris, France) |
| IPSL2012 | MM5 | A1B | 2021-2050 | Régional MM5 | IPSL (Institut Pierre Simon Laplace, Paris, France) |

▪**CNRM 2014 : Descente d'échelle dynamique + correction Quantile - Quantile**

Aladin

| Expérience | Identifiant | Scénario | Période | Modèle | |
|---|---|---|---|---|---|
| CNRM2014 | ALADIN | Référence | 1960-2005 | Aladin Climat corrigé QQ | Météo-France |
| CNRM2014 | ALADIN | RCP2.6 | 2006-2100 | Aladin Climat corrigé QQ | Météo-France |
| CNRM2014 | ALADIN | RCP4.5 | 2006-2100 | Aladin Climat corrigé QQ | Météo-France |
| CNRM2014 | ALADIN | RCP8.5 | 2006-2100 | Aladin Climat corrigé QQ | Météo-France |

▪**IPSL 2014 : Descente d'échelle dynamique + correction Quantile - Quantile**

WRF

| Expérience | Identifiant | Scénario | Période | Modèle | Producteur |
|---|---|---|---|---|---|
| IPSL2014 | WRF | Référence | 1971-2005 | WARF corrigé QQ | IPSL (Institut Pierre Simon Laplace) |
| IPSL2014 | WRF | RCP4.5 | 2006-2100 | WARF corrigé QQ | IPSL (Institut Pierre Simon Laplace) |
| IPSL2014 | WRF | RCP8.5 | 2006-2100 | WARF corrigé QQ | IPSL (Institut Pierre Simon Laplace) |

*Figure 4 : Les différents types de modèles et de descente d'échelle disponibles dans DRIAS (anciens et nouveaux scénarios)*

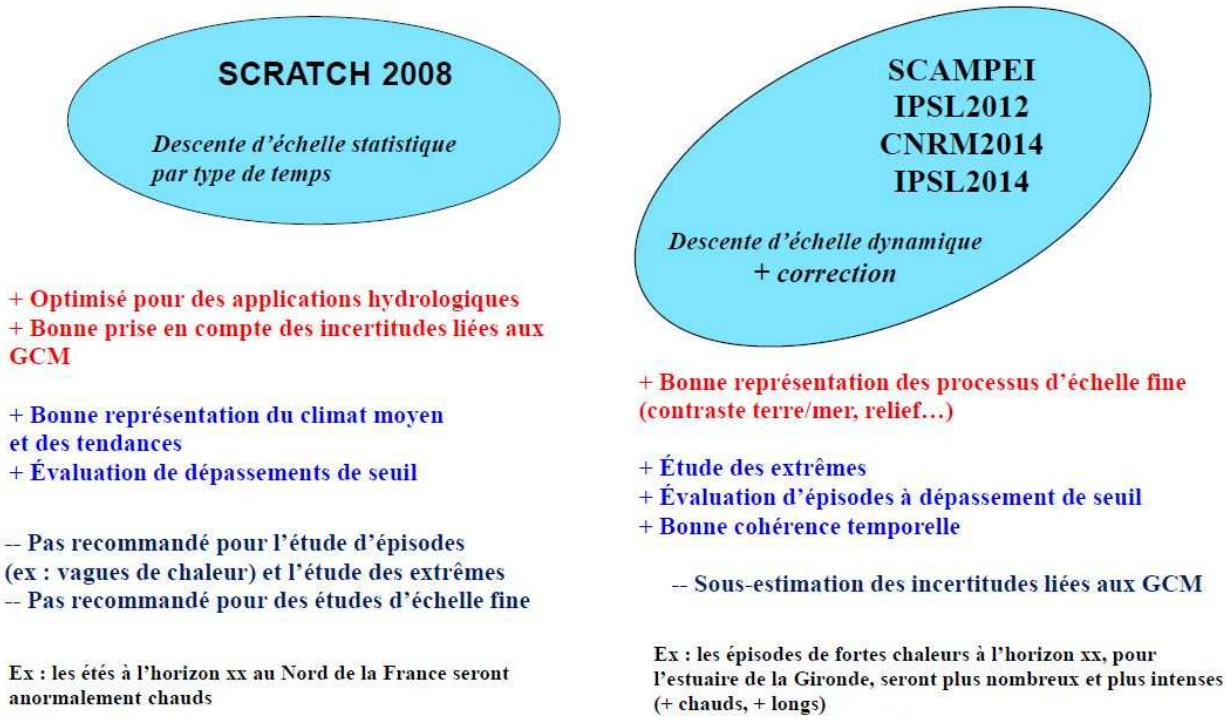



*Figure 5 : Les différentes expériences disponibles et leurs particularités*

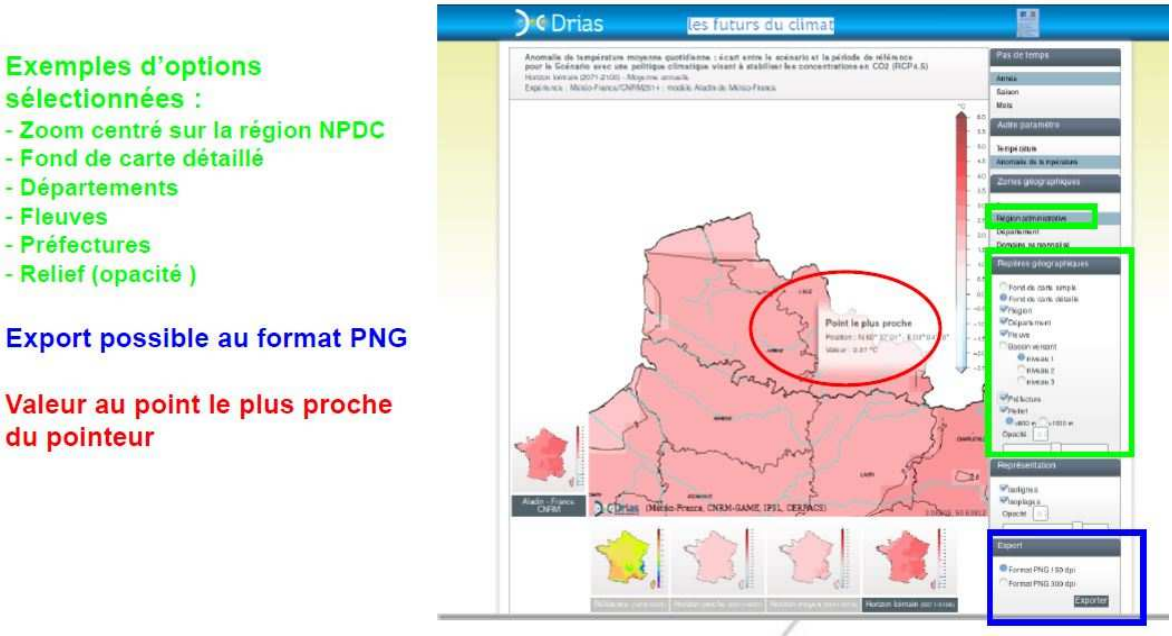



*Figure 6 : Espace découverte, parcours initiation*

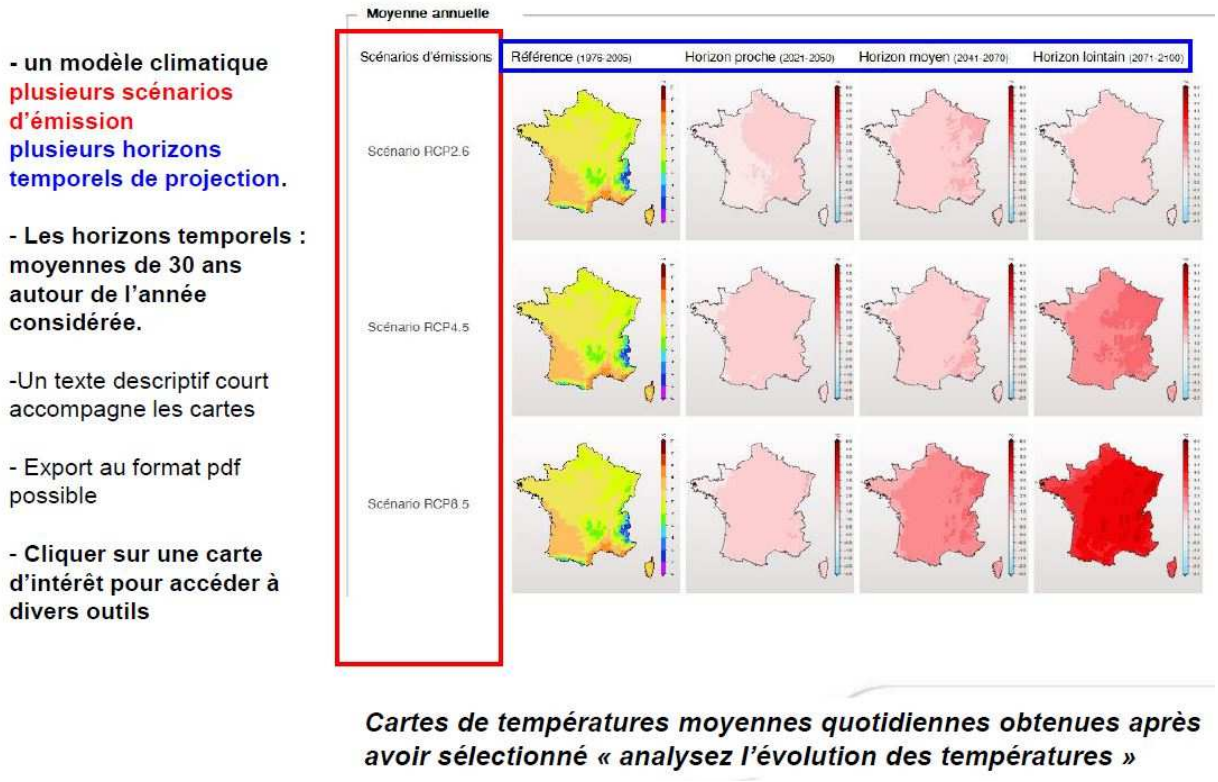



*Figure 7 : Espace découverte, parcours initiation, outils de personnalisation*

On peut encore, sur l'une des cartes correspondant chacune à un scénario, un horizon, un modèle, zoomer et représenter, en cliquant sur les items de droite, de façon plus fine, la géographie du territoire, le relief, les fleuves et également les frontières géographiques ou des régions administratives. La Figure 8 présente un zoom sur la région Nord - Pas de Calais.

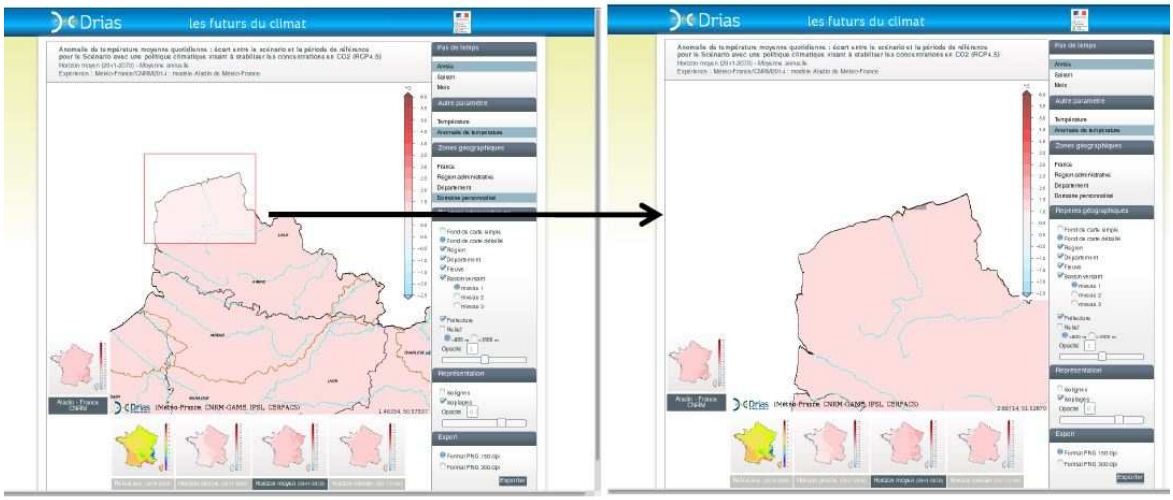



*Figure 8 : Zoom personnalisé dans le parcours initiation (espace découverte)*

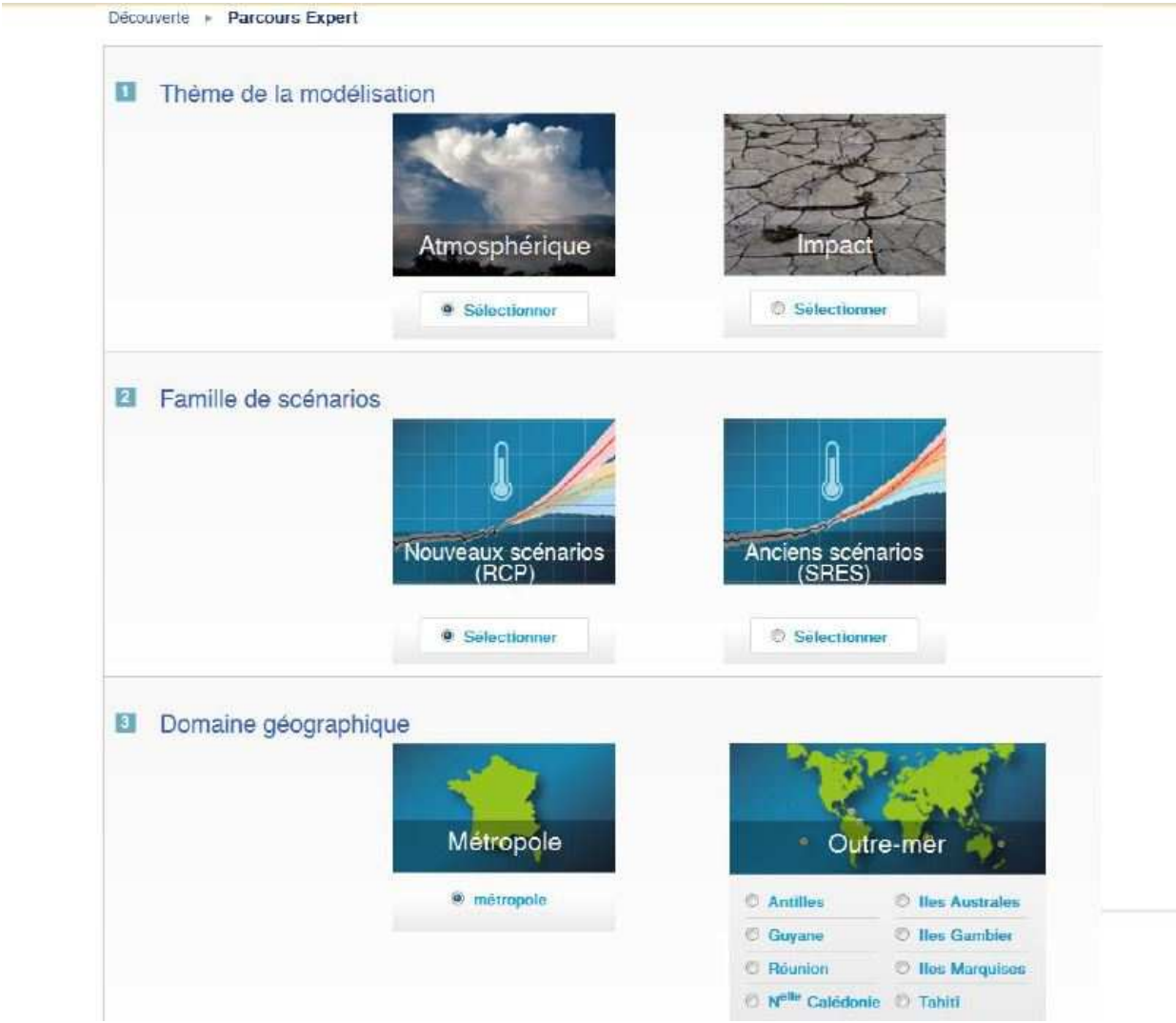



*Figure 9 : Parcours expert, menu d'entrée*

Pour le parcours expert, plusieurs entrées sont possibles (Figure 9). On peut s'intéresser soit aux données purement atmosphériques (température, précipitations, etc.), soit aux données impacts comme par exemple la sécheresse des sols, qui a été établie dans le cadre du projet CLIMSEC (sécheresse des sols et sécheresse météorologique, i.e. rareté des précipitations). Cette partie sera sûrement enrichie. Selon les données choisies, on a accès soit aux nouveaux scénarios, soit aux anciens scénarios, soit aux deux à la fois sur la métropole ou l'outre-mer. Les expériences sont, en général, de sélectionner certaines variables et certains scénarios. C'est ce qui est disponible dans DRIAS. Si on clique sur l'une des cartes, on va sélectionner les paramètres, les modèles, etc. et on obtiendra des cartes interactives du même type que celle que déjà montrée pour un parcours initiation, mais davantage personnalisées.




*Figure 10 : Simulation SCAMPEI données quotidiennes corrigées*

Dans le troisième espace, Données et Produits, on a accès aux différents scénarios également – ici SCAMPEI (Figure 10) –, aux différents horizons, tout ce qui a été réalisé dans le cadre des différentes expériences concernées.

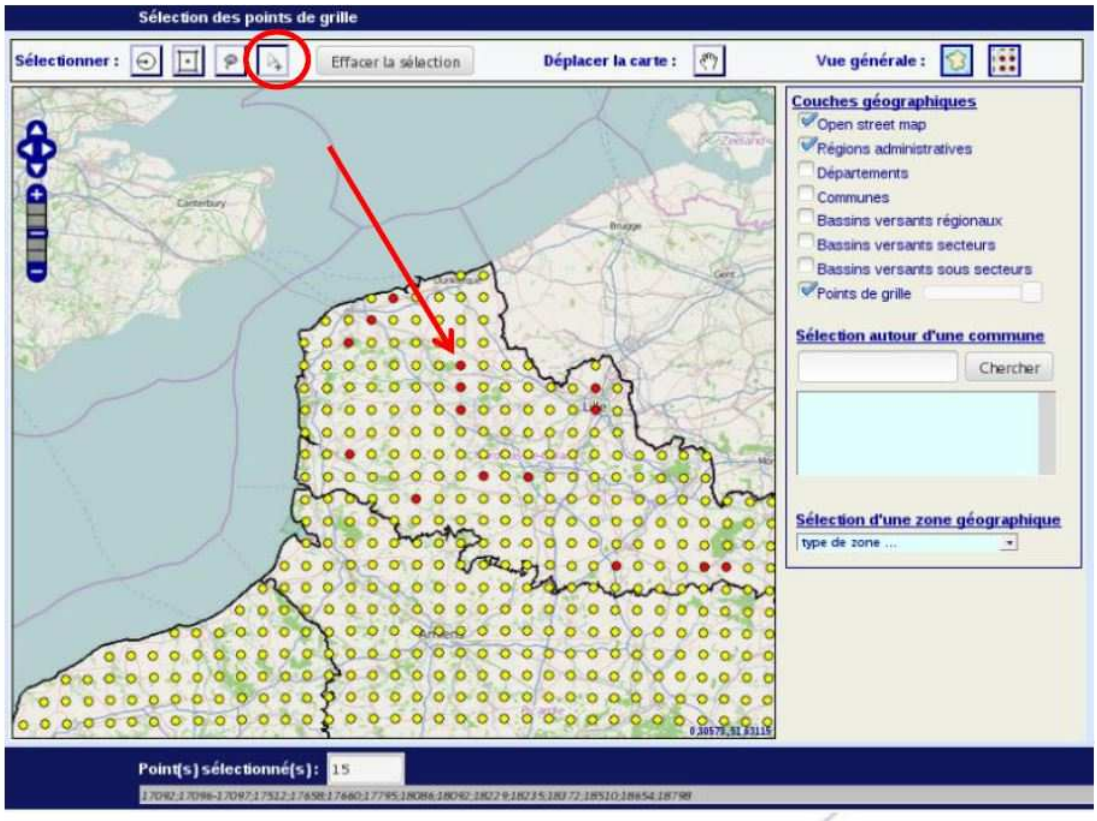



*Figure 11 : Sélection détaillée*

On peut aussi faire une sélection géographique par points de grille. Sur la Figure 11, par exemple, on a sélectionné les points rouges et les données sont alors disponibles sur ces points de grille dans un format numérique à télécharger ensuite. DRIAS permet d'aller à des échelles très fines, mais il ne faut pas se faire trop d'illusions, il existe des incertitudes.




*Figure 12 : Les **projections** climatiques ne sont pas des **prévisions** météorologiques*

Les principales précautions à prendre sont rappelées : il ne faut pas se dire que, le 24 juillet 2062, il fera telle température, puisque chaque scénario centré sur un horizon, 2050 par exemple, doit être considéré comme une moyenne de 30 ans autour de la date considérée. Il faut considérer également la fourchette d'incertitude, entre 22 et 24 degrés comme sur la Figure 12 par exemple.

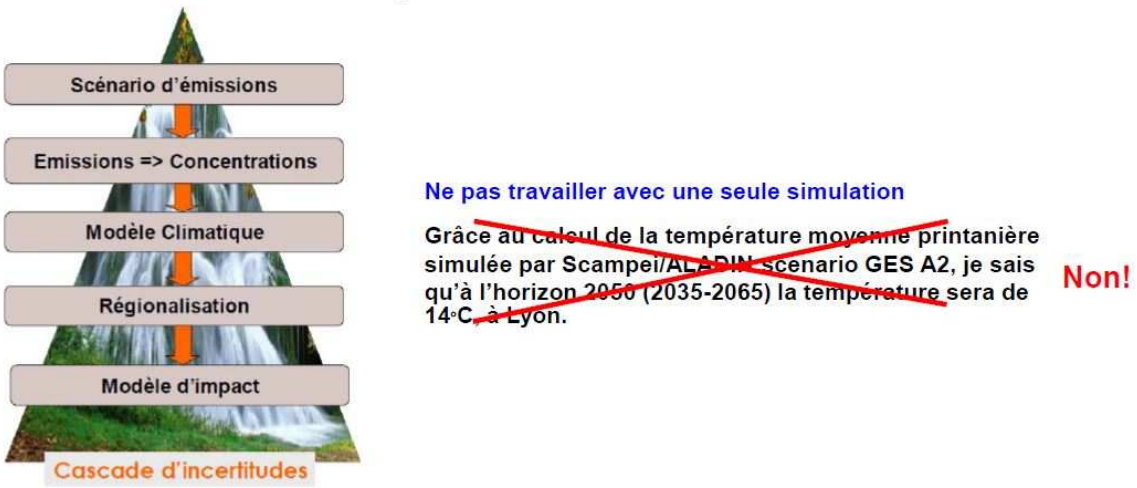



*Figure 13 : Cascade d'incertitude*

Il ne faut pas non plus travailler avec une seule simulation. DRIAS donne accès à différentes expériences. Pour un même scénario, un même horizon, on peut disposer de plusieurs modèles. Comparer ces modèles permet d'avoir une idée de l'incertitude. La Figure 13 présente les différentes étapes de la modélisation. Chaque étape est un modèle en soi. Un modèle composite est une cascade d'incertitude. Pour arriver à un modèle d'impact sur la sécheresse des sols, par exemple, il faut d'abord un scénario d'émission, un modèle d'émission, un modèle climatique, un modèle imbriqué pour faire la régionalisation et encore un modèle ad hoc, par exemple agricole, pour avoir des variables d'impact.

Les incertitudes sont liées au choix du scénario RCP, qui n'est qu'une possibilité politique, économique. Des incertitudes sont également liées à la modélisation climatique et à la composition des modèles. Il faut tenir compte de la variabilité intrinsèque avec les phénomènes El Niño et La Niña (cf texte d'Y.Fouquart), c'est-à-dire des fluctuations autour de la valeur moyenne sur une période de dix ans.

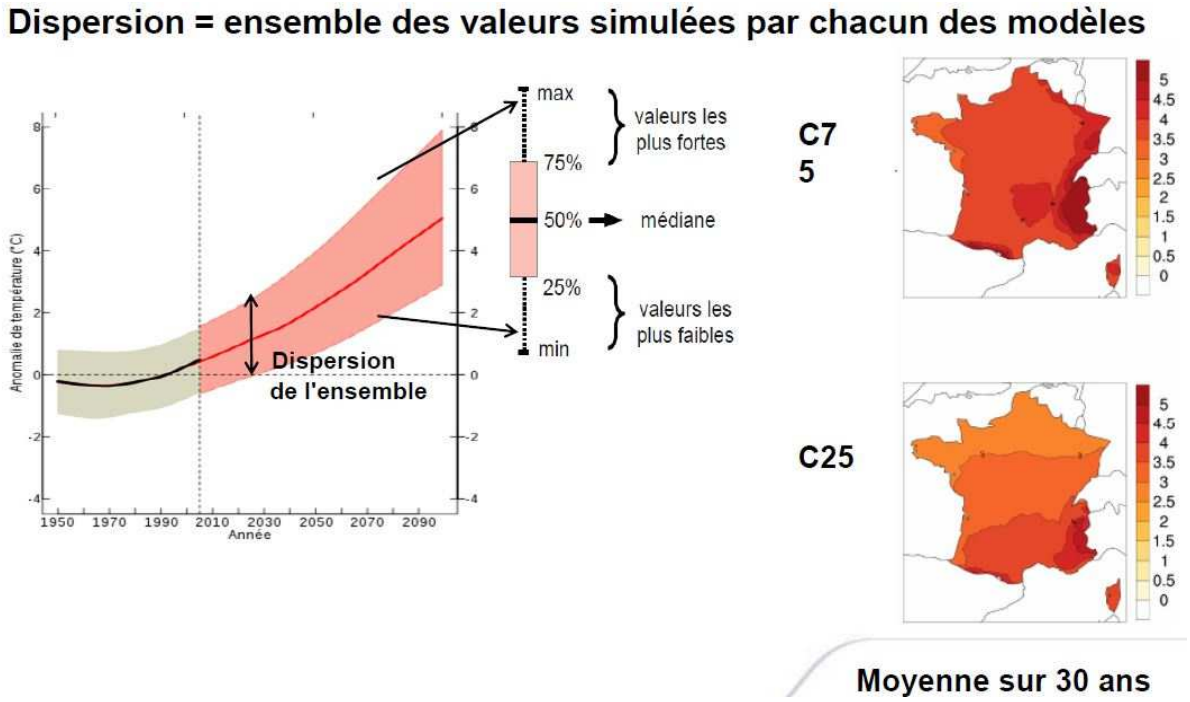



*Figure 14 : Analyse multi-modèles (Rapport Jouzel)*

Une bonne représentation est celle du rapport Jouzel, qui est une analyse multimodale. La température est en ordonnée et le temps en abscisse. Le panache correspond à différentes simulations avec différents modèles. Au plus haut, on trouve les modèles qui donnent les valeurs les plus fortes ; au plus bas, sur l'axe des ordonnées (vers + 2 degrés en 2090), on trouve les modèles qui donnent les valeurs les plus basses. Ces dernières sont représentées par la carte C25, qui correspond au centile 25, c'est-à-dire la valeur en dessous de laquelle 25 % des modèles seulement se situent. Les valeurs les plus hautes sont représentées par la carte C75. Si on prend par exemple, Aladin climat, pour le premier scénario entre 2021 et 2050, RCP 2.6, correspond à une augmentation de température de 0,6 degré. Des modèles donnent 0,75, d'autres donnent 0,4. Aladin se situe au milieu de la fourchette d'incertitude.

Les perspectives seront une mise à jour des différents espaces, des formations, des améliorations techniques. Météo France intégrera d'autres résultats dont ceux de l'expérience Eurocordex, qui confirment un accroissement sensible de la fréquence des événements extrêmes caractéristiques du changement climatique ainsi que des résultats d'impact et essaiera d'améliorer la représentation de l'incertitude.



Photo: Marie-Hélène Ruz



Arnaud Héquette est Professeur à l'Université du Littoral Côte d'Opale et responsable de l'équipe de recherche « Dynamique côtière actuelle et récente » du Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) – UMR CNRS 8187. Il travaille depuis plus de trente ans sur la géomorphologie des littoraux et notamment sur les impacts des tempêtes et des variations du niveau marin sur leur évolution. Son expertise sur ces questions lui a valu d'être évaluateur des 3ème et 4ème rapports du Groupe de Travail II (conséquences, adaptation, vulnérabilité) du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC).

# Impacts du changement climatique sur la mer et le littoral

Partie coordonnée par Arnaud Héquette
Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences
Université du Littoral Côte d'Opale

Le changement climatique a déjà des impacts mesurables sur la mer et le littoral, impacts qui sont susceptibles de s'accentuer ces prochaines décennies. Cette partie a pour objet de faire le point sur l'état des connaissances actuelles concernant les effets du changement climatique sur le trait de côte, sur les ressources et la biodiversité marine, sur les estuaires et les falaises de la région, et de proposer des pistes de solutions pour la gestion de l'évolution des littoraux adaptées au contexte régional. Une ouverture sera faite sur cette problématique à l'échelle de l'Eurorégion.

Cette partie présente les interventions suivantes :

- Variabilité pluri-décennale du trait de côte du Nord-Pas de Calais : le rôle des variations des conditions météo-marines et du bilan sédimentaire côtier
  *Arnaud Héquette, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, UMR 8187 CNRS/ Université de Lille – Sciences et Technologies & Université du Littoral Côte d'Opale*
  Conférence CERCLE du 12 décembre 2013

- Evolution passée et actuelle des dunes côtières du Nord-Pas de Calais : quelles perspectives pour l'avenir ?
  *Marie-Hélène Ruz, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, UMR 8187 CNRS/ Université de Lille – Sciences et Technologies & Université du Littoral Côte d'Opale*
  Conférence CERCLE du 12 décembre 2013

- Impacts du changement climatique sur les estuaires
  *Alain Trentesaux, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, UMR 8187 CNRS/ Université de Lille – Sciences et Technologies & Université du Littoral Côte d'Opale*
  Conférence CERCLE du 3 avril 2015

- Impacts du changement climatique sur les falaises
  *Guillaume Pierre, Groupe d'Etude sur les Géomatériaux et les Environnements Naturels et Anthropisés, Université de Reims Champagne Ardennes*
  Conférence CERCLE du 3 avril 2015

- Solutions de gestion du littoral du Nord-Pas de Calais face au changement climatique
  *Arnaud Héquette, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, UMR 8187 CNRS/ Université de Lille – Sciences et Technologies & Université du Littoral Côte d'Opale*
  Conférence CERCLE du 3 avril 2015

# Variabilité pluri-décennale du trait de côte du Nord-Pas de Calais : le rôle des variations des conditions météo-marines et du bilan sédimentaire côtier

Arnaud HEQUETTE

Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences
Université du Littoral Côte d'Opale

Le changement climatique est susceptible d'avoir des impacts au niveau des risques littoraux, mais pas uniquement. Bien qu'une partie importante des littoraux du Nord-Pas de Calais ait été anthropisée, notamment en raison de l'urbanisation du littoral, il reste encore de nos jours une forte proportion de côtes meubles peu élevées qui sont susceptibles de connaître des effets importants en raison du changement climatique (Figure 1). L'intensité et la fréquence des aléas sont en effet susceptibles d'augmenter dans l'avenir en raison de l'élévation du niveau de la mer qui pourrait intensifier les phénomènes d'érosion côtière et de submersion marine. Outre ces impacts possibles sur la géomorphologie des littoraux, le changement climatique pourra également avoir des effets sur les écosystèmes, notamment dans les estuaires où la modification des habitats est susceptible d'avoir des répercussions sur la répartition des différentes espèces benthiques par exemple.

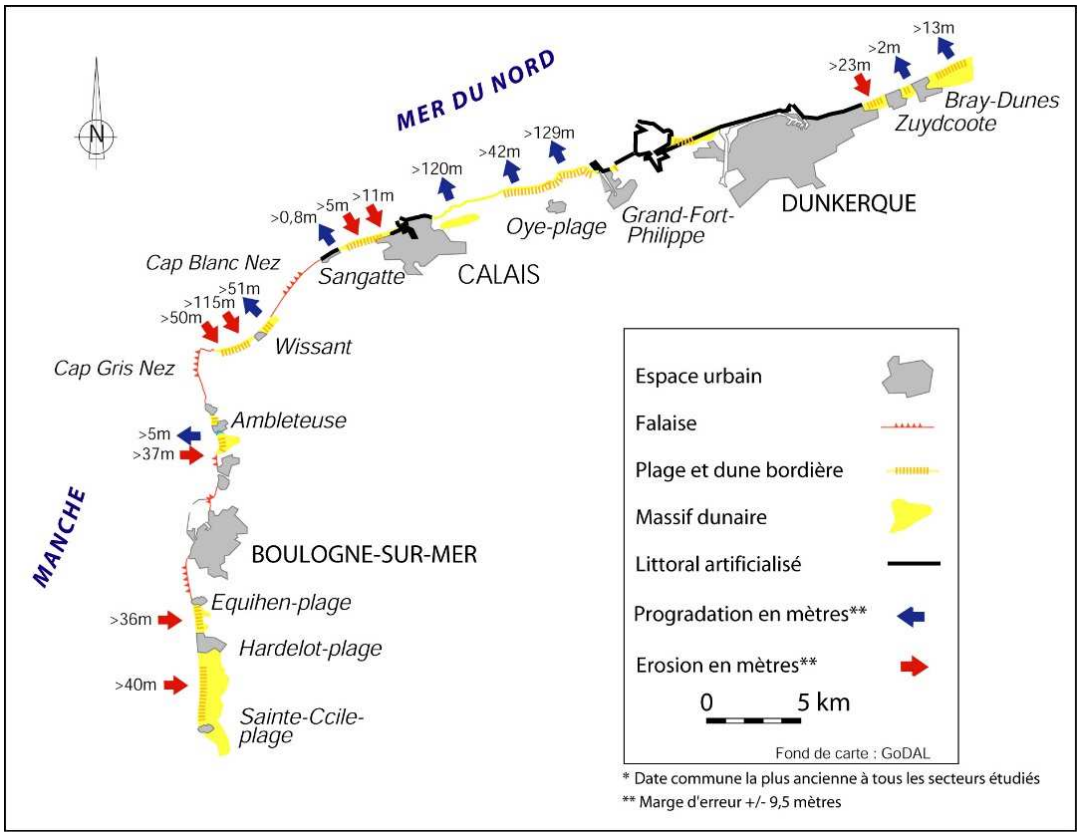



*Figure 1 : Evolution du trait de côte du littoral de la Côte d'Opale entre 1963 et 2000 (Chaverot, 2006).*

### L'évolution du trait de côte pendant les dernières décennies

L'analyse de l'évolution du trait de côte du Nord-Pas de Calais pendant les dernières décennies révèle que les variations de la position de la ligne de rivage le long des côtes meubles (plages et dunes côtières) n'ont pas été uniformes (Figure 1). Si certains secteurs ont été relativement stables pendant les dernières décennies, d'autres ont connu un recul, parfois important. D'autres secteurs, au contraire, ont été caractérisés par une avancée du trait de côte alors que les plages et les dunes côtières se sont avancées vers la mer.

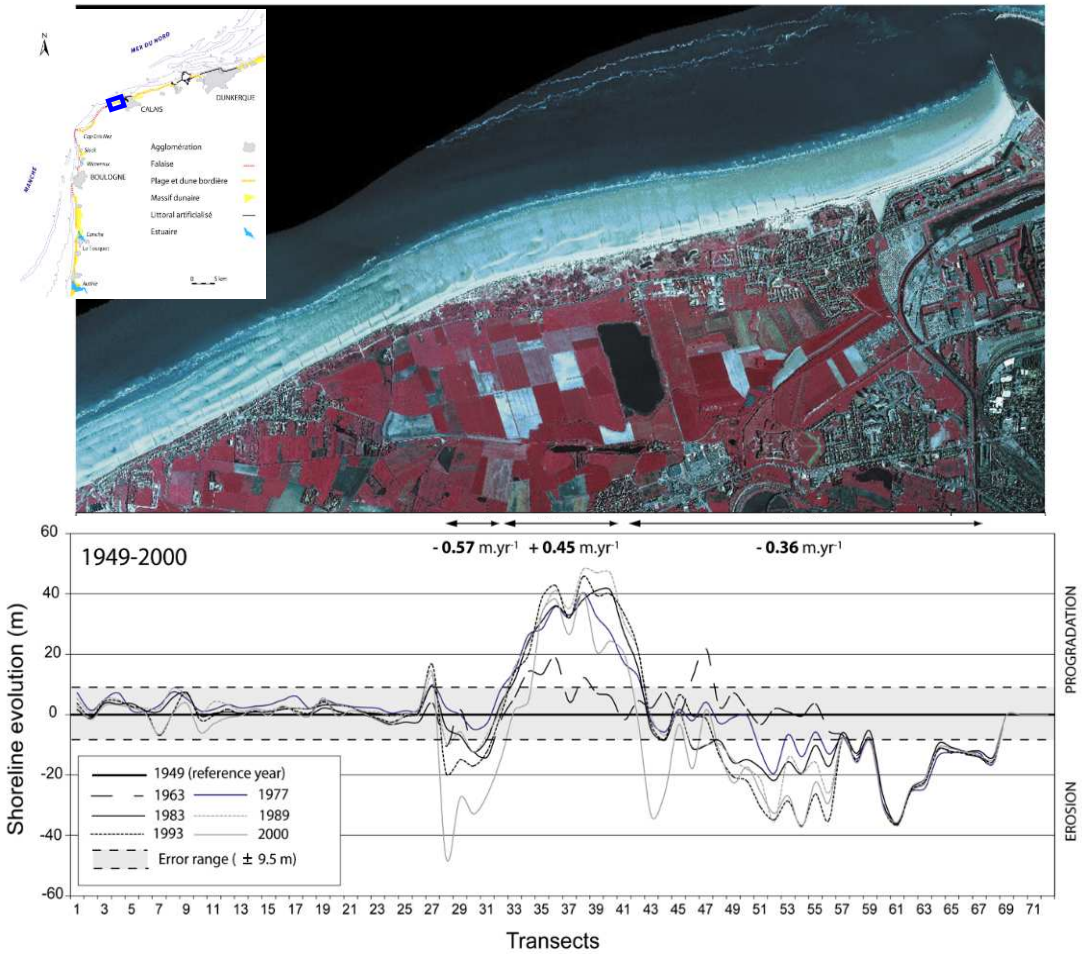



*Figure 2 : Evolution du trait de côte entre Sangatte et Calais entre 1949 et 2000 d'après Chaverot, Héquette et Cohen, 2008)*

L'évolution du trait de côte est variable non seulement à l'échelle régionale, mais également sur un même site où des différences importantes dans le déplacement du trait de côte peuvent être observées à quelques centaines de mètres de distance seulement (Figure 2). L'évolution du trait de côte est également variable dans le temps. A l'ouest de Calais, par exemple, dans le secteur allant de Sangatte à Blériot-Plage, le trait de côte a connu par endroits une avancée de plusieurs dizaines de mètres entre 1963 à 1983, alors que la ligne de rivage a pu reculer aux mêmes endroits pendant des périodes plus récentes. A l'échelle de quelques décennies, la variabilité est donc grande, tant dans l'espace que dans le temps.

### L'impact des tempêtes sur l'évolution du trait de côte

Cette variabilité peut-elle être expliquée par des variations dans le régime des vents et des tempêtes ? Deux classes de vent ont été analysées : les vents supérieurs à 16 m/s qui correspondent à de forts coups de vents et aux tempêtes, et les vents supérieurs à 8 m/s qui peuvent avoir des effets significatifs sur le littoral s'ils soufflent suffisamment longtemps comme ont pu le montrer des travaux sur les impacts morphogènes des coups de vents sur les littoraux meubles du Nord de la France (Ruz et al., 2009). L'analyse des données de vent enregistrées à Dunkerque depuis 1956 a permis de mettre en évidence des périodes plus tempétueuses à la fin des années 50 et plus particulièrement pendant les années 70 (Figure 3). En revanche, on observe plutôt une baisse depuis le début des années 80, que ce soit à Dunkerque ou dans les autres stations météorologiques du littoral du Nord-Pas de Calais (Chaverot, 2006).

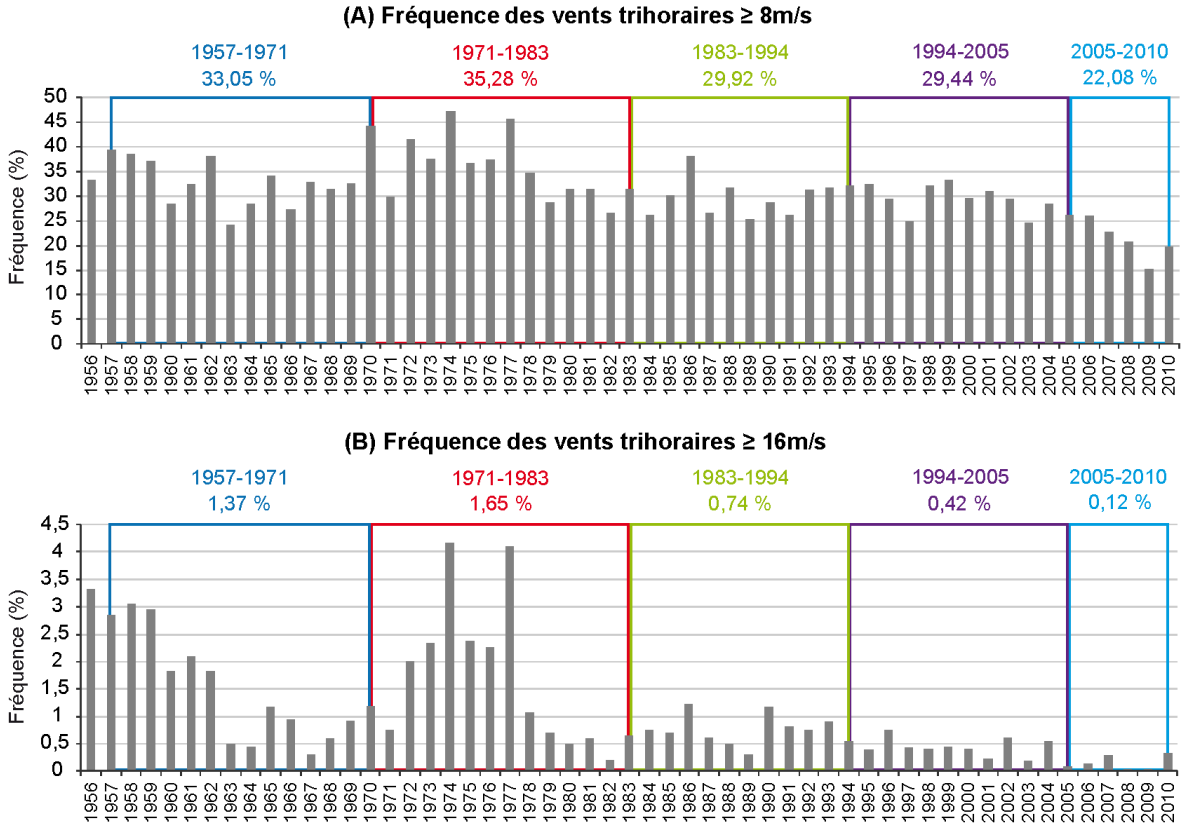



*Figure 3 : Fréquence annuelle des vents à Dunkerque supérieurs ou égaux à 8 m/s et supérieurs ou égaux à 16 m/s (Maspataud, 2011).*

Les vents ont une grande importance, car ils sont à l'origine des vagues, mais également de ce que l'on appelle les surcotes, c'est-à-dire une surélévation du niveau de l'eau au-dessus du niveau de la marée astronomique seule. C'est au moment des surcotes (qui sont dues à une augmentation du niveau de l'eau sous l'action du vent, mais aussi à des variations de pression atmosphérique) que peuvent se produire des phénomènes d'érosion et de submersion marine sur le littoral (Figure 4).

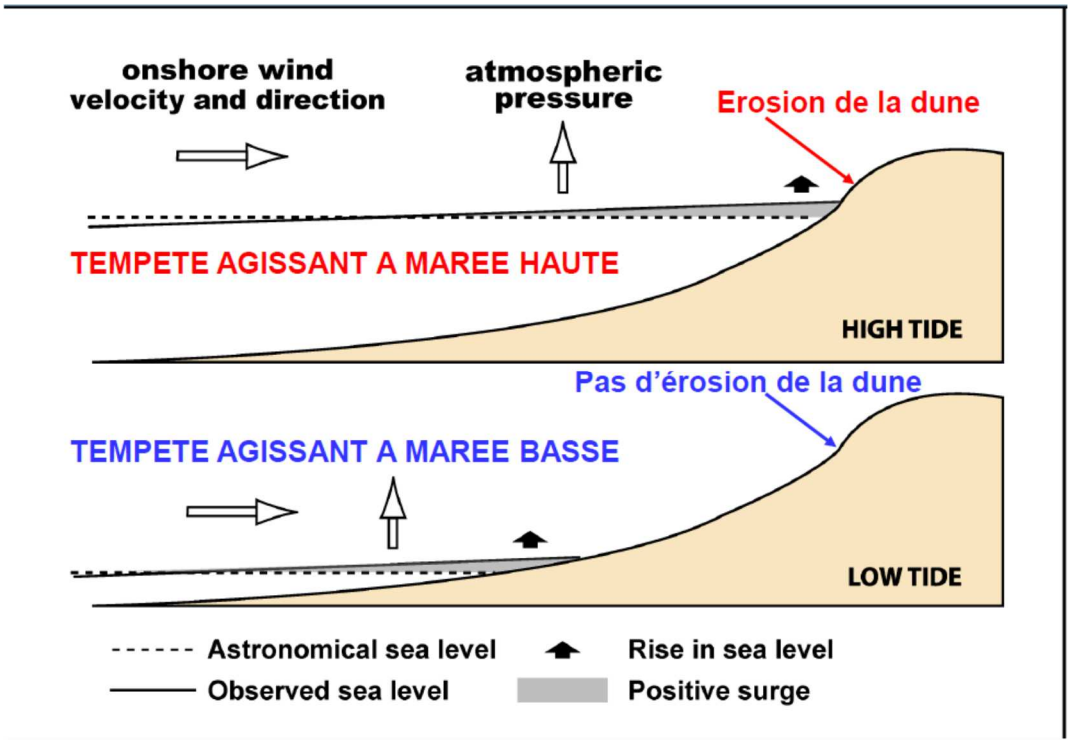



*Figure 4 : Schéma de l'impact d'une surcote à marée haute et à marée basse d'après Chaverot, Héquette et Cohen, 2005)*

La situation est encore plus complexe le long du littoral du Nord - Pas de Calais en raison des fortes marées qui s'y produisent. L'amplitude de la marée y est macrotidale, c'est-à-dire qu'elle est supérieure à 4 m et peut même atteindre plus de 8 mètres sur les rivages de la Manche. Les impacts d'une tempête sur le littoral dépendent en fait du moment où se produit une surcote pendant le cycle quotidien de la marée. Si une surcote a lieu à marée haute, une érosion de la dune côtière ou même une submersion peut se produire. Par contre, si elle se produit à marée basse, il n'y aura pas de conséquences (Figure 4).

La surcote de plus de 2 m qui s'est produite lors d'une tempête le 3 janvier 1976 en est un exemple éloquent. Cette très forte surcote qui a atteint 2,18 m s'est produite un peu après la basse mer (Figure 5), mais si elle avait eu lieu à marée haute, les conséquences auraient vraisemblablement été catastrophiques.

Des travaux récents ont été menés sur les phénomènes des surcotes en Manche et en mer du Nord à partir de séries de données marégraphiques enregistrées en France et en Angleterre (Haigh et al., 2010). Le pic de surcote, l'intensité de la surcote, et le moment auquel se produit la surcote par rapport au niveau de pleine mer ont été analysés. Ces analyses ont montré que pour toutes les stations marégraphiques situées en Manche, **les surcotes** (et notamment les plus fortes) **ont tendance à se produire plusieurs heures avant la pleine mer**. Ce **décalage** par rapport au moment de la pleine mer **est systématique**, que ce soit à Cherbourg, au Havre, à Boulogne-sur-Mer ou à Dunkerque, **ce qui semble limiter l'impact des tempêtes sur nos côtes**.

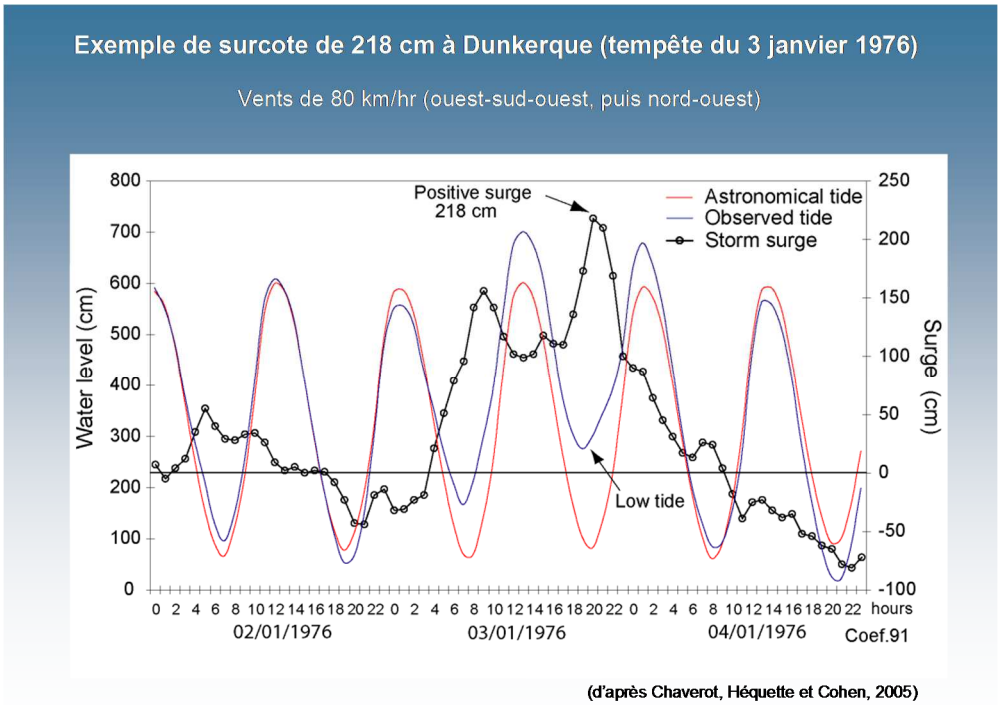



*Figure 5 : Exemple de surcote à Dunkerque lors de la tempête de janvier 1976 (Chaverot et al., 2005).*

Mais même si la surcote maximum pendant une tempête ne se produit pas nécessairement au moment de la pleine mer, des surcotes, même de moindre amplitude, se produisent aussi à marée haute. C'est ce qui s'est produit pendant la nuit du 5 au 6 décembre 2013 lorsque la tempête Xaver a causé une submersion de la digue de Malo-les-Bains (Figure 6). Bien que nettement inférieure à la surcote de 2,4 m qui a été atteinte au moment de la basse mer à Dunkerque, une surcote de 1,2 m à haute mer a été à l'origine d'un niveau d'eau supérieur au niveau d'eau extrême d'une période de retour de 100 ans (Daubord, 2014). Bien que cette tempête ait été à l'origine de dégâts sur le littoral, les impacts auraient là encore été beaucoup plus considérables si la surcote maximale s'était produite quelques heures plus tôt ou plus tard.




*Figure 6 : Tempête Xaver – Nuit du 5 au 6 décembre 2013 et conséquences de la tempête sur la digue (photo de gauche : A. Cartier ; photo de droite : A. Héquette).*

### Les conséquences de la hausse du niveau de la mer

Selon le dernier rapport du GIEC (IPCC, 2013), il est très probable qu'il y aura une augmentation significative des niveaux d'eau extrêmes à l'horizon 2050 et 2100 en raison de l'augmentation du niveau moyen de la mer.

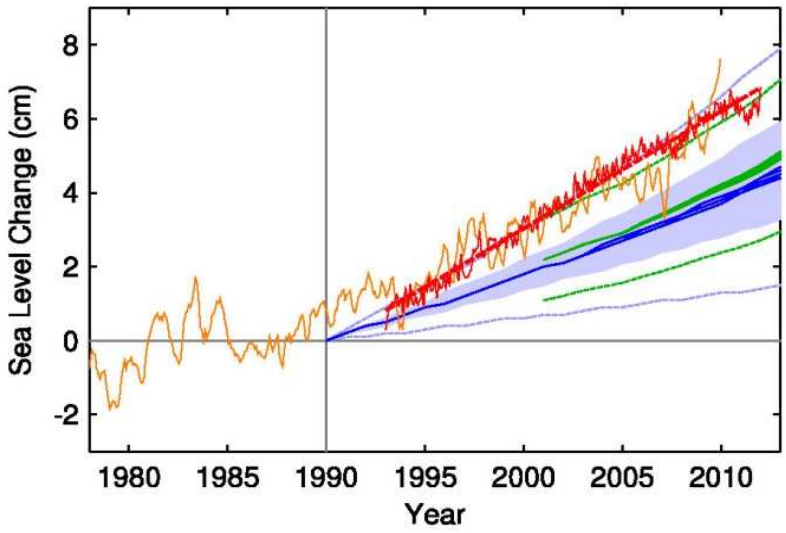



*Figure 7 : Variations du niveau marin global mesurées par altimétrie satellitaire (courbe rouge) et à l'aide de marégraphes (courbe orange) et prévisions du GIEC de 2001 (courbes bleues) et de 2007 (courbes vertes) (Rahmstorf et al., 2012).*

Par ailleurs, l'élévation du niveau moyen de la mer devrait se poursuivre à un rythme encore plus élevé que ce qui a pu être mesuré depuis les années 70. La courbe orange sur la Figure 7 représente une compilation d'enregistrements marégraphiques qui révèle clairement cette hausse du niveau de la mer. La courbe rouge correspond aux mesures altimétriques réalisées par satellite qui montrent que l'augmentation du niveau général des océans a été de plus de 3 mm/an pendant la période 1993-2011. Il s'agit là de rythmes d'élévations supérieurs aux prévisions de hausse du niveau de la mer pour la même période qui apparaissaient dans les troisième et quatrième rapports du GIEC (IPCC, 2001, 2007), représentées ici par les courbes vertes et bleues.

On sait également qu'il y aura des variations extrêmement importantes d'une région à une autre du globe. Les données marégraphiques des ports de Boulogne-sur-Mer et de Dunkerque sont malheureusement difficilement exploitables en raison d'un grand nombre de lacunes qui empêchent d'établir de façon fiable les variations du niveau local de la mer pendant les dernières décennies. Il est toutefois possible d'utiliser les données marégraphiques enregistrées sur la côte belge à quelques dizaines de kilomètres seulement des côtes du Nord-Pas de Calais.

Les enregistrements marégraphiques réalisés entre 1967 et 2010 à Nieuport, en Belgique, montrent que le niveau moyen de la mer s'y est élevé à un rythme de plus de 3 mm/an pendant cette période (Figure 8). Le rythme de hausse du niveau de la mer a même atteint 4 mm/an à Ostende entre 1990 et 2010.

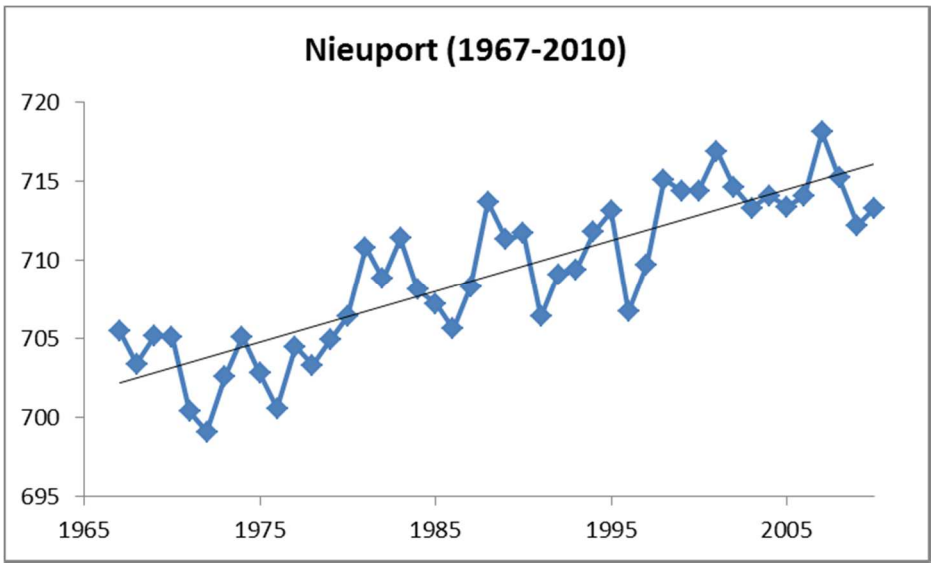



*Figure 8 : Variations du niveau moyen de la mer à Nieuport (Belgique) entre 1967 et 2010 (Source : Permanent Service for Mean Sea Level).*

### Les autres facteurs influençant l'évolution du trait de côte

Si le niveau de la mer augmente et que de hauts niveaux d'eau sont atteints de plus en plus fréquemment, des phénomènes d'érosion devraient potentiellement se produire plus souvent. Il en est de même pour les submersions marines. A moyen et à long terme, le trait de côte ne répond toutefois pas uniquement aux variations du niveau de la mer. Sa position dépend aussi grandement du bilan sédimentaire de la zone côtière qui dépend des apports et des pertes de sédiment dans la zone côtière.

Les études réalisées sur l'évolution de la zone côtière du Nord-Pas de Calais à partir de sondages bathymétriques effectués pendant le XX$^{ème}$ siècle ont montré que la morphologie des fonds sédimentaires à proximité du littoral avait connu des modifications considérables en l'espace de quelques dizaines d'années, notamment en raison du déplacement de bancs sableux de plusieurs kilomètres de longueur. A l'est du port de Calais, par exemple, la migration vers la côte d'un banc pré-littoral qui est venu s'accoler au rivage (Figure 9) s'est soldée par un apport massif de sables à la côte, ce qui a favorisé la formation de dunes en haut de plage et une avancée du trait de côte vers le large (Héquette et Aernouts, 2010). La progression du rivage vers le large a été de plusieurs dizaines de mètres pendant la deuxième moitié du XX$^{ème}$ siècle, et même de plusieurs centaines de mètres là où la progression des dunes a été la plus rapide (Figure 9). Cette période pendant laquelle le trait de côte s'est avancé vers la mer à l'Est de Calais a pourtant été caractérisée par une élévation du niveau de la mer, ce qui montre qu'**une hausse du niveau marin ne cause pas nécessairement de l'érosion et un recul du littoral** qui peut au contraire progresser vers le large si les apports sédimentaires sont suffisamment abondants.

En revanche, à Wissant, à peine à une vingtaine de kilomètres de Calais, on a mesuré un recul du trait de côte de plus de 250 mètres au centre de la baie depuis environ 1950 (Aernouts et Héquette, 2006). Une analyse des variations de la morphologie des fonds sédimentaires en

baie de Wissant pendant le XX$^{ème}$ siècle a été réalisée à l'aide des sondages bathymétriques de 1911, 1977 et 2002. Les résultats de cette étude ont montré que de vastes zones à proximité de la côte avaient connu un abaissement des fonds de 3 à 4 m (ou plus) pendant le XX$^{ème}$ siècle (Figure 10). Les mesures de variations de la position du trait de côte réalisées à partir de photographies aériennes ont révélé que c'était dans ce secteur de forte érosion des fonds à l'avant-côte que les rythmes de recul du trait de côte ont été les plus élevés, atteignant des valeurs de 4 à 5 m/an en moyenne (Aernouts et Héquette, 2006), ce qui est indiqué par une flèche rouge sur la Figure 10.

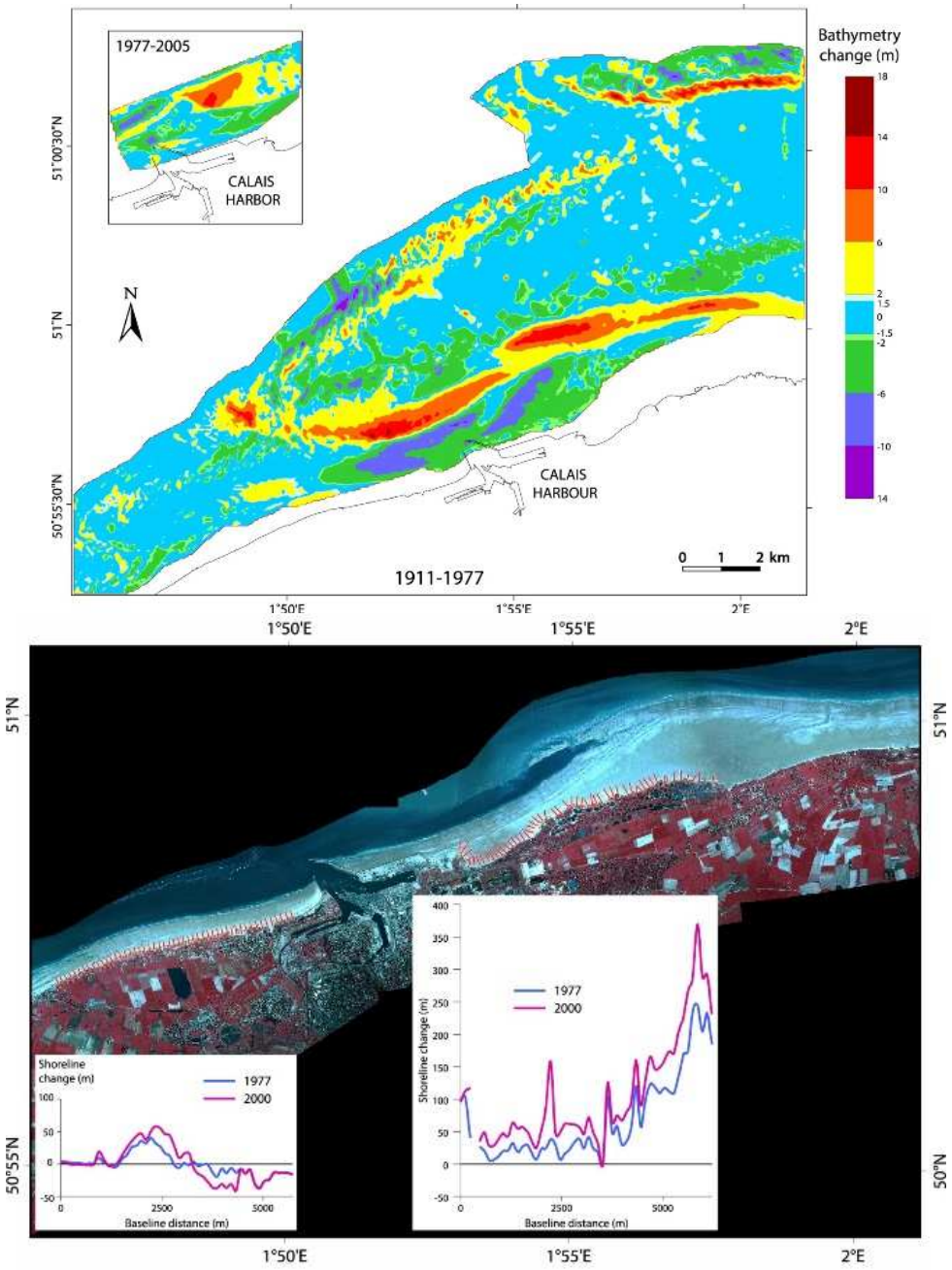



*Figure 9 : Variations de la bathymétrie de l'avant-côte entre 1911 et 2000 (figure du haut) et de la position du trait de côte entre 1949 et 2000 à proximité de Calais (figure du bas) (Héquette et Aernouts, 2010).*

En revanche, à l'est de la commune de Wissant, l'analyse de l'évolution des petits fonds a révélé une accumulation de sable à proximité de la plage (Figure 10), probablement liée à un transit préférentiel de sédiments vers le Nord-Est le long de la côte (Sedrati et Anthony, 2007). Dans ce secteur, le rivage s'est au contraire avancé vers le large pendant le XX$^{ème}$ siècle à la faveur du développement de dunes côtières, ce qui montre le lien étroit qui existe entre le littoral et l'avant-côte et souligne l'**importance du bilan sédimentaire côtier**.

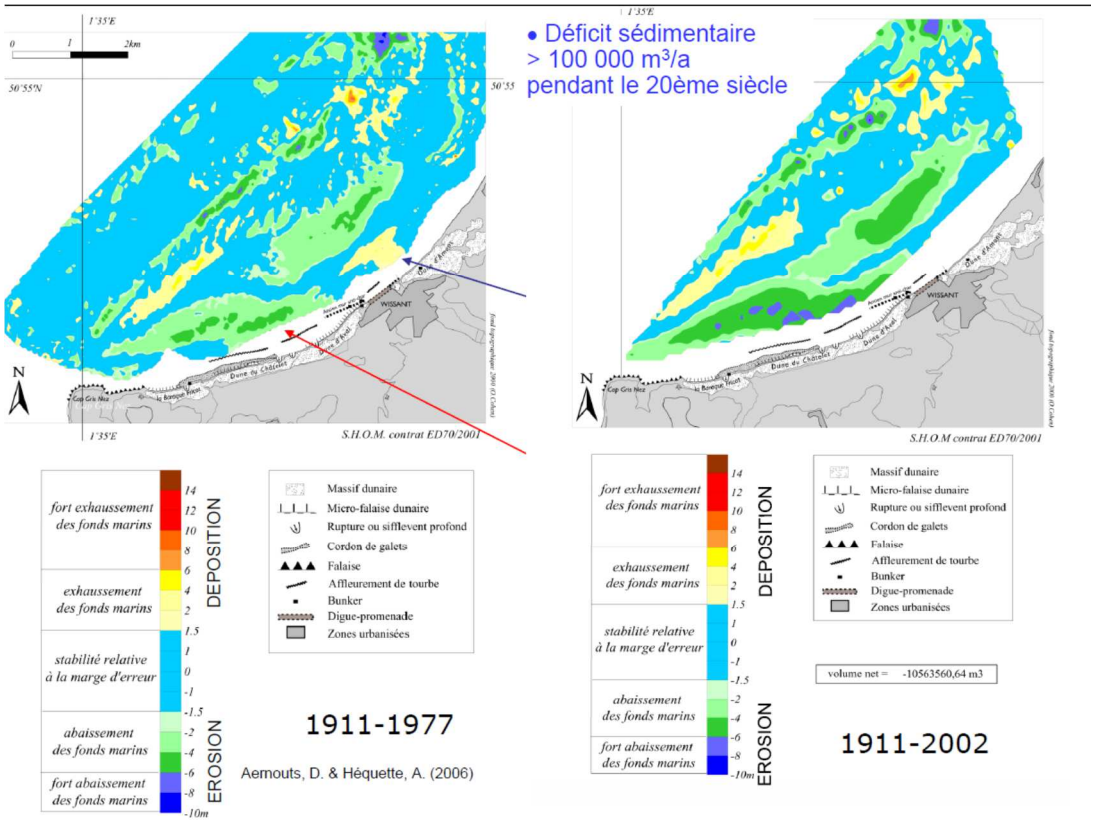



*Figure 10 : Variations de la bathymétrie dans la baie de Wissant entre 1911 et 2002 (d'après Aernouts et Héquette, 2006).*

L'étude des variations bathymétriques en baie de Wissant a permis de calculer que les pertes de sédiments se chiffraient à environ 10 millions de m$^3$ pour l'ensemble de la baie pendant le XX$^{ème}$ siècle, soit environ 100 000 m$^3$/an. Cette perte de sédiments est probablement à l'origine du déficit sédimentaire chronique que connait la plage de Wissant dont le niveau s'est fortement abaissé pendant les dernières années, ce qui a été en partie à l'origine des problèmes d'effondrement de la digue qui n'a pas pu résister aux assauts des vagues de tempête (Figure 11).



*Figure 11 : La plage de Wissant au niveau de la digue en 1998 (photo de gauche : O. Cohen) et en 2007 (photo de droite : V. Herbert).*

### L'avenir du littoral de la région face au changement climatique

De nombreuses incertitudes subsistent pour l'avenir, notamment en ce qui concerne les variations possibles dans le régime des vents avec le changement climatique, comme cela est souligné dans plusieurs rapports du GIEC (IPCC, 2007, 2013), un léger changement dans le régime des vents pouvant avoir des conséquences importantes sur les processus physiques agissant sur le littoral. S'il est par contre clairement établi maintenant que le niveau marin devrait continuer de s'élever dans les prochaines décennies (IPCC, 2013), il subsiste là aussi des incertitudes concernant l'ampleur de cette hausse et le rythme d'élévation du niveau marin. D'autres questions se posent sur la réponse des littoraux face à une élévation du niveau de la mer qui peut être extrêmement variable en fonction de nombreuses conditions locales liés à la morphologie du littoral ainsi qu'au bilan sédimentaire. Il est par conséquent important de poursuivre les études engagées en ce sens au niveau régional, en particulier les suivis de l'évolution du trait de côte et des stocks sédimentaires côtiers, afin de savoir comment réagissent les milieux littoraux de la région face au changement climatique, cette connaissance étant indispensable pour une gestion raisonnée et durable de la zone côtière.

### Références bibliographiques :


Aernouts, D., Héquette, A., 2006. L'évolution du rivage et des petits fonds en Baie de Wissant pendant le XX$^{è}$ siècle, Pas-de-Calais, France. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 1, p. 49-64.

Chaverot, S., 2006. *Impacts des variations récentes des conditions météo-marines sur les littoraux meubles du Nord-Pas-de-Calais*. Université du Littoral Côte d'Opale, Dunkerque, 266 p.

Chaverot, S, Héquette, A., Cohen, O., 2005. Evolution of climatic forcings and potentially eroding events on the coast of Northern France. *Proceedings 5$^{th}$ International Conference on Coastal Dynamics*, Barcelone, Espagne, Avril 2005, 11 pp.

Chaverot, S., Héquette, A., Cohen, O., 2008. Changes in storminess and shoreline evolution along the northern coast of France during the second half of the 20th century. *Zeitschrift für Geomorphologie*, Suppl. 52 (3), p. 1-20.

Daubord, C., 2014. *Caractérisation de 7 évènements de tempête de l'automne-hiver 2013-2014 à partir des données disponibles au SHOM*. Rapport du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine N° 001/2014, Brest, 31 p.

Haigh, I., Nicholls, R., Wells, N., 2010. Assessing changes in extreme sealevels: Application to the English Channel, 1900–2006. *Continental Shelf Research*, 30, p. 1042-1055.

Héquette, A., Aernouts, D., 2010. The influence of nearshore sand bank dynamics on shoreline evolution in a macrotidal coastal environment, Calais, Northern France. *Continental Shelf Research*, 30, p. 1349-1361.

IPCC, 2001. *Climate change 2001: The scientific basis*. Contribution du Groupe de travail I au 3ème rapport d'évaluation du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat. Cambridge University Press, 881 pp.

IPCC, 2007. *Climate change 2007: The physical science basis*. Contribution du Groupe de travail I au 4ème rapport d'évaluation du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat. Cambridge University Press, 1056 pp.

IPCC, 2013. *Climate change 2013 - The physical science basis*. Contribution du Groupe de travail I au 5ème rapport d'évaluation du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat. Cambridge University Press, 1552 pp.

Maspataud, A., 2011. *Impacts des tempêtes sur la morphodynamique du profil côtier en milieu macrotidal*. Université du Littoral Côte d'Opale, Wimereux, 470 p.

Rahmstorf, S., Foster, G., Cazenave, A., 2012. Comparing climate projections to observations up to 2011. *Environmental Research Letters*, 7, 5 pp.

Ruz, M-H., Héquette, A., Maspataud, A., 2009. Identifying forcing conditions responsible for foredune erosion on the northern coast of France. *Journal of Coastal Research*, SI 56, p. 356-360.

Sedrati, M., Anthony, E.J., 2007. Storm-generated morphological change and longshore sand transport in the intertidal zone of a multi-barred macrotidal beach. *Marine Geology*, 244, p. 209-229.

# Evolution passée et actuelle des dunes côtières du Nord - Pas de Calais : quelles perspectives pour l'avenir ?

Marie-Hélène RUZ

Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences
Université du Littoral Côte d'Opale

Il n'est pas possible de s'intéresser à l'évolution du trait de côte, sans étudier les dunes côtières, notamment celles de première ligne, en contact direct avec la plage. En effet, le sable est prélevé par le vent au niveau de la plage et est transporté à l'arrière-plage. Puis il est stabilisé par la végétation. Les dunes constituent donc une réserve en sable.

Cette réserve en sable est fondamentale, en particulier lors des tempêtes, puisqu'elle est reprise par les vagues et redistribuée sur la plage. Elle contribue à rétablir un certain équilibre naturel. De ce fait, lorsque l'on construit une digue à la place d'une dune, on comprend que lors des tempêtes, le sable est prélevé directement sur la plage et que c'est à la digue de faire face à l'assaut des vagues. Les dunes ont un rôle de réserve sédimentaire pour les plages (Ruz et Meur-Férec, 2004), elles constituent un rempart naturel contre les assauts de la mer, mais sont aussi des réservoirs de richesse faunistique et floristique.

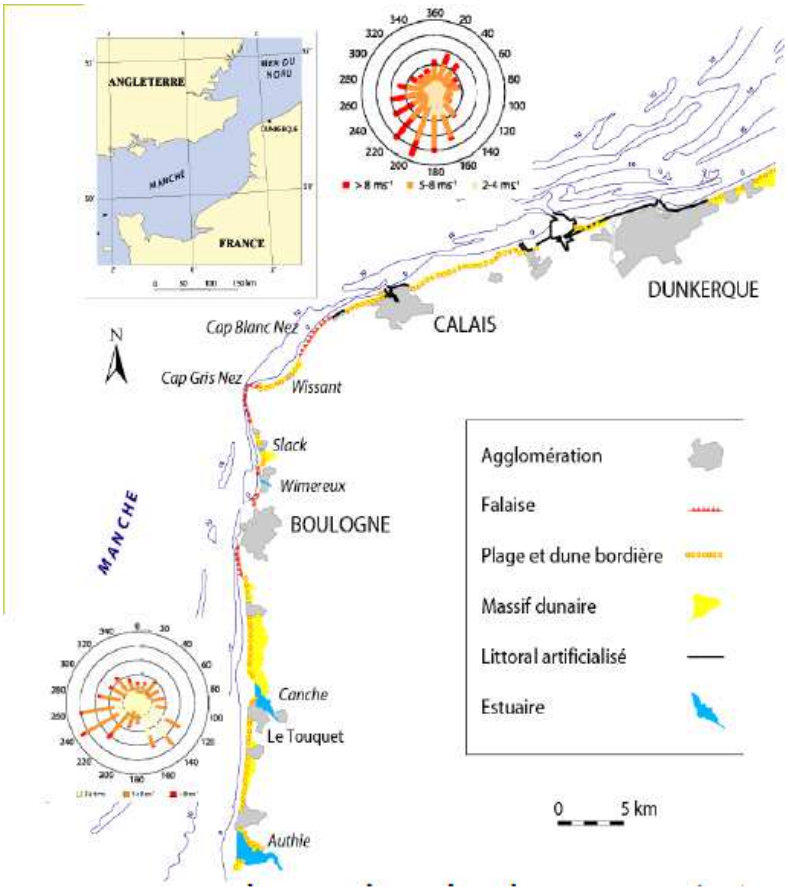



*Figure 1 : Localisation des principaux massifs dunaires le long du littoral de la côte d'Opale*

### Caractéristiques géomorphologiques des dunes côtières

Le littoral du Nord - Pas de Calais possède de très beaux massifs dunaires. Ils sont particulièrement bien développés le long de la côte ouest (Battiau-Queney et al., 2000) et font face aux vents dominants de l'ouest (Figure 1). Ce sont des dunes généralement assez élevées qui peuvent s'étendre sur 2 ou 3 kilomètres vers l'intérieur des terres. Sur la façade de la mer du Nord, les dunes sont plus étroites et un peu moins élevées, mais on peut néanmoins considérer qu'il existe une réserve de sable importante sur le littoral du Nord-Pas de Calais.

A l'échelle des temps géologiques, ce sont des accumulations récentes : la plupart de ces dunes se sont formées il y a moins de 2 000 ans. En fait, beaucoup de dunes se sont formées, d'après les données qui existent, pendant le Moyen Age, à partir du IX$^{ème}$ et du X$^{ème}$ siècle. Le long du littoral faisant face à la mer du Nord, les dunes bordent la plaine maritime flamande qui est une plaine de comblement, en grande partie constituée de sédiments fins qui se sont déposés pendant la transgression postglaciaire. La topographie est relativement plate et c'est donc le cordon dunaire qui protège cette zone basse, poldérisée à partir du XII$^{ème}$ siècle, des assauts de la mer.

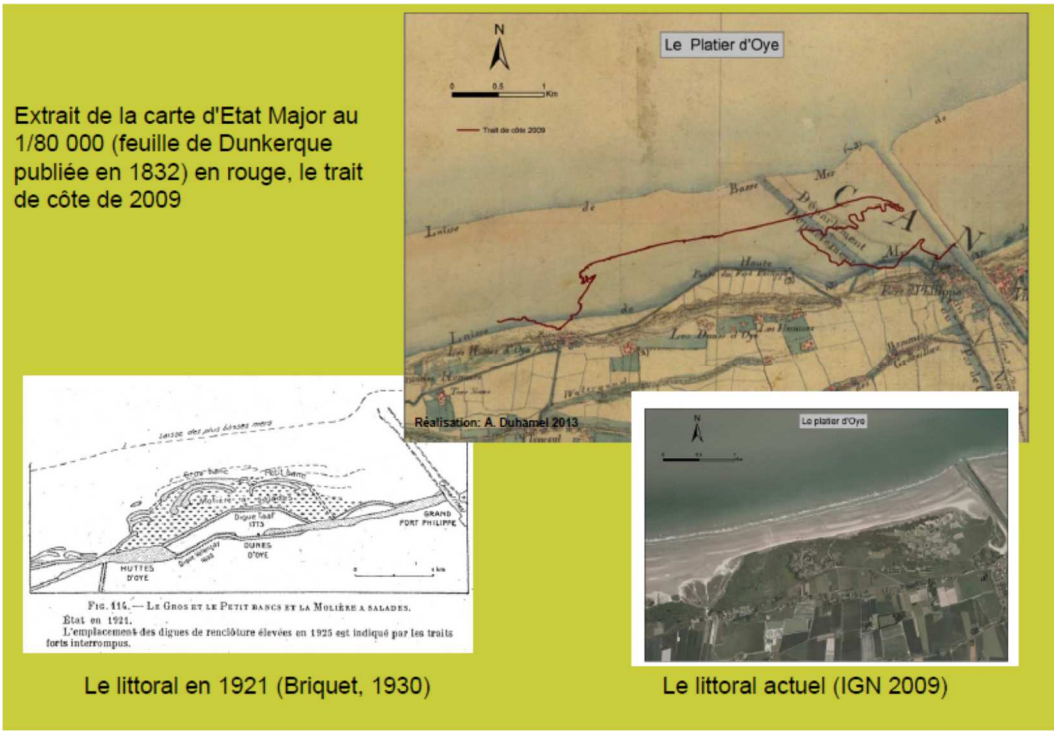



*Figure 2 : Evolution du littoral du Platier d'Oye depuis le début du XIX$^{ème}$ siècle.*

Le recours aux cartes anciennes permet de constater qu'il y a à peu près deux siècles, le littoral du département du Nord était composé d'un cordon dunaire quasiment continu, uniquement interrompu par les principaux ports de la côte. Il y a eu depuis une transformation importante du littoral par l'homme, au détriment des dunes côtières dont plusieurs ont disparu depuis.

L'analyse de l'évolution historique du trait de côte révèle, dans certains secteurs, une avancée du trait de côte vers la mer (Figure 2), comme au niveau du platier d'Oye. Cette avancée naturelle, a été exploitée par l'homme pour gagner de nouvelles terres.

Actuellement, pour le département du Nord, il ne reste plus qu'environ 7 kilomètres de dunes côtières qui sont situées à l'est de Dunkerque. Ces massifs dunaires sont entrecoupés par des stations balnéaires. Les dunes côtières constituent un rempart naturel efficace protégeant des submersions marines les terres basses rétro-littorales situées sous le niveau des plus hautes mers (Figure 3). Outre ces espaces de polders agricoles, certains secteurs urbanisés ne sont protégés par endroits de possibles inondations que par des dunes côtières (Figure 3).

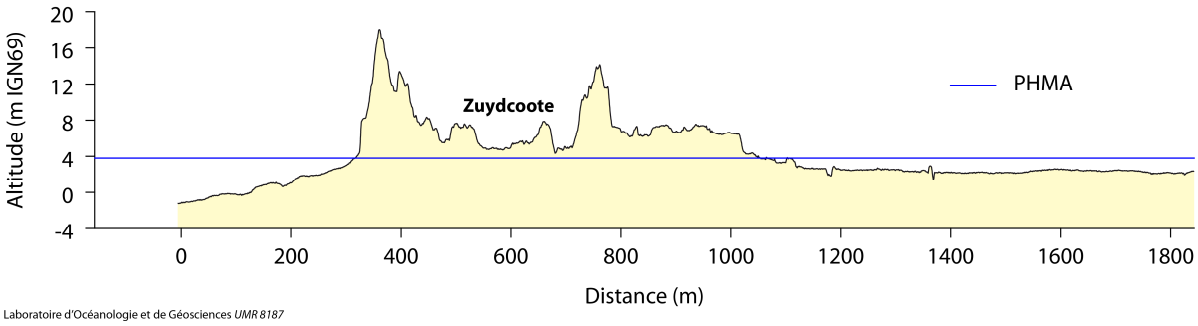



*Figure 3 : Coupe transversale de la zone littorale dans le secteur de Zuydcoote, à l'est de Dunkerque, réalisée à partir de données topographiques obtenues par LiDAR aéroporté (PHMA : niveau des plus hautes mers astronomiques).*

### L'évolution du cordon dunaire à court et moyen terme

Dans le cadre du projet VULSACO (VULnerability of SAndy COast systems to climatic and anthropic changes) financé par l'Agence Nationale pour la Recherche (ANR) (Idier et al., 2010), le littoral de l'est dunkerquois a été l'un des quatre sites sélectionnés en France pour analyser la vulnérabilité des côtes basses face au changement climatique grâce à un suivi de l'évolution du cordon dunaire sur une cinquantaine d'années (Figure 4).

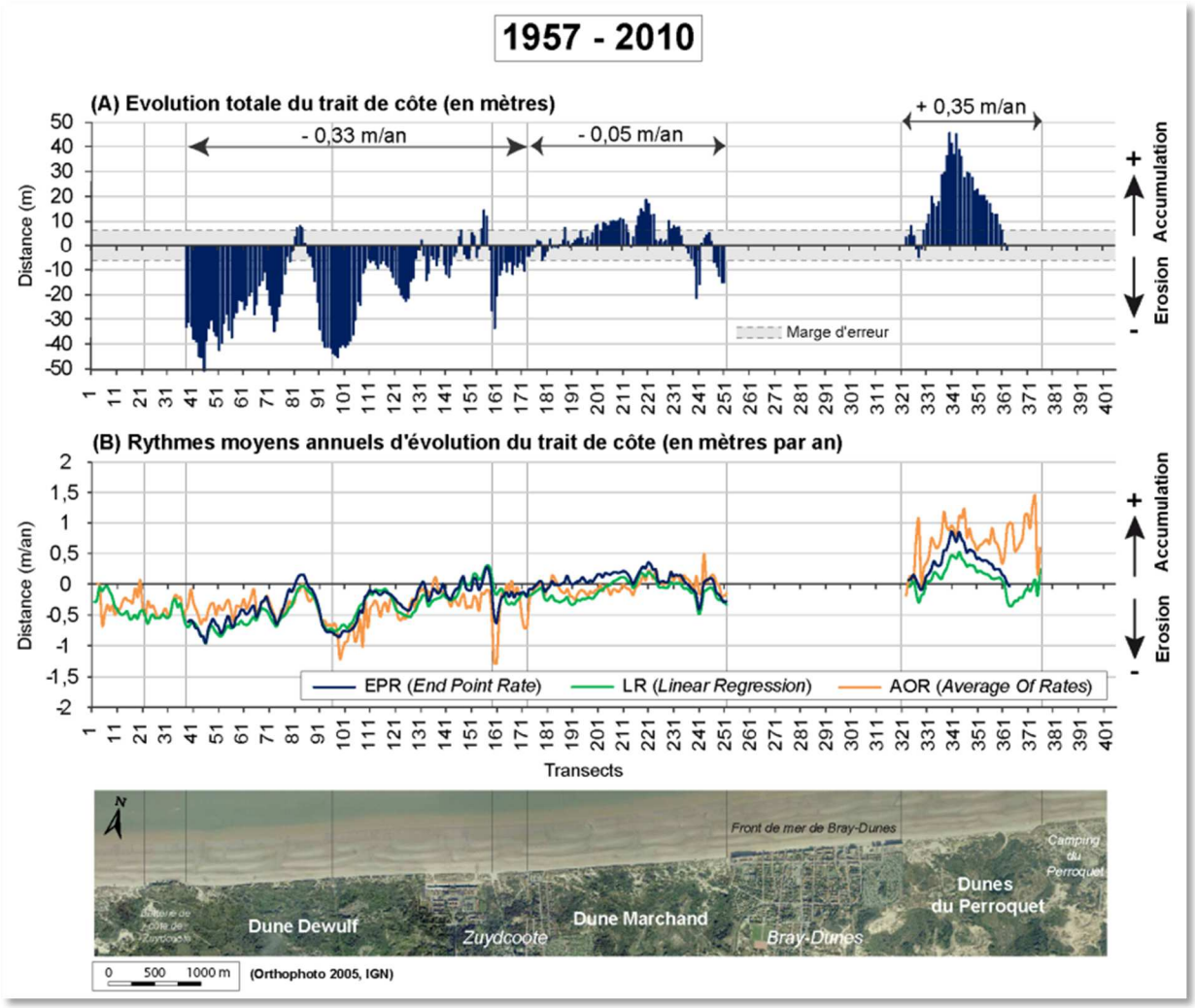



*Figure 4 : Evolution du trait de côte à l'est de Dunkerque entre 1957 et 2010 (Maspataud, 2011)*

L'évolution du littoral a été réalisée en utilisant des photographies aériennes ainsi que grâce à des relevés de terrain. Le long de cette côte rectiligne, l'analyse de l'évolution du trait de côte entre 1957 et 2010 révèle qu'il est possible de distinguer trois secteurs distincts : un secteur en érosion à l'ouest, à proximité de Dunkerque, un secteur central plutôt stable et puis à l'est, au contraire, un secteur en nette accumulation (Figure 4).

A une échelle décennale, le constat est qu'il y a une très grande variabilité dans l'évolution de ce littoral. Selon les périodes, la côte a tendance à avancer, comme de 1957 à 1971 par exemple (Figure 5). Au contraire, entre 1983 et 1994, il y a un recul généralisé du trait de côte avec des reculs maximum de plus de 1,5 mètre en moyenne par année. Pour la période la plus récente, il faut noter que l'on a, à nouveau, une tendance à l'érosion dans le secteur ouest et une très nette tendance à l'accumulation à l'est.

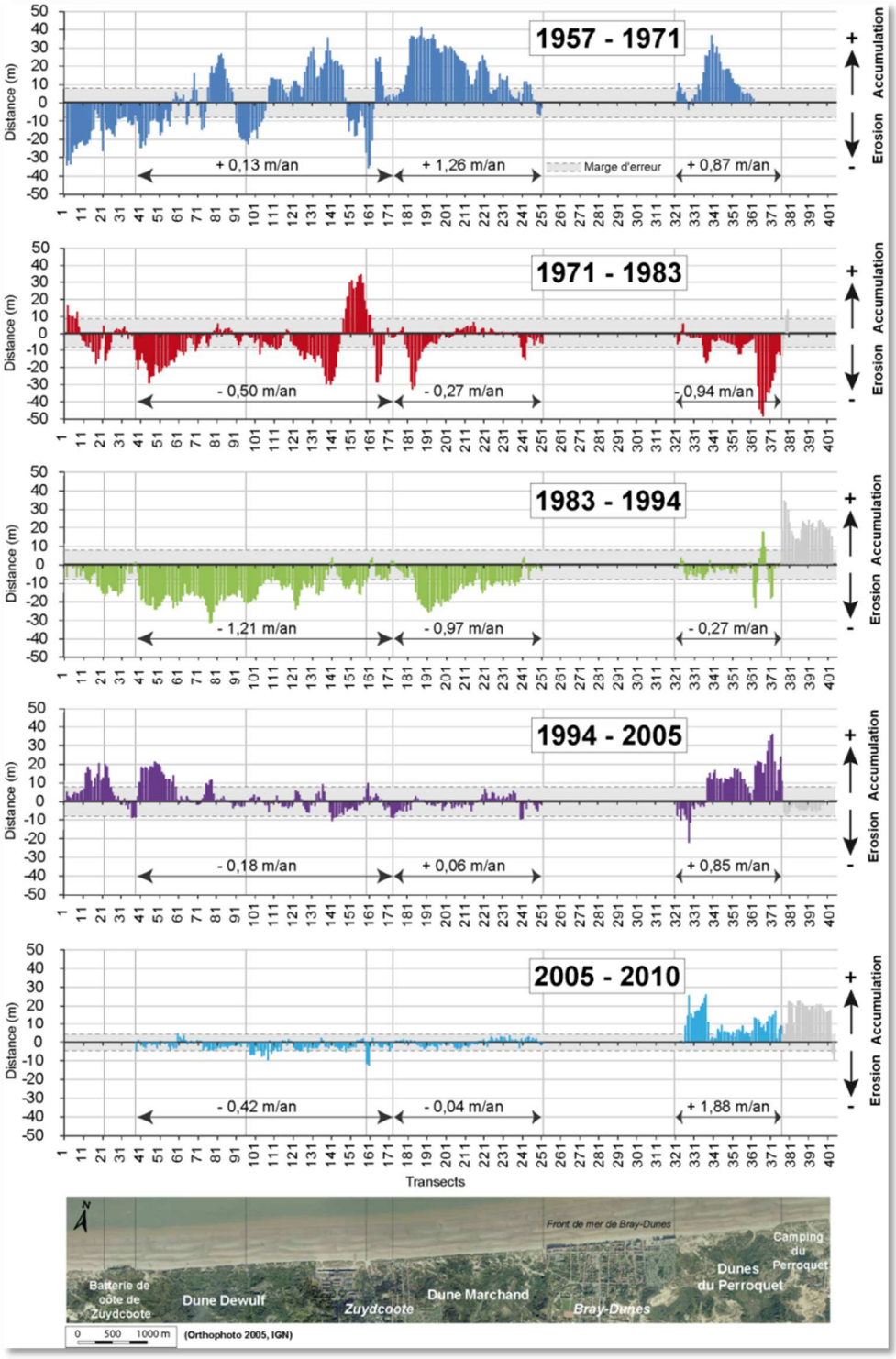



*Figure 5 : Evolution du trait de côte à l'est de Dunkerque pendant différentes périodes entre 1957 et 2010 (Maspataud, 2011).*

Comment expliquer cette variabilité ? Lorsque l'on analyse les hauts niveaux d'eau à Dunkerque, certaines périodes pendant lesquelles le trait de côte a reculé, comme entre 1971 et 1983, montrent une fréquence plus élevée des hauts niveaux d'eau (Figure 6). Néanmoins, ce facteur n'est pas suffisant pour expliquer la variabilité observée, car des périodes plus récentes, caractérisées elles-aussi par une fréquence élevée de hauts niveaux d'eau, n'ont pas forcément connu un recul important du trait de côte.

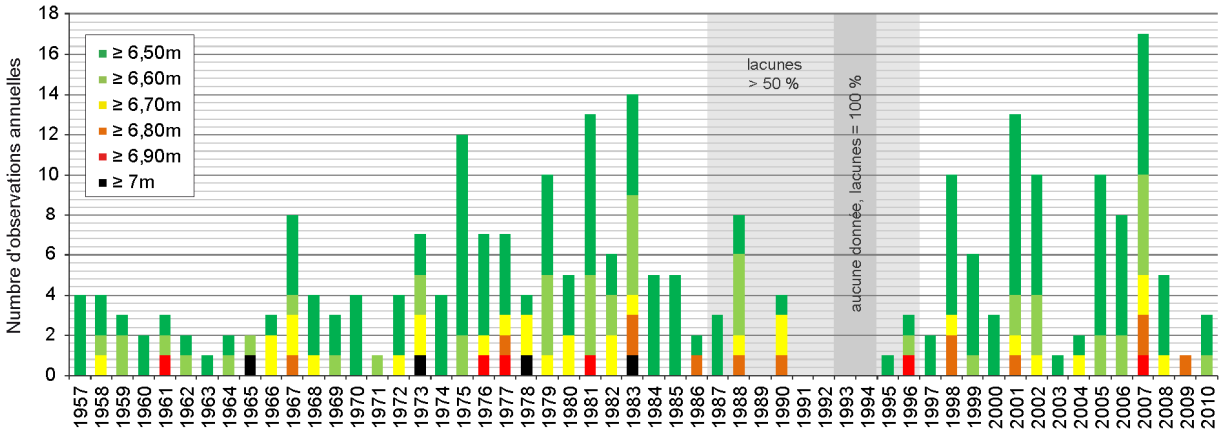



*Figure 6 : Fréquence annuelle de hauts niveaux d'eaux mesurés par le marégraphe de Dunkerque de 1957 à 2010 (Maspataud, 2011).*

La stabilisation des versants dunaires depuis 1995 s'explique en partie par des pratiques de gestion très efficaces qui ont contribué justement à la stabilisation du trait de côte (Ruz et al., 2005). Par exemple, le ratissage mécanique des plages a pris fin, laissant ainsi des nutriments, ce qui a permis aux plantes pionnières de se développer, favorisant ainsi la formation de dunes embryonnaires. Les gestionnaires du site ont développé une expertise dans la réhabilitation de cordon dunaire. Grâce à la pose de ganivelles et de fascines, mais aussi en ayant recours à la plantation d'oyats (Figure 6), il a ainsi été possible de reconstituer un nouveau cordon dunaire à l'est du site, à proximité de la frontière.



Février 2000 Octobre 2005

*Figure 7 : Reconstitution d'un cordon dunaire par plantation d'oyats et pose de ganivelles, dune du Perroquet, est de Bray-Dunes (clichés : M.H. Ruz).*

### L'impact des tempêtes sur les dunes côtières

Les dunes côtières à l'est de Dunkerque ont connu une période de relative stabilité de 1995 jusqu'en 2007. Entre les 18 et 21 mars 2007, une forte tempête s'est soldée par un recul du cordon dunaire de l'ordre de 5 mètres dans le secteur ouest qui avait connu une érosion avant les années 90 (Figure 5). Cet événement érosif s'est produit par des conditions de vent du nord et avec des vitesses de vent peu élevées, de l'ordre de 11 à 14 m/s en moyenne. L'analyse des

vents pendant cet épisode a montré que ce n'est pas nécessairement la vitesse du vent qui est le facteur déterminant pour expliquer l'érosion des dunes côtières, mais qu'il faut également considérer la durée pendant laquelle le vent souffle au-dessus d'un certain seuil. Lors de cet épisode, les vents ont soufflé pendant plus de 72 heures à une vitesse de plus de 8 m/s, ce qui a engendré des vagues de hauteur relativement importantes au large (→ 3 m) (Ruz et al., 2009). Les effets de ces vagues sur le littoral ont été d'autant plus importants que cette tempête s'est produite pendant une période de marée de vive-eau qui a favorisé de hauts niveaux d'eau. La base des dunes a ainsi été touchée à plusieurs reprises lors de marées hautes successives, ce qui a provoqué de l'érosion et un recul important, surtout dans le secteur ouest. En revanche, dans la partie est du site, où le niveau de sable sur le haut de plage était élevé en raison d'une tendance à l'accumulation dans ce secteur, cette tempête n'a pas eu d'impact notable car les vagues n'ont pas pu atteindre le versant dunaire.




*Figure 8 : Rétablissement post-tempête de versants dunaires à l'est de Dunkerque suite à des tempêtes en mars 2007 (Dune Marchand) et en mars 2008 (Dune Dewulf) ; la localisation de la Dune Dewulf et de la Dune Marchand est indiquée dans la Figure 4.*

Suite à cet événement, la morphologie des dunes côtières dont le front dunaire avait été entaillé par les vagues s'est progressivement rétablie (Maspataud et al., 2009). Ce rétablissement post-tempête est évidemment fonction de l'intensité et de la fréquence des tempêtes (Morton et al., 1994), mais également du bilan sédimentaire et il s'est donc réalisé à des rythmes variables selon les secteurs. Dans des secteurs où le bilan sédimentaire est relativement stable, les versants dunaires peuvent se reconstituer très rapidement par apports éoliens comme le montrent les photographies de la Dune Marchand prises le

lendemain d'une tempête en mars 2007, puis quelques mois plus tard alors que les apports éoliens avaient déjà en partie reconstitué la morphologie initiale du versant dunaire (Figure 8). Dans les secteurs connaissant une plus forte érosion, la reconstitution post-tempête peut cependant être plus longue comme en témoignent les clichés pris au niveau de la Dune Dewulf après deux forts coups de vents ayant eu lieu en mars 2008 (Figure 7). Dans ce secteur, il aura fallu plus de cinq ans pour que le front dunaire se reconstitue.

A l'heure actuelle, de tels événements, lors desquels le front des dunes côtières subit une forte érosion liée à des niveaux d'eau extrêmes, sont considérés comme exceptionnels. Avec l'élévation du niveau de la mer, et dans l'éventualité d'un changement dans le régime des vents, ces phénomènes de surcote lors des tempêtes et d'érosion des versants dunaires risquent de devenir de plus en plus communs, ce qui pourrait conduire à une incapacité pour les versants dunaires de se rétablir entre deux tempêtes.

Il est possible de stabiliser les cordons dunaires en mettant en place des fascines et des ganivelles, comme cela peut se faire non seulement dans les dunes, mais aussi en haut de plage, afin de constituer un bourrelet protecteur à l'avant du cordon bordier. Une fois édifié, un tel bourrelet dunaire constitue également une réserve de sédiments pouvant servir à réalimenter les plages lors des tempêtes. Un tel bourrelet dunaire de 3 à 4 m de hauteur qui s'était mis en place en haut de plage devant la Dune Dewulf grâce à l'implantation de ganivelles a été en partie érodé lors de la tempête de mars 2007, mais a néanmoins protégé de l'attaque des vagues le cordon dunaire situé à l'arrière (Figure 9).



*Figure 9 : Erosion partielle d'un bourrelet dunaire de haut de plage édifié à l'aide de ganivelles à l'avant de la Dune Dewulf pendant la tempête du 18 au 21 mars 2007 (cliché : M.H. Ruz, 25 mars 2007)*

L'analyse de l'évolution récente des dunes côtières du Nord – Pas de Calais permet d'avancer qu'une proportion importante d'entre elles sont assez résilientes, car elles parviennent à se reconstituer après des phases érosives de tempête. Leur capacité de reconstitution post-tempête est cependant variable le long du littoral en fonction du bilan sédimentaire local (Ruz

et Anthony, 2008), mais aussi de la bathymétrie à l'avant de côte (Héquette et al., 2009). Avec une hausse du niveau marin et une fréquence plus élevée de hauts niveaux d'eau dans le futur, les problèmes risquent cependant de se poser avec plus d'acuité dans les secteurs qui connaissent déjà des rythmes de recul élevés liés à un déficit sédimentaire.

### Références bibliographiques


Battiau-Queney, Y., Fauchois, J., Deboudt, P., Lanoy-Ratel, P., 2000. Beach-Dune Systems in a Macrotidal Environment along the Northern French Coast (English Channel and Southern North Sea). *Journal of Coastal Research*, ICS 2000, p. 580-592.

Briquet, A., 1930. *Le littoral du Nord de la France et son évolution morphologique*. Armand Colin, Paris, 349 pp.

Héquette, A., Ruz, M.H., Maspataud, A., Sipka, V., 2009. Effects of nearshore sand bank and associated channel on beach hydrodynamics : implications for beach and shoreline evolution. *Journal of Coastal Research*, SI 56, p. 59-63.

Idier, D., Bouchette, F., Brivois, O., Castelle, B., Certain, R., Chateauminois, E., Delvallée, E., Héquette, A., Larroudé, P., Maanan, M., Maspataud, A., Parisot, J.P., Pedreros, R., Robin, N., Romieu, E., Ruz, M. et Thiébot, J., 2010. VULSACO Vulnérabilité de plages sableuses face au changement climatique et aux pressions anthropiques. Module 3.2 : Modélisation de la dynamique actuelle et future des plages. *Rapport final BRGM/RP-58919-FR*, 121 p.

Maspataud, A. 2011. *Impacts des tempêtes sur la morphodynamique du profil côtier en milieu macrotidal*. Thèse de doctorat, Université du Littoral Côte d'Opale, Wimereux, 470 p.

Maspataud, A., Ruz, M.H., Héquette, A., 2009. Spatial variability in post-storm beach recovery along a macrotidal barred beach, southern North Sea. *Journal of Coastal Research*, SI 56, p. 88-92.

Morton, R.A., Paine, J.G., Gibeaut, J.C., 1994. Stages and durations of post-storm beach recovery, south-eastern Texas coast, USA. *Journal of Coastal Research*, 10, p. 884-908.

Ruz, M.H., Anthony, E.J., 2008. Sand trapping by brushwood fences on a beach-foredune contact: the primacy of the local sediment budget. *Zeitschrift für Geomorphologie*, Suppl. Bd. 52 (3), p. 179-194.

Ruz M.H., Meur-Férec C., 2004. Influence of high water levels on aeolian sand transport: upper-beach/dune evolution on a macrotidal coast, Wissant Bay, Northern France. *Geomorphology*, 60, p. 73-87.

Ruz, M-H., Anthony, E.J., Faucon, L., 2005. Coastal dune evolution on a shoreline subject to strong human pressure : The Dunkirk area, Northern France. In: J.L. Herrier *et al*. (eds.) *Dunes & Estuaries 2005*, International Conference on Nature Restoration Practices in European Coastal Habitats, Koksijde, Belgique, p. 441-449.

Ruz, M-H., Héquette, A., Maspataud, A., 2009. Identifying forcing conditions responsible for foredune erosion on the northern coast of France. *Journal of Coastal Research*, SI 56, p. 356-360.

# Impacts du changement climatique sur les estuaires

Alain TRENTESAUX

Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences

UMR 8187 CNR / Université de Lille - Sciences et Technologies

La région Nord-Pas de Calais est située entre deux mers importantes, la mer du Nord et la Manche, deux mers de passage. Bien que ce littoral soit caractérisé par une importante occupation par l'homme, et notamment par la présence d'ouvrages de défense, il reste encore de nos jours un certain nombre d'espaces naturels dont des estuaires comme l'estuaire de la Canche et l'estuaire de l'Authie (Figure 1).

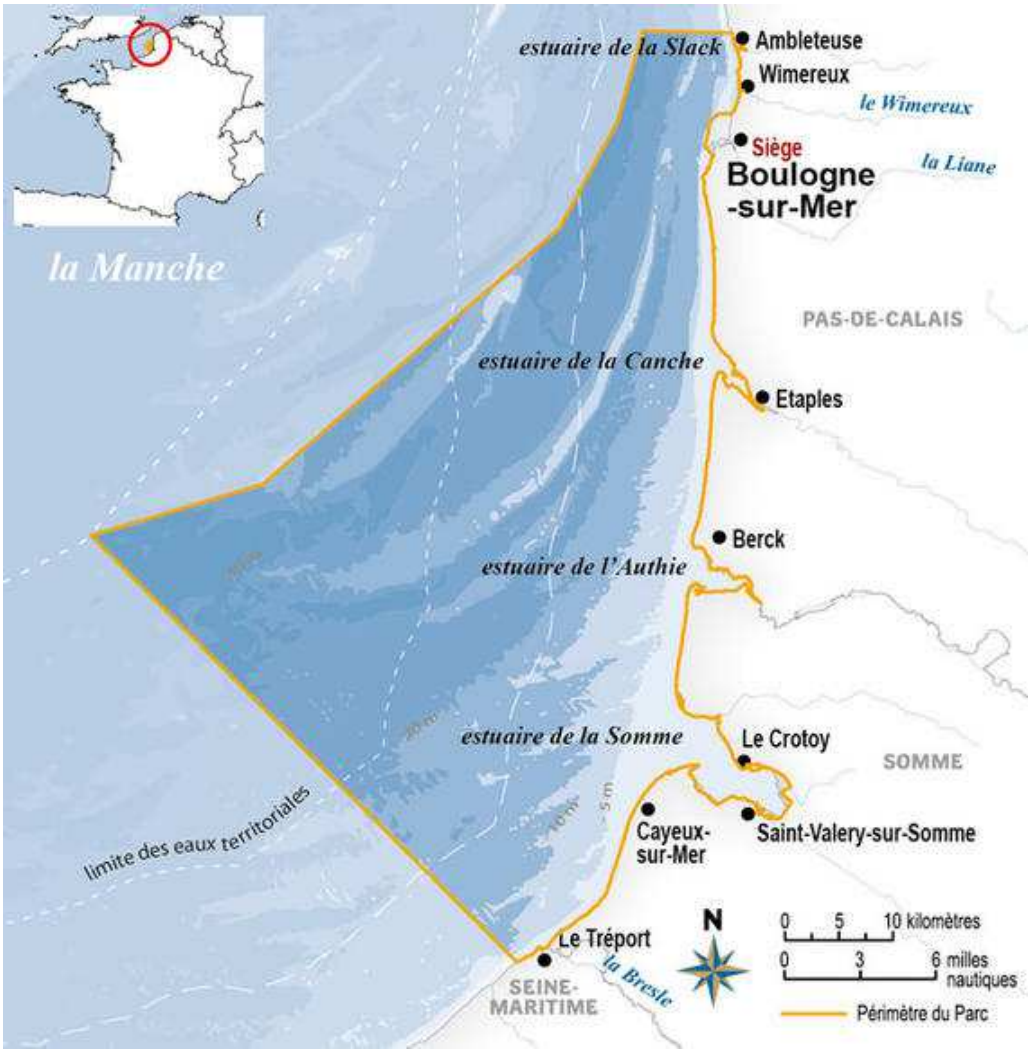



*Figure 1 : Extension du Parc Naturel Marin des Estuaires Picards et de la mer d'Opale. D'Ambleteuse au Tréport, il possède 6 estuaires : la Slack, le Wimereux, la Liane, la Canche, l'Authie, et la Somme. Seuls la Slack, la Canche, l'Authie et la Somme, peu anthropisés, peuvent encore être appelés estuaires. (Parc Naturel Marin des Estuaires Picards et de la mer d'Opale, 2014)*

Les estuaires sont utilisés pour pratiquer un certain nombre d'activités économiques et/ou récréatives : on y pratique notamment la navigation de plaisance, la chasse, la cueillette, la pêche à pied. Les estuaires sont également utilisés pour le pâturage. Ils revêtent une grande importance écologique en tant que nourricerie pour les poissons, les oiseaux et comme reposoir pour les oiseaux et certains mammifères marins. La biodiversité y est élevée et comme le montrent les travaux réalisés dans les estuaires de la région (Rolet et al., 2014), les estuaires concentrent une diversité d'habitats nettement plus élevée que celle des milieux littoraux environnants (Figure 2). Il s'agit en outre d'espaces naturels de grande superficie, ce qui est relativement rare dans la région. Les estuaires constituent une identité forte de la région, en atteste la création en 2012 du « Parc Naturel Marin des Estuaires Picards et des mers d'Opale » (Figure 1).

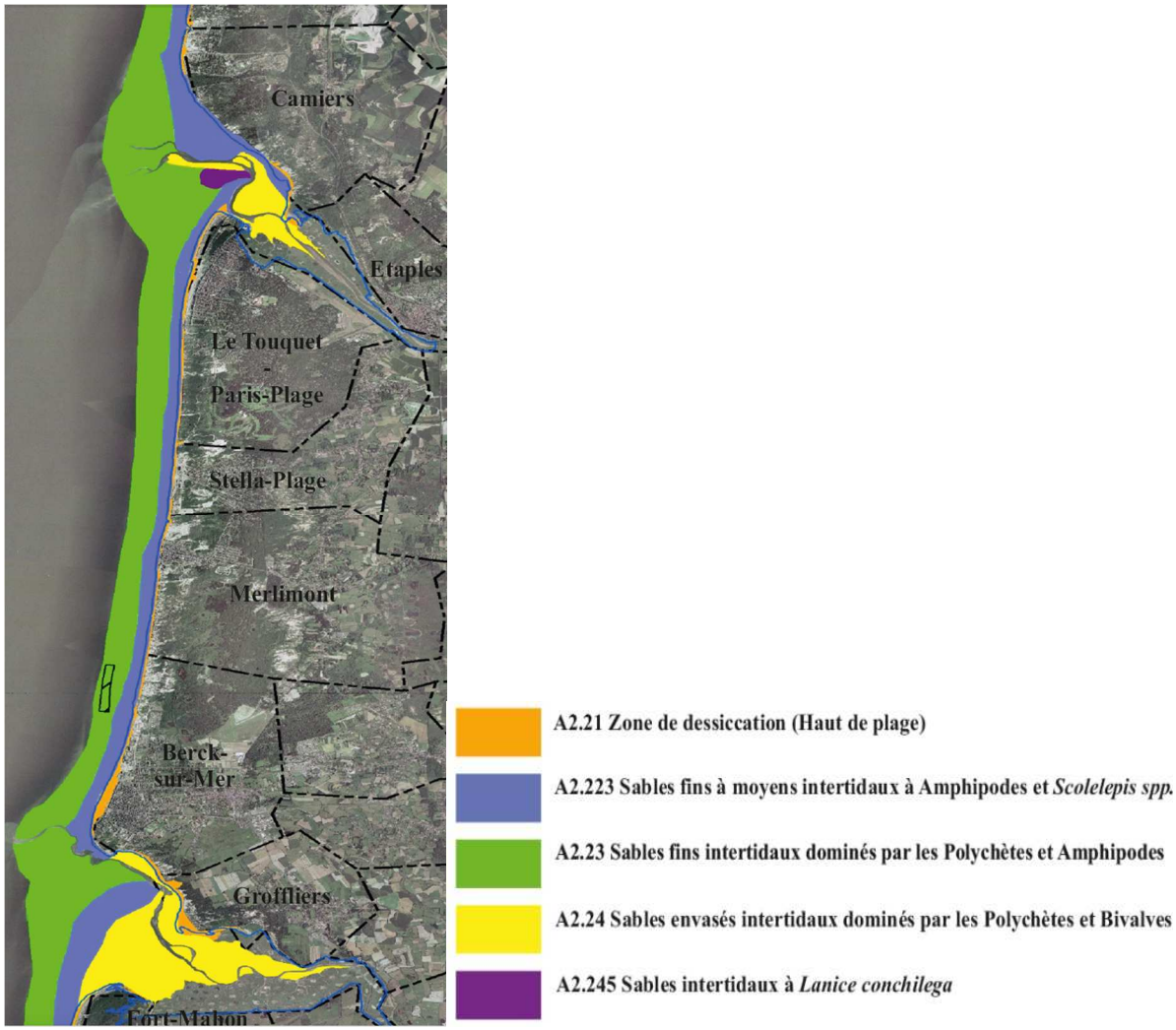



*Figure 2 : Cartographie des communautés benthiques du littoral entre les baies de Canche et d'Authie. On remarquera au niveau des estuaires un nombre plus important de communautés différentes attestant du caractère diversifié des milieux estuariens (Rolet et al., 2014).*

### Quel pourra être l'impact du changement climatique sur ces espaces ?

Comme pour tout autre environnement, la dynamique des estuaires répond à divers types de forçages naturels. Ces forçages peuvent être d'origine continentale et avoir des répercussions sur le domaine littoral. C'est le cas de l'érosion des sols ou du débit des cours d'eau qui déterminent la nature et la quantité des apports sédimentaires terrigènes venant des bassins versants. Les estuaires peuvent connaître une certaine subsidence, un enfoncement généralisé de la zone, ou au contraire une légère surrection. Ces phénomènes, qui peuvent être causés par des phénomènes tectoniques, sont généralement très lents. Dans un estuaire, les forçages sont également d'origine marine sous l'effet notamment des courants de marée qui sont à l'origine d'une oscillation d'une quantité d'eau (appelée « prisme tidal ») entrant et sortant de l'estuaire lors du flot et du jusant. La taille de ce prisme est déterminée par l'amplitude de la marée et le volume de l'estuaire. Se produisent également des transports sédimentaires longitudinaux sous l'action des vagues qui sont responsables d'apports de sédiments issus de l'érosion de falaises ou des côtes adjacentes, comme dans le cas de la baie d'Authie qui reçoit des sédiments provenant du sud (Dobroniak et Anthony, 2002). Des échanges sédimentaires se produisent enfin entre la côte et le large tandis que des transports éoliens sont responsables d'un transfert de sables depuis l'estran jusqu'au haut de plage où ils s'accumulent pour former des dunes côtières. Le changement climatique pourra potentiellement avoir des effets sur tous ces phénomènes (sauf ceux d'ordre tectonique) avec un possible changement dans le régime des tempêtes pouvant affecter les côtes, des modifications de l'intensité de l'érosion des sols et, éventuellement, une modification des débits liquides et des apports solides en provenance du continent, mais aussi une augmentation de la température et de la salinité des eaux. Enfin, d'autres impacts sont à prévoir avec la remontée prévue du niveau marin (Environment Agency, 2010).

Bien que la pression touristique ne soit pas très élevée sur les estuaires de la région, ces estuaires ne peuvent être considérés complètement comme des espaces naturels pour autant. Ils sont affectés par les nombreuses actions et modifications anthropiques au niveau des bassins-versants dans la partie continentale, sur les rives des estuaires, mais aussi par des activités humaines qui peuvent se produire au large et qui peuvent avoir des conséquences importantes sur le littoral. Ce pourrait être le cas des extractions de granulats actuellement nulles sur la Région. L'évaluation des impacts du changement climatique sur ces milieux est, par conséquent, encore plus difficile à réaliser en raison de l'interaction entre actions anthropiques et processus naturels.

On peut cependant tenter d'apprécier certains changements d'ordre morphodynamique (de la morphologie et de la dynamique) susceptibles de se produire avec le changement climatique. Ces changements d'un estuaire d'un point de vue physique, peuvent avoir un certain nombre de conséquences sur l'écosystème (les types et la répartition des communautés). Par exemple, l'évolution des herbus (prairies maritimes), l'évolution des vasières, liées éventuellement à une modification de la nature des sédiments, pourra avoir un effet sur les nourriceries. La modification des habitats a également des effets sur l'oxygénation du milieu. On peut également envisager une remontée de la salinité dans les estuaires comme le montrent certaines modélisations (C32E, 2015).

Les estuaires réagissent à de nombreux forçages et les conséquences possibles sont multiples sur les habitats et les usages. Concernant les effets possibles de l'élévation du niveau de la mer sur les risques de submersion des zones basses des estuaires, par exemple, leur prédiction est complexe en raison notamment du caractère non-linéaire des phénomènes en jeu. Contrairement à ce que l'on pourrait penser a priori, une hausse du niveau de la mer ne va pas forcément s'accompagner d'un déplacement de la ligne du rivage vers l'intérieur des terres. Une élévation du niveau de la mer peut effectivement causer un recul du trait de côte et favoriser des submersions marines, mais ceci se produit lorsque les sédiments ne s'accumulent pas à un rythme suffisamment élevé dans l'estuaire pour compenser la vitesse d'élévation du niveau marin. Si les apports sédimentaires sont plus abondants et arrivent à compenser cette hausse du niveau de la mer, le trait de côte pourra au contraire progresser vers le large.

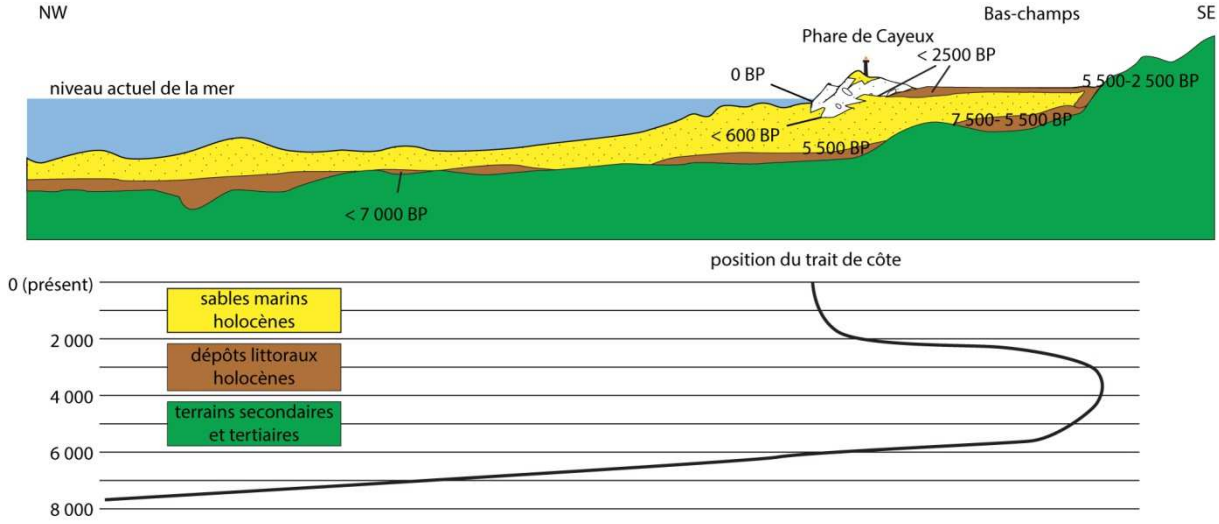



*Figure 3 : Coupe géologique très schématique perpendiculaire au trait de côte au sud de la baie de Somme. Données issues du BRGM (1985). Les dates affichées (en BP pour « Before Present », c'est à dire avant 1950) ont été obtenues sur des éléments de dépôts littoraux. On note que les âges décroissants s'approchent régulièrement de la falaise de terrains anciens en vert au SE avant de repartir vers le large et atteindre la position actuelle du trait de côte.*

Ces considérations ne sont pas que théoriques puisque la stratigraphie des dépôts de comblement de l'estuaire de la baie de Somme montre de telles fluctuations dans la position du trait de côte pendant les derniers millénaires (Figure 3). La datation de sédiments littoraux a permis de montrer qu'il y a plus de 7000 ans jusqu'à environ 5500 avant nos jours, alors que le niveau de la mer s'élevait (Figure 4), la position du trait de côte s'est déplacée vers la terre jusqu'à atteindre les falaises qui sont aujourd'hui des falaises mortes (Figure 3). La côte a ensuite progressé vers le large à partir d'environ 4000 ans avant aujourd'hui, ceci dans des conditions constantes d'élévation du niveau de la mer, mais avec une diminution du rythme de remontée du niveau marin (Figure 4) qui a permis à la terre de progresser, induisant un déplacement du trait de côte vers le large (Figure 3).

De tels déplacements de la ligne de rivage se sont aussi produits à des échelles de temps plus courtes. La Figure 5 montre l'évolution de la ligne de rivage dans la baie d'Authie depuis le 12ème siècle ainsi que les aménagements importants, comme les digues qui ont été édifiées au fil du temps pour conquérir des terres sur la mer ainsi que les ouvrages de défense contre la mer. Les aménagements de l'estuaire par l'homme n'ont fait qu'accompagner l'évolution de ces espaces naturels, comme la progression de la pointe de Routhiauville, par exemple, qui a progressé de plusieurs kilomètres vers le nord, tandis que la rive nord de l'estuaire de l'Authie reculait également vers le nord en direction de Berck-sur-Mer. C'est cette évolution qui explique, entre autres, la présence des nombreux ouvrages de défenses qui existent aujourd'hui sur la rive nord de l'estuaire. À une échelle encore plus courte, on peut observer d'importantes variations dans la position du trait de côte dans les estuaires, comme en baie de Canche où des avancées et des reculs du rivage se sont produits selon les endroits depuis les années 50.

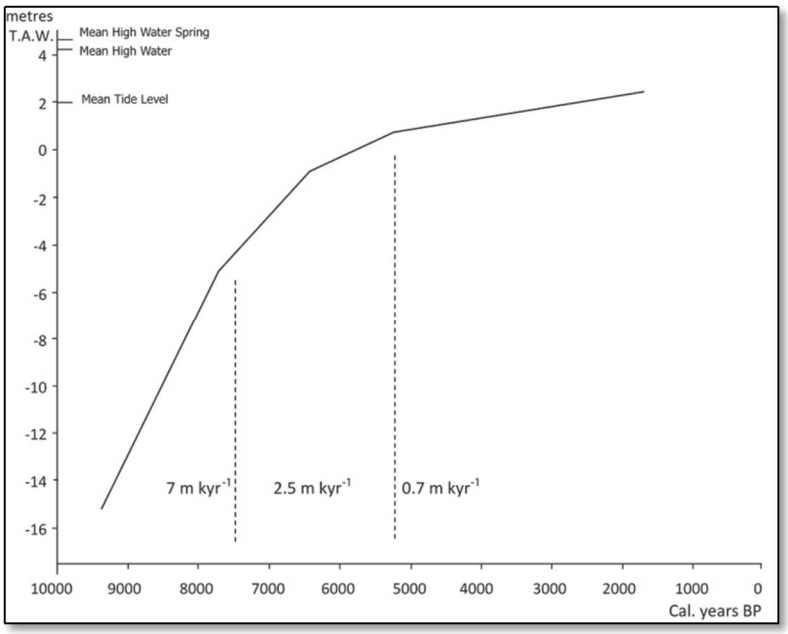



*Figure 4 : Remontée du niveau marin au cours des 9500 dernières années en référence au niveau marin actuel belge (TAW). On note une remontée très rapide jusque 7500 ans avant que cette remontée ne ralentisse jusqu'à l'heure pré-industrielle non documentée à cette échelle. Données issues de Denys et Baeteman, 1995).*

Les estuaires sont donc des milieux en constante évolution à différentes échelles de temps et avec des interactions diverses entre les processus naturels et anthropiques. Le changement climatique sera nécessairement responsable de modifications, mais la difficulté de prévoir si ces changements auront des répercussions positives ou négatives engendre un certain nombre de craintes. Les risques de submersion seront-ils plus élevés dans le futur avec des inondations plus fréquentes ? Cela peut-il conduire à l'envahissement par la mer des zones poldérisées ? Allons-nous assister à une intrusion des eaux salines plus en amont dans les estuaires ? Y aura-t-il des impacts sur la morphologie des zones intertidales avec comme conséquences des modifications des habitats ? Les estuaires vont ils se fermer en raison de leur comblement comme cela a pu être le cas dans le Cotentin, par exemple? Pour tenter de

répondre à ces questions, il faut non seulement se baser sur les projections des changements climatiques futurs, mais également faire appel à des modélisations hydrosédimentaires tout en examinant les impacts possibles sur le vivant.

La hausse de la température de l'air (Figure 6), mais également de celle de l'eau de mer (les deux sont liées), est une donnée mesurée et les modélisations de l'évolution du climat prévoient une augmentation constante pendant les prochaines décennies quel que soit le scénario envisagé. Il est probable que la température augmente en été, qu'il s'agisse de la température de l'air ou de la température de l'eau (Boucher et al., 2015). D'après les modélisations hydrosédimentaires, une augmentation de la température de l'eau pourrait avoir des impacts sur la **composition et la répartition des organismes vivants dans les estuaires**, mais n'aurait toutefois pas d'effet notable sur l'évolution de la morphologie des estuaires (C32E, 2015).

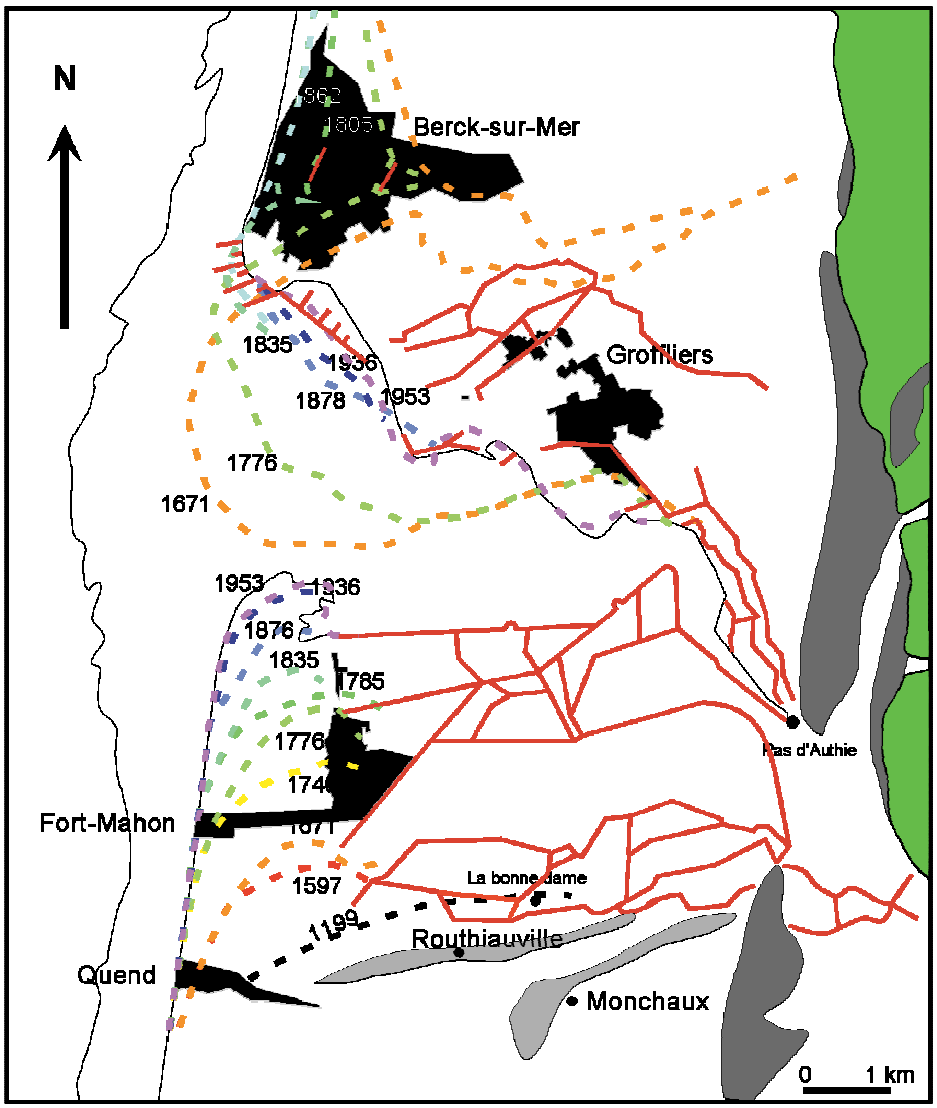



*Figure 5 : Evolution du trait de côte dans l'estuaire de l'Authie (modifié d'après Dobroniak, 2000 par Trentesaux, 2005). Les digues ayant servi à poldériser l'estuaire et les ouvrages de défense sont indiqués en rouge. En vert : terminaison occidentale des plateaux crayeux de l'Artois ; En gris : cordons de silex ; en noir, centres urbains en 2000.*

Une autre conséquence possible du changement climatique concerne la salinité des eaux côtières qui peut varier en fonction des variations de la température de l'eau et des précipitations. Si l'on considère qu'en zone tropicale on pourrait assister à une hausse de la salinité en raison d'une plus forte évaporation, alors qu'on observerait une diminution de la salinité dans les zones polaires due à de plus fortes précipitations (IPCC, 2013), il existe de grandes incertitudes en ce qui concerne l'évolution de la salinité des eaux marines dans les zones tempérées. Les travaux de modélisation suggèrent toutefois qu'une modification de la salinité n'aurait pas de conséquence sur la morphologie des estuaires (Environmental Agency, 2010 ; C3E2, 2015).

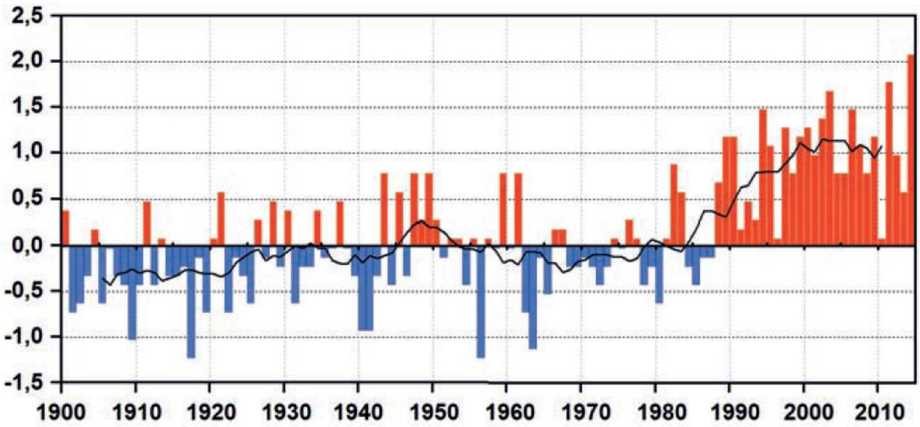



*Figure 6 : Anomalies de la température moyenne (en degrés) en France métropolitaine depuis 1900 et moyennes décennales par rapport à la période de référence 1961-1990 (Planton et al., 2015)*

Un autre impact possible du changement climatique sur les estuaires concerne les apports sédimentaires marins dont l'importance pourrait varier à l'avenir. Contrairement à ce que l'on peut observer sur un certain nombre de plages du Nord-Pas de Calais qui subissent de l'érosion, les estuaires connaissent plutôt un **ensablement**. L'étude de carottes sédimentaires ou de la nature des sédiments dans ces estuaires montrent que les matériaux sont essentiellement d'origine marine (Marion et al., 2009 ; Trentesaux et al., 2009). Comme ces sédiments viennent de la mer, une augmentation de la fréquence des tempêtes sur nos côtes avec le changement climatique, pourrait possiblement induire une augmentation des apports de sédiments vers la côte et donc vers les estuaires.

Bien que de moindre importance, les apports sédimentaires continentaux pourraient également varier dans le futur avec une modification des précipitations. Les différents modèles d'évolution du climat montrent que l'augmentation de la température aura vraisemblablement comme effet de provoquer une augmentation globale des précipitations, mais répartie de façon très irrégulière dans l'espace (IPCC, 2013), avec notamment une baisse des précipitations en été en France, ce qui aura des effets sur le débit des cours d'eau (Chauveau et al., 2013). En Nord-Pas de Calais, les modélisations climatiques et hydrologiques prévoient des **réductions des débits fluviaux de 20 à 30 % pour la Canche et l'Authie et de 30 à 40 % pour la Somme**. Les conséquences de telles variations seraient importantes sur l'hydrologie et la morphologie des estuaires puisqu'elles seraient responsables d'une réduction des apports solides, d'un renforcement du flot, et donc du courant entrant dans l'estuaire, ce qui pourrait engendrer le creusement des chenaux (van der Wegen et al. 2010 ;

Coco et al. 2013).

Comme il n'y a pas eu jusqu'à présent de travaux de modélisation hydrodynamique sur les estuaires locaux, seront présentés ici les résultats obtenus dans le cadre d'un projet réalisé sur l'estuaire de la Loire (C3E2, 2015). Les résultats des modélisations hydrodynamiques et morphodynamiques réalisées montrent qu'en l'absence du changement climatique, la surface des espaces intertidaux en rive droite de la Loire en aval de Nantes, s'élèverait de 0 à 0,5 m d'ici 2040 (Figure 7). Si l'on considère une modification du régime hydrologique du cours d'eau avec une réduction des apports solides qui passeraient de 1,56 million de tonnes/an actuellement à 1,17 million de tonnes/an en 2040, on assisterait à peu de modifications des taux de sédimentation. En revanche, si s'ajoute à cela une remontée du niveau de la mer de 34 cm à l'horizon 2040 (scénario NL3 du GIEC, 2013), on observerait une sédimentation plus importante qui se solderait par une surélévation plus importante des fonds. Cette augmentation de la sédimentation ne compenserait toutefois pas la hausse du niveau de la mer. Un des impacts les plus importants du changement climatique dans l'estuaire serait une **migration vers l'amont de la zone de turbidité maximale** associée à une augmentation générale de la teneur en particules fines en suspension dans l'estuaire. D'autres prédictions vont également dans le sens d'une **inondation accrue des zones basses** liée à l'impossibilité de la sédimentation à compenser la remontée du niveau de la mer (Ranasinghe et al., 2013 ; van Maanen et al., 2013).

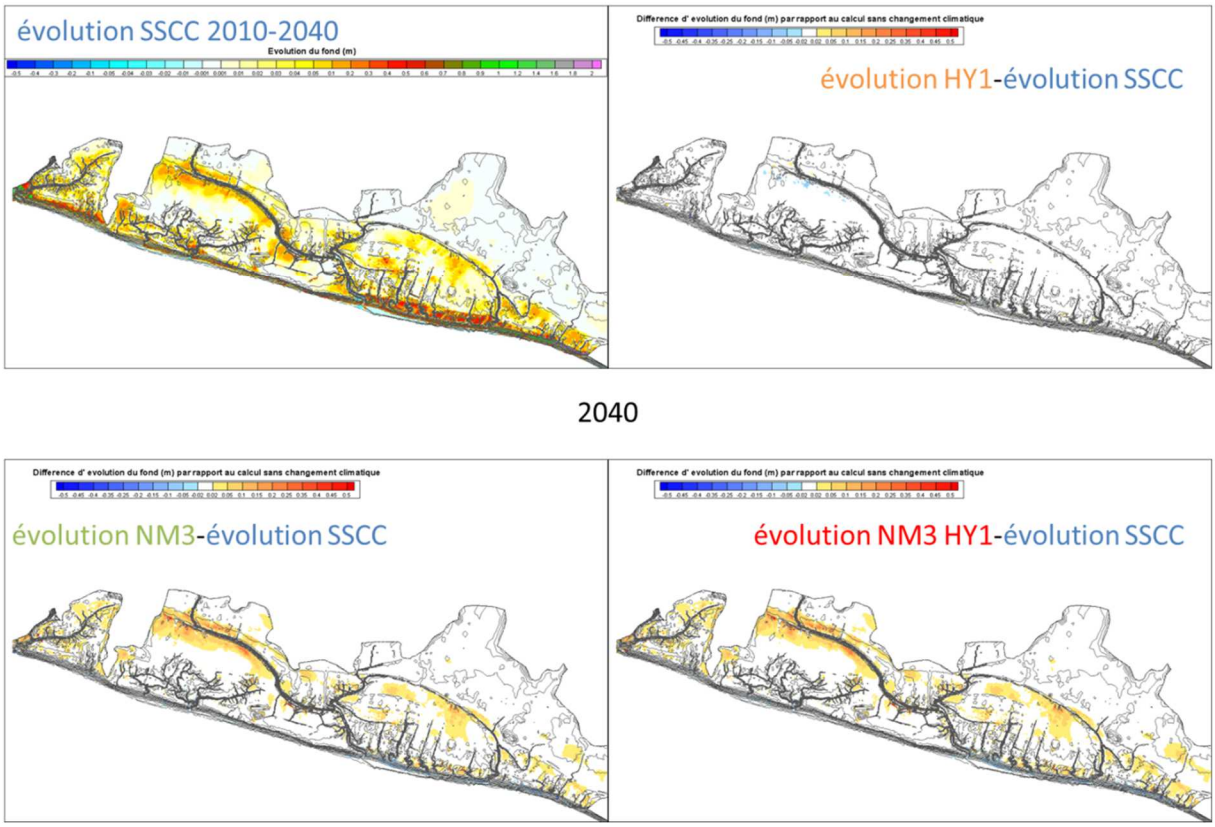



*Figure 7 : Evolution 2010-2040 d'un tronçon de la rive droite de la Loire pour le cas sans changement climatique (SSCC) et différentiel (avec le cas sans changement climatique) d'évolution topo-bathymétrique pour les autres scénarios. HY1 : Scénario à variation hydrologique conduisant à une réduction de 25% des débits solides ; NM3 : Scénario d'élévation du niveau marin de +34 cm à l'horizon 2040 ; NM3-HY1 : Scénario combinant les deux scénarios précédents. (E3C2, 2015 et Le Hir, 2015).*

En résumé, la hausse du niveau marin semble être un facteur primordial de l'évolution des estuaires, qui ne suffit pourtant pas à tout expliquer, l'homme jouant aussi un rôle majeur dans leur évolution. Face aux modifications futures de ces milieux avec le changement climatique, la question se pose de savoir s'il faut subir, laisser faire ou accompagner. Là où la mer vient déjà lécher les digues des polders lors des marées de fort coefficient, faudra-t-il conforter les digues, et si oui jusqu'à quelle hauteur ? Pour quel coût ? Faudrait-il rouvrir les polders dans certains cas (French, 2012 ; Jongepier, 2015) ? Bien que beaucoup d'études aient déjà été réalisées sur les estuaires et que nous ayons aujourd'hui une assez bonne connaissance de leur fonctionnement hydrologique et morphodynamique, notre compréhension des interactions entre la végétation et la sédimentation est encore lacunaire. Compte tenu des nombreuses incertitudes qui demeurent concernant de possibles variations futures du régime hydrologique ainsi que des apports sédimentaires dans les estuaires, il est encore difficile de prévoir les conséquences éventuelles du changement climatique sur leur évolution. Il est de ce fait indispensable de continuer les suivis de mesures hydrologiques et morphologiques entrepris dans les estuaires de la région afin d'avoir une base de connaissance suffisamment approfondie de leur dynamique pour pouvoir réaliser des modélisations hydrosédimentaires fiables.

## Références bibliographiques


Boucher, O., Dufresne, J.-L., Vial, J., Brun, E., Cattiaux, J., Chauvin, F., Salas y Mélia, D., Voldoire, A., Bopp, L., Braconnot, P., Ciais, P., Yiou, P., Guilyardi, E., Mignot, J., Guivarch, C., 2015. Projection des changements climatiques futurs. *La Météorologie*, 88, p. 56-68

BRGM, 1985. *Carte géologique de la France à 1/50 000. Feuille de St-Valery-sur-Somme Eu*. Bureau de Recherches Géologiques et Minières. Coordonné par P. Broquet. Carte + notice de 39 pp.

C32E, 2015. *Conséquences du Changement Climatique sur l'Ecogéomorphologie des Estuaires*. Programme du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie. Coordination : P. Le Hir, Ifremer, DYNECO, Brest. Document de travail, 2015.

Chauveau, M., Chazot, S., Perrin, C., Bourgin, P.Y., Sauquet, E., Vidal J.-P., Rouchy, N., Martin, E., David, J., Norotte, T., Maugis, P., De Lacaze, X., 2013. Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070 ? *La Houille Blanche*, 4, p. 5-15.

Coco, G., van Maanen, B., Olabarietta, M., Tinoco, R., Townend, I., 2013. Morphodynamics of tidal networks : advances and challenges. *Marine Geology*, 346, p. 1-16.

Denys L., Baeteman, C., 1995. Holocene evolution of relative sea level and local mean high water spring tides in Belgium – A first assessment. *Marine Geology*, 124, p. 1-19.

Dobroniak, C. 2000. *Géomorphologie, hydrodynamique et écologie d'un estuaire tempéré macrotidal : l'Authie, Manche orientale, France*. Thèse de doctorat, Université du Littoral, Dunkerque, 308 pp.

Dobroniak, C., Anthony, E.J., 2002. Short-term morphological expression of dune sand recycling on a macrotidal, wave-exposed estuarine shoreline. *Journal of Coastal Research*, SI 36, p. 240-248.

Environment Agency, 2010. *Vulnerability of estuaries to sea level rise*. Stage 1: a review. Environment Agency Report SC080016/R1. Report by D. Prandle, 93 pp.

French, J.R., 2012. Hydrodynamic modeling of estguarine flood defense realignment as an adaptative management response to sea-level rise. *Journal of Coastal Research*, 24, p. 1-12.

IPCC, 2013. *Climate change 2013 - The physical science basis*. Contribution du Groupe de travail I au 5ème rapport d'évaluation du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat. Cambridge University Press, 1552 pp.

Jongepier, I., Wang, C., Missiaen, T., Soens, T., Temmerman, S., 2015. Intertidal landscape response time to dike breaching and stepwise re-embankment: A combined historical and geomorphological study. *Geomorphology*, 236, p. 64-78.

Le Hir, P., 2015. *Modélisation de la dynamique sédimentaire pour l'environnement côtier et estuarien, et stratégie de validation*. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Bretagne Occidentale.

Marion, C., Anthony, E. J., Trentesaux, A. 2009. Short-term (←= 2 yrs) estuarine mudflat and saltmarsh sedimentation: high-resolution data from ultrasonic altimetry, Rod Surface-Elevation Table, and filter traps. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 83 (4), 475-484.

Planton, S., Bopp, L., Brun, E., Cattiaux, J., Chauvin, F., Chevalier, M., Ciais, P., Douville, H., Giraud, G., Soubeyroux, J.M., Terray, L., 2015. Evolution du climat depuis 1850. *La météorologie*, 88, Février 2015, p. 48-55.

Rolet, C., Luczak, C, Spilmont, N., Dewarumez, J.-M., 2014. *Cartographie des communautés benthiques intertidales des substrats meubles de la région Nord – Pas-de-Calais*. Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences - UMR CNRS LOG 8187, Wimereux, 33 pp + 2 cartes.

Parc Naturel Marin des Estuaires Picards et de la mer d'Opale, 2014. Guide de présentation. Disponible sur http://www.aires-marines.fr/L-Agence/Organisation/Parcs-naturels-marins/Parc-naturel-marin-des-estuaires-picards-et-de-la-mer-d-Opale. Décembre 2014, 24 pp.

Ranasinghe, R., Duong, T.M., Uhlenbrook, S., Roelvink, D., Stive, M., 2013. Climate-change impact assessment for inlet-interrupted coastlines. *Nature Climate Change*, 3, p. 83–87.

Trentesaux, A., 2005. *Enregistrement de processus sédimentaires pléistocènes. Exemples de plate-formes détritiques et de bassins profonds. Mer du Nord et mers de Chine*. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Lille, 54 pages + annexes.

Trentesaux *et al.*, 2009. CPER *Ecosystèmes perturbés du Littoral. Indicateurs chimiques, biologiques, sédimentologiques et anthropiques de l'évolution passée et récente des zones estuariennes du Nord Pas-de-Calais. La Canche, l'Authie et la plaine maritime*. Rapport scientifique final. Université de Lille, CNRS, Région Nord Pas-de-Calais. Coordinateur : A. Trentesaux, 90 pp.

Van der Wegen, M., Dastgheib, A. And Roelvink, J.A., 2010. Morphodynamic modeling of tidal channel evolution in comparison to empirical PA relationship. *Coastal Engineering*, 57, p. 827-835.

Van Maanen, B., Coco, G., Bryan, K.R. and Friedrichs, C.T., 2013. Modeling the morphodynamics response of tidal embayments to sea-level rise. *Ocean Dynamics*, 63, p. 1249-1262.

# L'influence des paramètres hydroclimatiques et météo-marins sur le recul des côtes à falaises

Guillaume PIERRE

Groupe d'Etude sur les Géomatériaux et
les Environnements Naturels et Anthropisés,
Université de Reims Champagne-Ardenne

Contrairement aux côtes d'accumulation, qui avancent et reculent en fonction du bilan sédimentaire, le recul des côtes à falaises est irréversible. Au mieux deviennent-elles des falaises mortes, si le trait de côte se déplace vers la mer, par exemple si un cordon de plage épais s'accumule en pied de falaise. Les modalités de l'érosion des falaises seront examinées à partir de deux exemples, pris dans deux contextes climatiques différents – le littoral Boulonnais et les Îles-de-la-Madeleine (Québec) – illustrant le rôle possible et respectif des paramètres qui contrôlent la dynamique récente de falaises à recul rapide (falaises crayeuses ou taillées dans des grès tendres) ou plus lent (falaises gréseuses), à savoir : la pluviométrie et l'hydrologie continentale d'un côté et les conditions météo-marines et l'élévation du niveau de la mer de l'autre. Autant de paramètres susceptibles de connaitre des modifications, en fréquence ou en intensité, dans le cadre du réchauffement climatique.

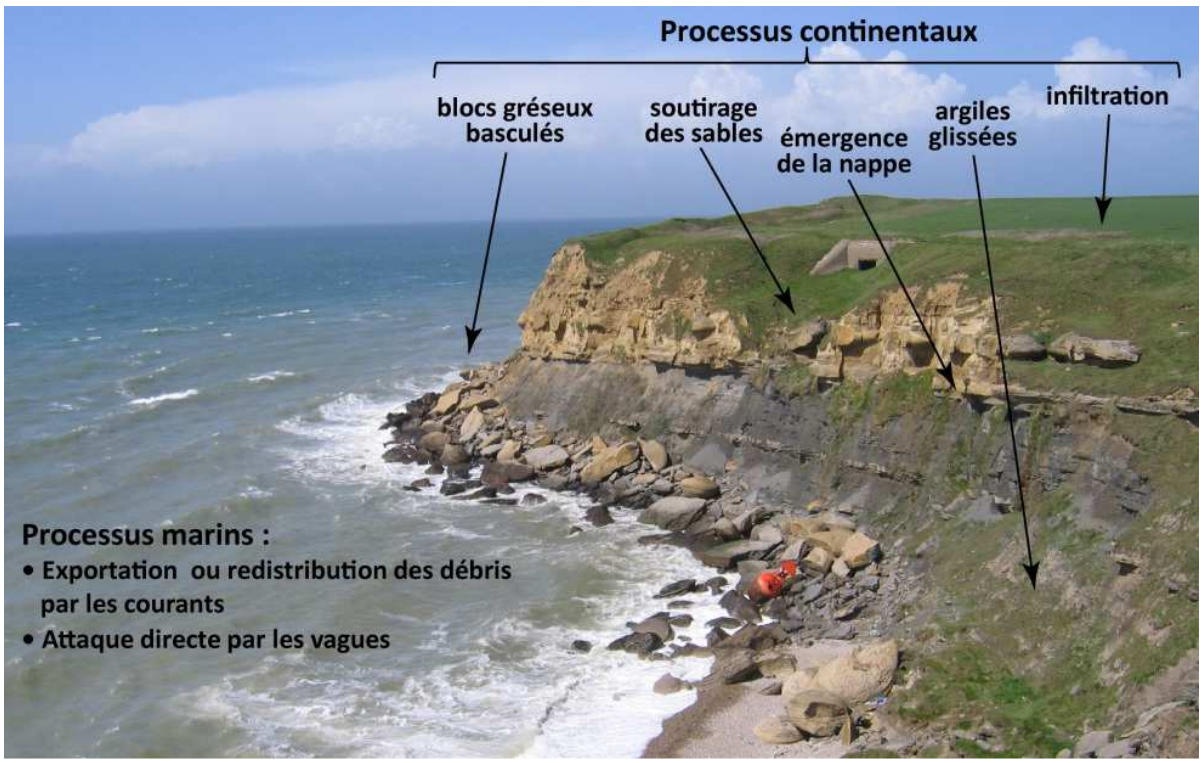



*Figure 1. Exemple de processus d'évolution d'une falaise (Pointe du Riden, Boulonnais).*

Les falaises argilo-gréseuses du Gris-Nez (Figure 1) illustrent la dualité des processus morphogéniques sur un littoral à falaise. Côté terre, l'eau des précipitations s'infiltre sur le revers de la falaise et, dirigée vers la paroi, suinte en entrainant d'une part un soutirage des sables et un déchaussement des blocs gréseux, et d'autre part une humectation et un glissement des argiles. Les blocs gréseux, en porte-à-faux, finissent par basculer sur le pied de falaise. Côté mer, les courants évacuent les débris (sauf les volumineux blocs gréseux) et, éventuellement, les vagues attaquent le pied de falaise (cependant, au Gris-Nez, le pied de falaise est perché de 1 à 3 m au-dessus des pleines mers de vives eaux). Dans les conditions actuelles, le rôle des processus marins est donc ici très secondaire.

Les processus marins peuvent au contraire jouer un rôle de premier plan, comme aux Îles-de-la-Madeleine (Golfe du Saint Laurent, Canada), où les falaises de grès tendre sont sensibles au travail des vagues. Mais comme les plus fortes tempêtes sont hivernales, le rythme de recul des falaises sur les cinquante dernières années ne s'accélère que sur la période 2001-2008 qui a connu la plus grande anomalie négative de la couverture de glace de mer depuis 1964, à cause d'un réchauffement des températures (Pierre et Bernatchez, 2009). Selon les simulations du Modèle Régional Canadien du Climat (Morneau, 2008), le nombre de tempêtes ayant le potentiel d'engendrer des vagues de plus de 4 m de hauteur n'augmentera pas et devrait même diminuer pour certains types de tempêtes. Cependant, un réchauffement de température de 2 degrés d'ici 2050 entraînerait une réduction moyenne de 60 % de la glace de mer dans le Golfe du Saint-Laurent, de sorte que le nombre de tempêtes (hivernales) efficaces pouvant affecter le littoral devrait augmenter au cours des 35 prochaines années. Dans ce contexte, l'élévation du niveau de la mer ne peut qu'accélérer le recul des falaises, car il permet aux vagues d'atteindre plus régulièrement des points moins résistants (grès altéré, dépôts meubles) situés dans la partie supérieure de la falaise.

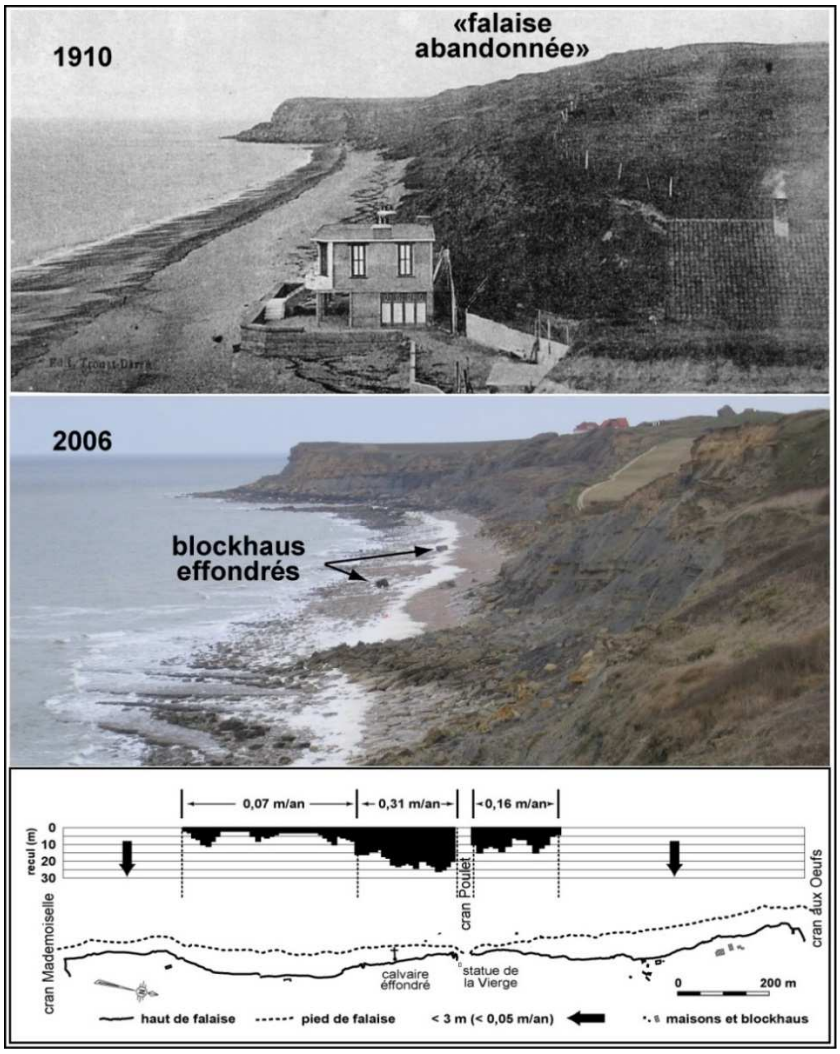



*Figure 2. Plage du cran Poulet en 1910 et 2006, et valeurs de recul 1939-2003 (d'après Pierre, 2008, modifié).*

Dans le Boulonnais, concernant les conséquences de l'élévation du niveau de la mer, un secteur des falaises du Gris-Nez permet de faire une analogie instructive. Encore au début du 20ème siècle, la falaise qui donnait sur la large plage du cran Poulet (Figure 2) était qualifiée de falaise abandonnée (Briquet, 1930) : la mer ne l'atteignait pas. Entre 1885 et 1940, l'exploitation du cordon de galet qui borde la falaise au cran Poulet a abaissé de 2 m le niveau de la plage, ce qui s'apparente à une élévation du niveau de la mer d'autant, et s'est traduit par un recul exacerbé de la falaise (jusqu'à 10 fois supérieur au recul moyen sur cette portion de côte ; Pierre, 2008). Cette situation artificielle permet d'imaginer les effets de la hausse prévue du niveau de la mer (dans un secteur structuralement favorable au recul, puisqu'à cet endroit de la falaise l'affleurement du banc gréseux sommital résistant s'interrompt). Cependant, le long des falaises du Boulonnais, en dehors des secteurs anthropisés tels que le cran Poulet, le rôle érosif de la mer est généralement indirect et se limite au déblaiement des débris livrés par la paroi.

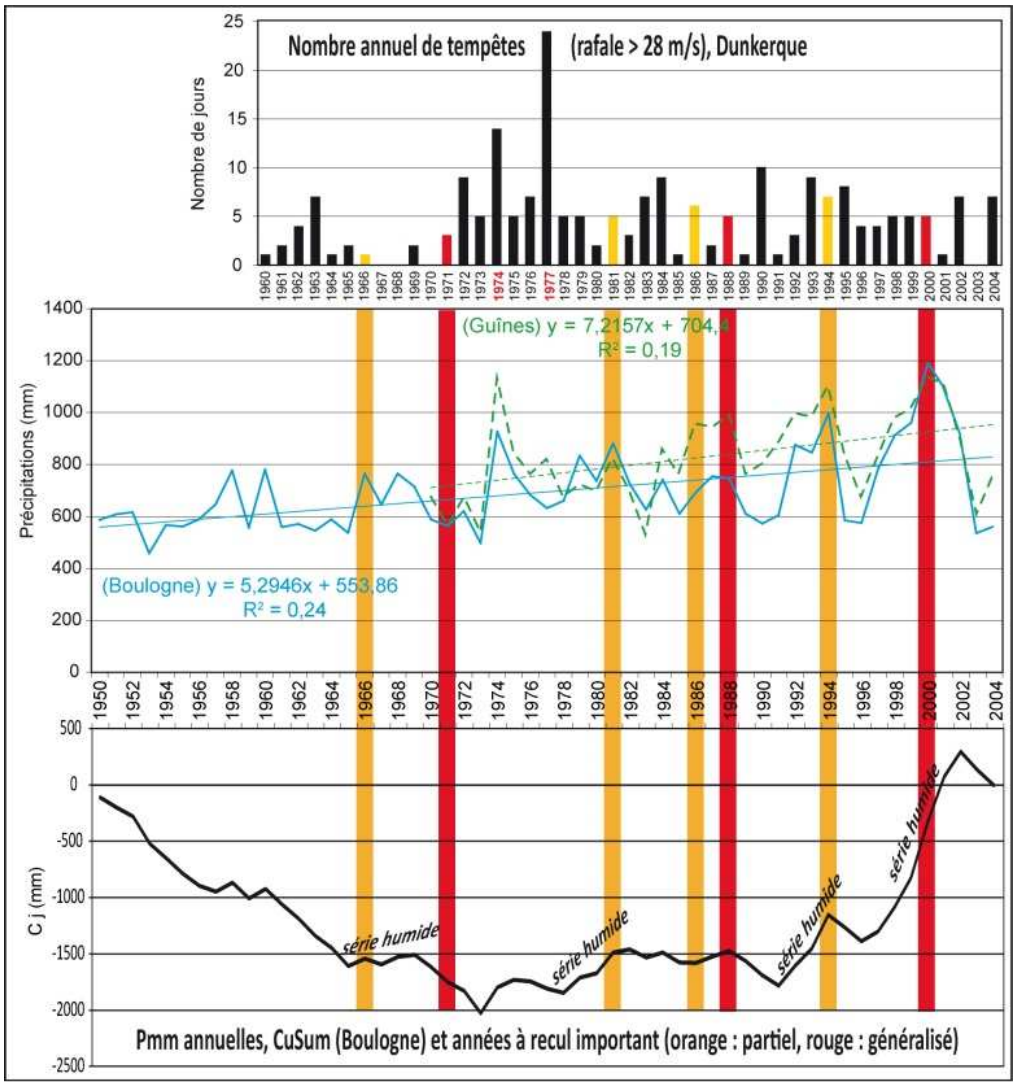



*Figure 3. Tempêtes, précipitations et phases de recul des falaises du Boulonnais (d'après Pierre et Lahousse, 2006, modifié)*

De fait, **les phases de recul important du trait de côte ne coïncident pas avec la période de plus forte occurrence de tempêtes** observée dans les années 1970 (Figure 3). Si l'on regarde du côté des processus continentaux, l'influence des précipitations sur la stabilité des falaises est plus probante, mais pas univoque : ainsi, en 1971, année plutôt sèche, il se produit un recul généralisé du trait de côte, tandis qu'en 1974, année plutôt humide, il ne se passe rien. En découpant la série statistique des précipitations en périodes homogènes humides ou sèches, on constate cependant que la deuxième moitié du 20ème siècle, où les séries humides dominent, connait le plus de phases de recul, et on constate en outre que l'anomalie de 1971 demeure (Figure 3). Ce dernier point signifie que la réponse de l'érosion aux intempéries peut garder un caractère aléatoire : l'instabilité des falaises s'explique alors par le résultat du cumul, sur la durée, de processus insidieux. À l'inverse, depuis l'épisode de recul des falaises qui s'est produit en 2000, il n'y a plus eu d'épisodes de recul majeurs. En 2000, le recul a été tel que la falaise a retrouvé une stabilité durable que les processus continentaux n'ont pas encore remise en cause.

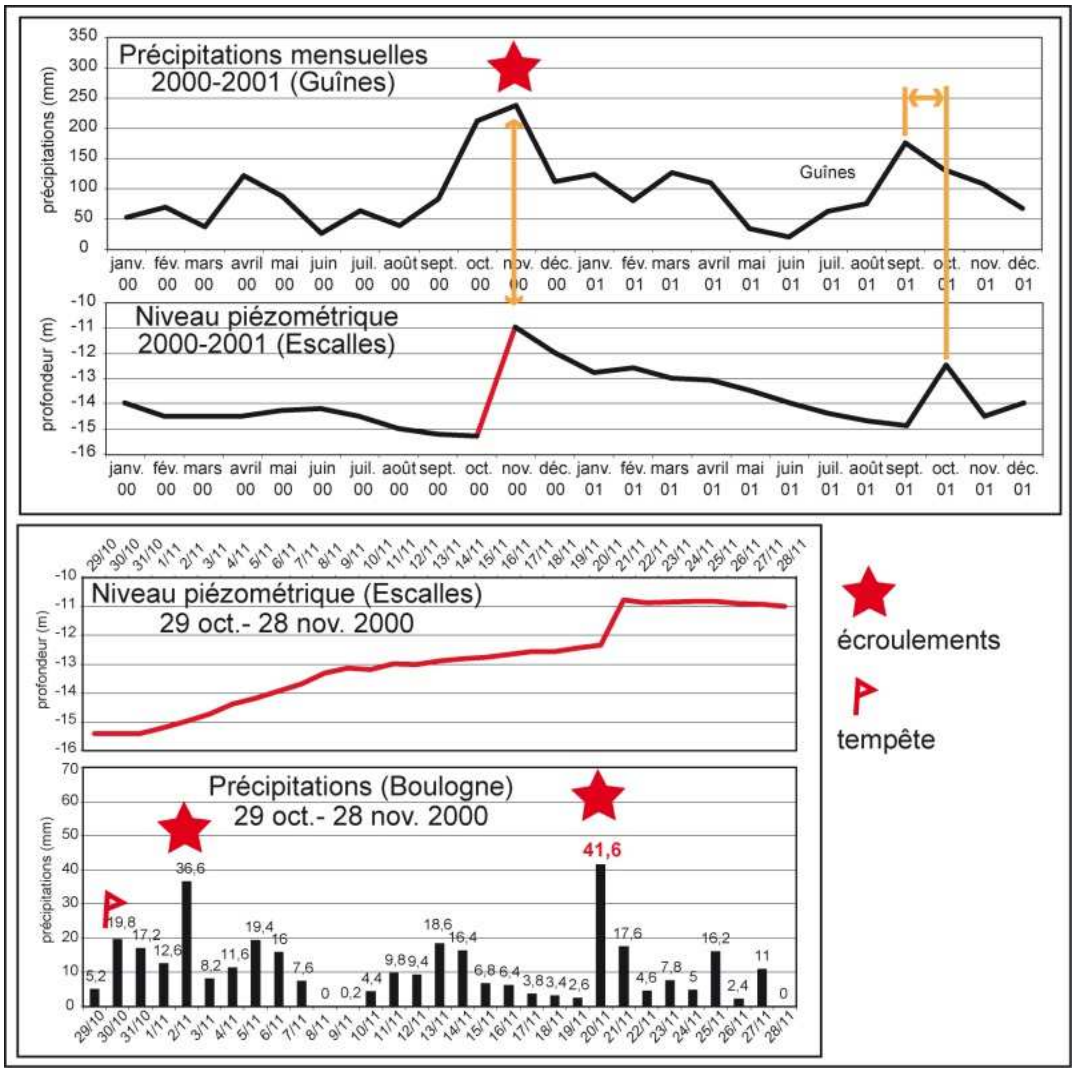



*Figure 4. Précipitations, piézométrie et écroulements (Cap Blanc-Nez, Boulonnais ; d'après Pierre et Lahousse, 2006, modifié).*

L'épisode érosif de l'année 2000 permet, dans le secteur crayeux, d'isoler le rôle du fonctionnement de l'aquifère sur la stabilité de la falaise. Il apparaît que c'est moins le niveau du toit de la nappe qui est instructif (ce niveau est d'ailleurs bien souvent à une altitude plus basse que le pied de la falaise), que l'état de la zone non saturée de l'aquifère, dont la teneur élevée en eau, en 2000, est révélée par un effet piston se traduisant par une réponse immédiate du niveau piézométrique aux précipitations. L'année suivante, en 2001, le total des précipitations précédant l'automne est du même ordre qu'en 2000, mais la réponse de la nappe est différée d'un mois (Figure 4). La saturation de la craie en eau résulte donc plus du rythme soutenu des précipitations, multipliant les vagues d'infiltration, que d'un cumul annuel élevé des précipitations. Cet excès d'eau fragilise particulièrement la craie blanche, la plus poreuse. À saturation, son poids augmente de 61 %, entrainant son éclatement et son écroulement, une première fois le 2 novembre, puis le 20 novembre 2000. La violente tempête qui a frappé le secteur le 30 octobre 2000 (vent de 38 m/s) à marée haute (coefficient 91) ne semble donc pas devoir être mise en cause dans l'instabilité et le recul des falaises.

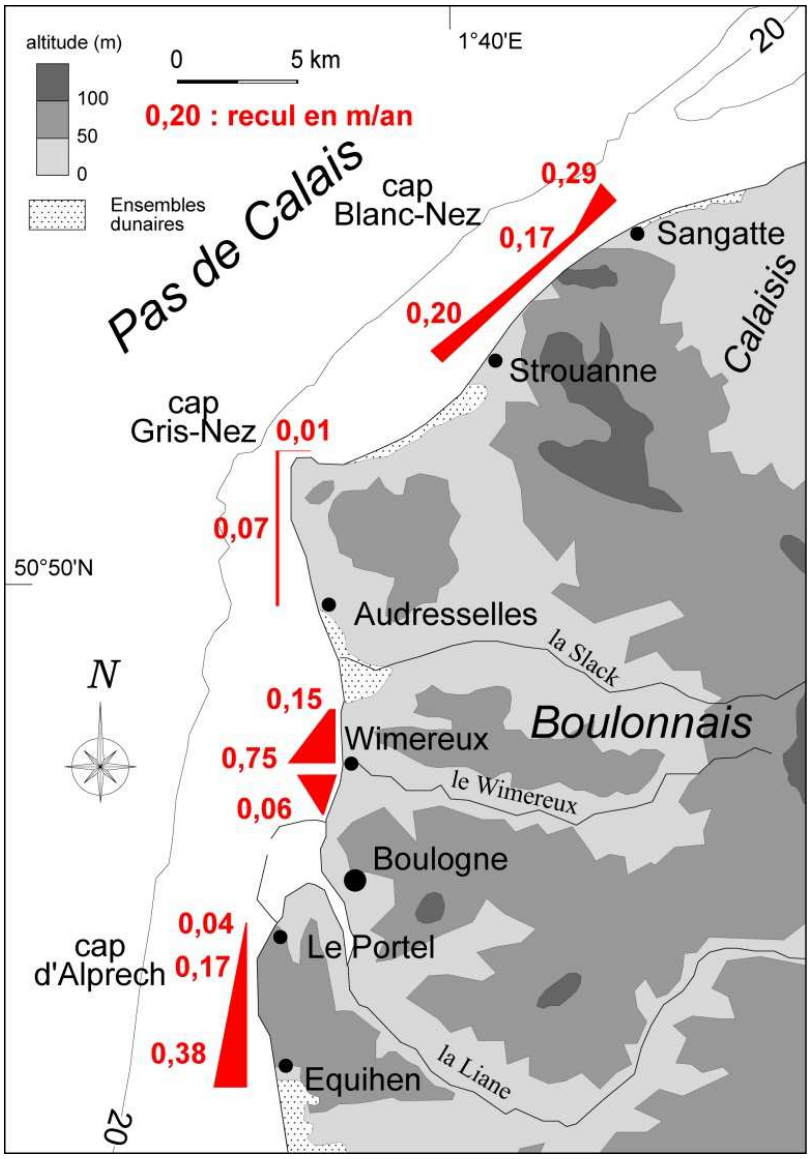



*Figure 5. Taux de recul annuel moyen des falaises du Boulonnais.*

Au total, la structure conditionne largement, dans le Boulonnais, l'efficacité respective des processus continentaux et des processus marins, conduisant à des taux de recul très variables sur une période de 70 ans (Figure 5). Le très fort taux de recul observé à Wimereux résume parfaitement la multiplicité et l'addition des causes de recul : le rythme de recul s'est significativement accéléré en hiver 2000-2001, à cause des précipitations, comme au Cap Blanc-Nez, bien que selon des modalités différentes : le recul se fait ici par glissements de pans et coulées (Figure 6), à un endroit qui ne présentait d'ailleurs aucun désordre il y a un siècle. Cela dit, le rôle croissant des processus marins, corrélatif de l'abaissement du niveau de la plage lié à l'anthropisation (les digues du port de Boulogne interrompent le transit sédimentaire, notamment) a sans doute contribué au recul en accélérant le déblaiement en pied de falaise, ce qui laisse imaginer les effets d'une élévation du niveau de la mer dans un contexte de réchauffement climatique.



*Figure* 6. La falaise nord de Wimereux en 2007 (source : Woodwalker, Wikimedia Commons).

Les falaises du Boulonnais sont à nouveau vives depuis environ 2 000 ans (Pierre, 2007) alors que le niveau de la mer atteignait son niveau actuel à la fin de la transgression postglaciaire. Sur ce laps de temps, les taux moyens de recul historique devraient être extrapolables, donnant des distances de recul de l'ordre de 300 m dans la craie, et de 20 m dans les grès, soit des valeurs peu élevées si on les rapporte aux prescriptions du Plan de Prévention des Risques falaises du Boulonnais qui s'intéresse au devenir d'une bande de 100 m sur une durée de 100 ans. D'autre part, à en juger par le scénario historique, les falaises reculent à un rythme grosso modo corrélable avec les rythmes pluviométriques, et montrent en outre une sensibilité au niveau d'eau à leur pied. L'évolution future des deux paramètres précipitations et cote marine, dans le cadre d'un réchauffement climatique, doit donc être prise en compte dans une réévaluation à la fois de la distance et du rythme de recul des falaises du Boulonnais.

### Références bibliographiques


Briquet A., 1930. *Le littoral du Nord de la France et son évolution morphologique*. Armand Colin, Paris, 349 pp.

Morneau F. (coord.), 2008. *Étude de la sensibilité des côtes et de la vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques*. Synthèse des résultats. Ouranos

Pierre G., 2007. Durée de l'évolution marine et recul holocène d'un littoral à falaise, l'exemple du nord Boulonnais (France). *Quaternaire*, 3, p. 219–231.

Pierre G., 2008. Artificialisation du trait de côte et dynamique des falaises argilo-gréseuses du bas-Boulonnais (France). *Annales de la Société Géologique du Nord*, 15, p. 47–52.

Pierre G., Bernatchez P., 2009. *Vulnérabilité à l'érosion côtière et à la submersion des étangs aérés du secteur de Fatima (Îles-de-la-Madeleine). Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski*. Rapport de recherche remis à la municipalité des Îles-de-la-Madeleine, 24 pp.

Pierre G., Lahousse P., 2006. The role of groundwater in cliff instability : an example at Cape Blanc-Nez (Pas-de-Calais, France). *Earth Surface Processes and Landforms*, 31, p. 31–45.

# Solutions de gestion du littoral du Nord-Pas de Calais face au changement climatique

Arnaud HEQUETTE

Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences
Université du Littoral Côte d'Opale

L'objectif de cette communication est de présenter des solutions possibles de gestion du littoral du Nord-Pas de Calais face au changement climatique en se basant sur les problèmes spécifiques qui se posent le long de cette côte ainsi qu'au regard de son évolution récente. Les stratégies qui ont été adoptées dans des pays voisins pour faire face au changement climatique dans la zone côtière seront également examinées.

Plusieurs questions se posent concernant les impacts possibles du changement climatique sur les littoraux qui peuvent être difficiles de prévoir en raison notamment de marges d'incertitudes liées aux différents scénarios d'émission de gaz à effets de serre et à leurs conséquences sur les phénomènes atmosphériques et océanographiques. De nombreuses incertitudes demeurent en ce qui concerne l'impact possible du changement climatique sur l'évolution future du régime des vents, par exemple, alors que des modifications, même légères, dans les fréquences, les vitesses ou les directions des vents peuvent avoir des répercussions majeures sur plusieurs phénomènes agissant sur les côtes. Des variations dans le régime des vents peuvent ainsi avoir des effets notables sur l'énergie de la houle à la côte ou encore sur les surcotes qui détermineront les hauteurs d'eau maximum qui pourront être atteintes lors des tempêtes.

## Les dynamiques d'évolution des côtes du Nord-Pas de Calais ?

Une des conséquences du changement climatique est l'élévation du niveau de la mer que l'on observe déjà depuis plusieurs décennies. Les enregistrements des marégraphes (Church et White, 2011), mais aussi les mesures réalisées par altimétrie satellitaire (Rahmstorf et al., 2012), montrent que les rythmes d'élévations du niveau de la mer ont augmenté pendant les dernières décennies, le niveau global des océans étant supérieur à 3 mm/an depuis le début des années 1990, ce qui est supérieur à ce qui avait été projeté pour le début du 21$^{ème}$ siècle dans de précédents rapports du GIEC. La question de la hausse future du niveau de la mer dans les zones côtières est encore plus complexe à prévoir du fait que le niveau marin ne s'élève pas au même rythme partout. Les enregistrements marégraphiques réalisés sur les côtes de la Manche et de la mer du Nord depuis la fin du 19$^{ème}$ siècle montrent en effet que les rythmes de variation du niveau marin ne sont pas uniformes dans l'espace (Tab. 1). S'ils montrent qu'à l'échelle de ces territoires côtiers les rythmes d'élévation du niveau marin sont plus élevés pendant les périodes les plus récentes, tout comme le rythme d'élévation globale des océans, ils révèlent également que le niveau « local » (ou relatif) de la mer a augmenté plus rapidement sur les côtes de la mer du Nord qu'en Manche, atteignant des rythmes de l'ordre de 4 mm/an ou plus entre 1993 et 2009 (Wahl et al., 2013).

| | 1880-2009 | 1900-2009 | 1950-2009 | 1980-2009 | 1993-2009 |
|---|---|---|---|---|---|
| **Global** | 1.54 ± 0.06 | 1.63 ± 0.07 | 1.80 ± 0.11 | 2.09 ± 0.31 | 2.80 ± 0.47 |
| **Manche** | 1.19 ± 0.12 | 1.19 ± 0.15 | 1.19 ± 0.26 | 1.28 ± 0.60 | 1.32 ± 1.11 |
| **Mer du Nord** | 1.53 ± 0.08 | 1.54 ± 0.11 | 1.62 ± 0.29 | 2.07 ± 0.74 | 4.00 ± 1.53 |
| **Mer du Nord intérieure** | 1.59 ± 0.09 | 1.60 ± 0.11 | 1.71 ± 0.31 | 2.23 ± 0.84 | 4.59 ± 1.82 |

*Tableau 1 : Rythmes d'élévation du niveau de la mer pendant différentes périodes depuis la fin du 19ème siècle (d'après Wahl et al., 2013). Les valeurs des variations du niveau global de l'océan proviennent de la synthèse de Church et White (2011)*

L'élévation future du niveau de la mer aura vraisemblablement comme conséquence d'augmenter la fréquence des phénomènes d'érosion le long des littoraux, mais aussi de submersion des zones côtières. Dans une étude récente, Neumann et al. (2015) ont évalué le nombre de personnes vivant dans des zones côtières basses pouvant potentiellement subir des submersions marines. En prenant en compte des scénarios d'évaluation future du niveau de la mer, mais également différents scénarios de croissance démographique, ces auteurs ont estimé le nombre de personnes qui vivront dans ces zones basses en 2030 et en 2060 dans les différents continents (Figure 1). A l'échelle mondiale, la population vivant dans les zones côtières basses était d'environ 625 millions en l'an 2000 et pourrait passer à plus de 1 milliard d'individus d'ici 2060, l'essentiel de ces populations résidant en Asie. En Europe, on compte environ 50 millions de personnes dans ces zones à risques, ce nombre ne devant toutefois augmenter que faiblement dans les prochaines décennies en raison de faibles taux de croissance démographique.

Plusieurs pays ont adopté des stratégies d'adaptation aux impacts du changement climatique sur leur littoral. C'est notamment le cas de la Belgique et des Pays-Bas où le littoral est en grande partie constitué de plages sableuses et de dunes côtières tout comme celui du Nord de la France. La Belgique a adopté ce qui est appelé le « Master Plan » qui prévoit différentes mesures de protection pour pouvoir faire face à des tempêtes ayant des périodes de retour de 1000 et de 4000 ans (Mertens et al., 2009). Plusieurs options sont envisagées en fonction du type de milieu devant être protégé (front de mer urbanisé, milieux naturels comme les dunes côtières, ports,...). Si des renforcements d'ouvrages comme des digues ou la construction de brise-lames flottants sont prévus, des solutions « douces » sont également envisagées qui consistent en rechargement de plages, en plantation de plantes fixatrices comme l'oyat dans les dunes ou en la mise en place de brise-vents. Un recul planifié est également envisagé dans certains secteurs, tout dépendant des enjeux.

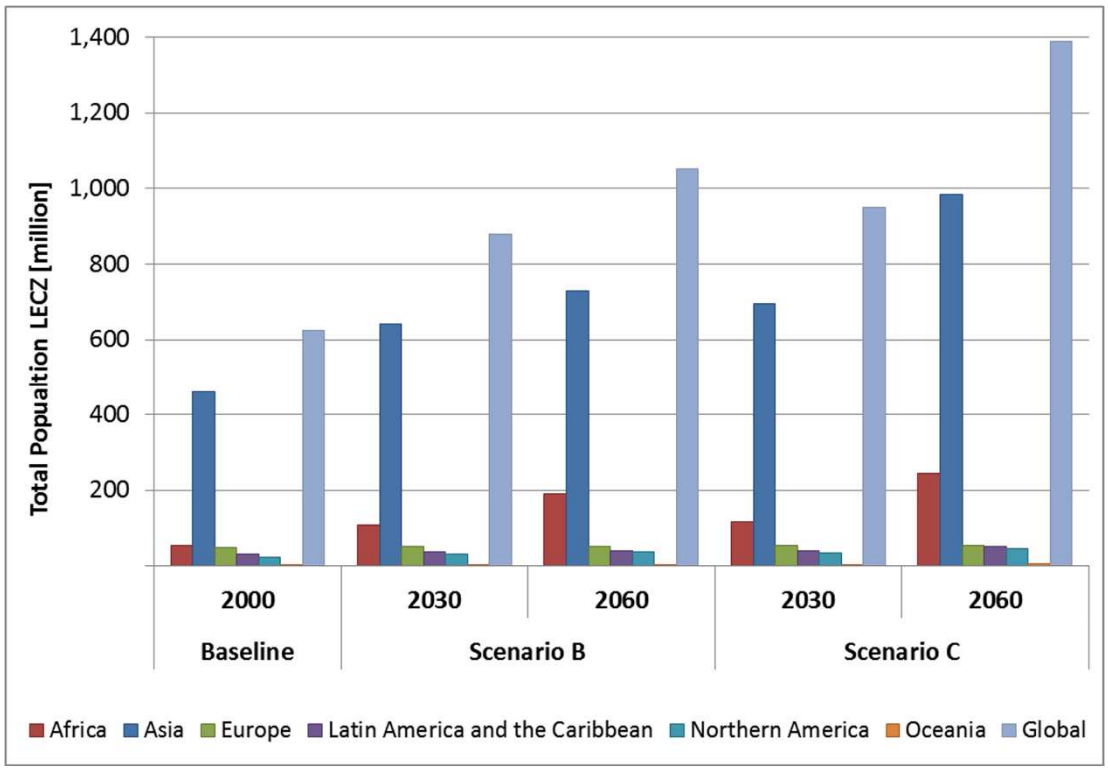



*Figure* 1 : Evaluation de la population mondiale vivant dans des zones côtière basses et prévisions en 2030 et 2060 en fonction de différents scénarios de croissance démographique (Neumann et al. 2015)

Aux Pays Bas, où une grande partie du pays est située sous le niveau de la mer et où les dunes côtières jouent un rôle primordial pour protéger la zone côtière de submersions marines, une stratégie depuis des années a été d'empêcher la côte de reculer en apportant du sable sur les plages ou sur l'avant-plage. Récemment, un énorme projet d'alimentation artificielle de plage, appelé le « Sand Motor », a été réalisé à Monster, au sud-ouest de La Haye, où 21 millions de m3 de sable ont été déposés en 2011 formant une avancée du littoral. L'objectif de ce rechargement est de laisser les vagues et les courants reprendre ce sable afin de le transporter le long de la côte pour réalimenter les plages adjacentes.

Depuis le début des années 1990, l'alimentation artificielle des plages aux Pays-Bas est en constante augmentation, le volume annuel des rechargements étant de l'ordre de 12 millions de m3 par an pour l'ensemble des plages des Pays Bas depuis 2000 (Van der Meulen et Van Zetten, 2014). Comme le montre la Figure 2, ce sont surtout les rechargements de l'avant-plage qui ont augmenté pendant ces années, une alimentation artificielle devant la plage présentant l'avantage de répondre au même objectif mais à moindre coût. Une conséquence extrêmement positive de ces rechargements est qu'environ 26% du volume de sable rechargé s'accumule, sous l'action du vent, dans les dunes côtières (Arens et al., 2010) comme le montrent les suivis topographiques réguliers réalisés dans les dunes entre 1993 et 2008 (Figure 3), ce qui contribue à les exhausser et ainsi à les renforcer contre les attaques de la mer.

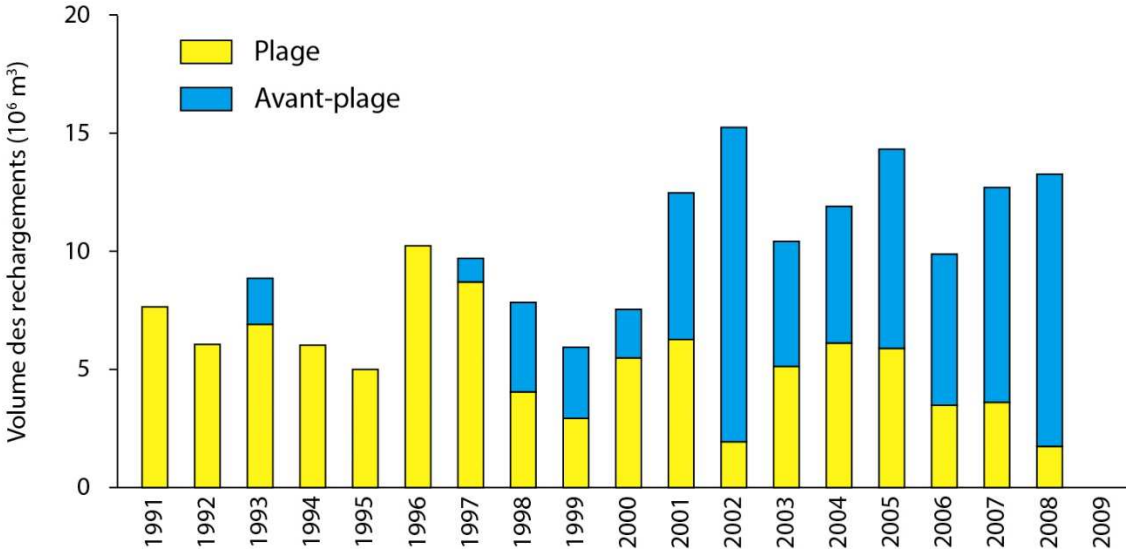



*Figure 2 : Volume annuel des rechargements de plage sur le littoral des Pays-Bas (modifié d'après Van der Meulen et Van Zetten, 2014)*

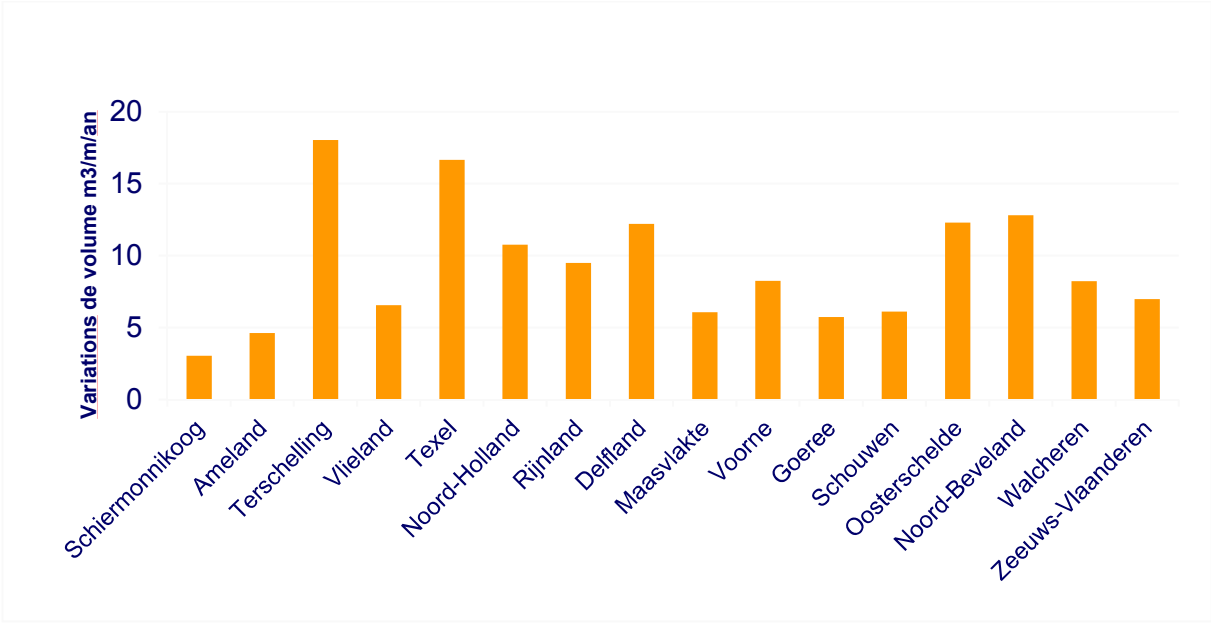



*Figure 3 : Bilan sédimentaire des dunes côtières aux Pays-Bas entre 1999 et 2008 (d'après Arens et al., 2010).*

Quelle est la situation en Nord - Pas de Calais ? Si l'on examine les littoraux de la région qui ne sont pas (ou peu) anthropisés, il s'agit essentiellement de plages, de dunes ou d'estuaires qui sont des littoraux bas forcément très sensibles face à une recrudescence possible de l'érosion et des submersions marines qui pourrait être engendrée par le changement climatique. Certains secteurs côtiers sont extrêmement vulnérables dans la plaine maritime flamande de Calais jusqu'à la frontière belge où la zone côtière correspond à des polders. Ces terres gagnées sur la mer sont situées à des altitudes très basses, parfois même sous le niveau moyen de la mer à certains endroits. Les dunes côtières sont alors bien souvent le seul rempart contre la mer.

Des travaux ont été réalisées afin d'évaluer les risques d'érosion et de submersion marine le long du littoral du Nord-Pas de Calais à partir de mesures topographiques réalisées par LiDAR[1] aéroporté et en se basant sur des statistiques de hauts niveaux d'eau ayant des périodes de retour de 10 ans, 50 ans et 100 ans auxquels a été rajoutée la surélévation du niveau d'eau à la côte due à l'action des vagues lors de conditions de tempêtes (Crapoulet, Héquette et al., soumis pour publication). Trois types de situation peuvent se présenter : soit le niveau d'eau n'atteint pas la base de la dune et l'érosion ne peut se produire que dans la zone intertidale (régime de swash), soit le pied de dune est atteint et une érosion des dunes côtières se produit (régime de collision), soit la crête de la dune est atteinte et un franchissement du cordon bordier peut se produire (régime de submersion) (Figure 4).

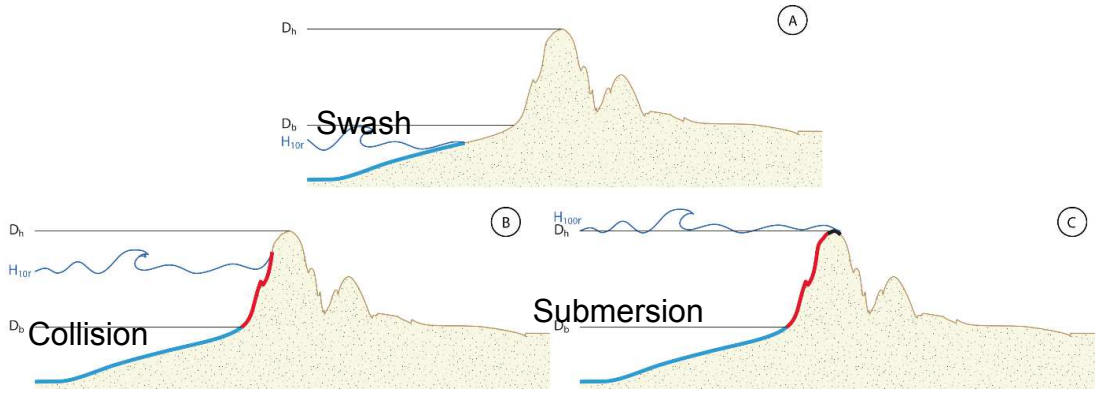



*Figure 4 : Illustration des différents régimes d'érosion ou de submersion sur un littoral dunaire (Crapoulet, 2015, adapté d'après Sallenger, 2000)*

La Figure 5 présente un exemple de modèle numérique de terrain réalisé à partir de données LiDAR aéroporté représentant la topographie de la rive nord de la baie d'Authie en décembre 2013. Avec un haut niveau d'eau ayant une période de retour de 100 ans, de l'érosion (collision) se produirait partout le long de ce littoral et un franchissement des dunes par les vagues pourrait se produire dans le secteur appelé « Bois de Sapins » où une brèche est présente dans les dunes côtières. Si l'on prend en compte une élévation « modérée » du niveau marin à l'horizon 2050 basée sur le scénario RCP6.0 du 5ème rapport du GIEC (IPCC, 2013), la submersion marine serait encore plus importante lors de mêmes conditions de tempête en raison d'une hausse d'environ 30 cm du niveau de la mer par rapport au niveau actuel (H100re 2050) (Figure 6). Il est cependant beaucoup plus vraisemblable que des submersions marines se produiront bien avant 2050 dans ce secteur, car le trait de côte y recule de plusieurs mètres par année et la largeur des dunes côtières n'était déjà plus que de 20 m par endroits en 2013 (Figure 6).

[1] Le LIDAR topographique (acronyme de l'expression « light detection and ranging ») est une technologie qui repose sur le principe de la télémétrie permettant de mesurer de façon précise l'altitude du sol à partir d'un vecteur aérien comme un avion ou un hélicoptère. Connaissant la vitesse de la lumière, la distance entre l'appareil et le sol est donnée par la mesure du délai entre l'émission d'une impulsion et la détection d'une impulsion réfléchie.

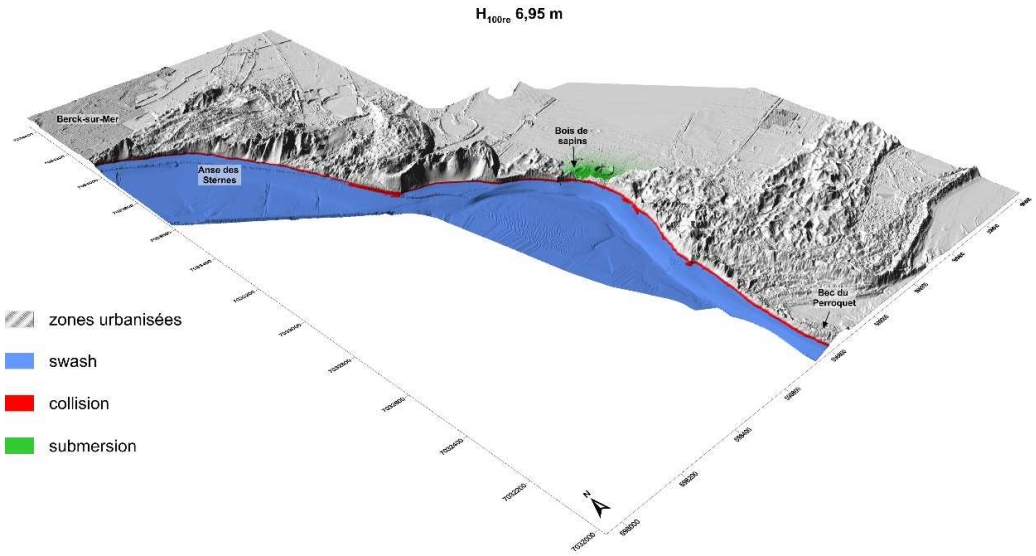



*Figure 5 : Modèle numérique de terrain illustrant les différents types d'érosion et de submersion qui pourraient se produire sur la rive nord de la baie d'Authie avec un haut niveau d'eau de période de retour de 100 ans (Crapoulet, 2015).*

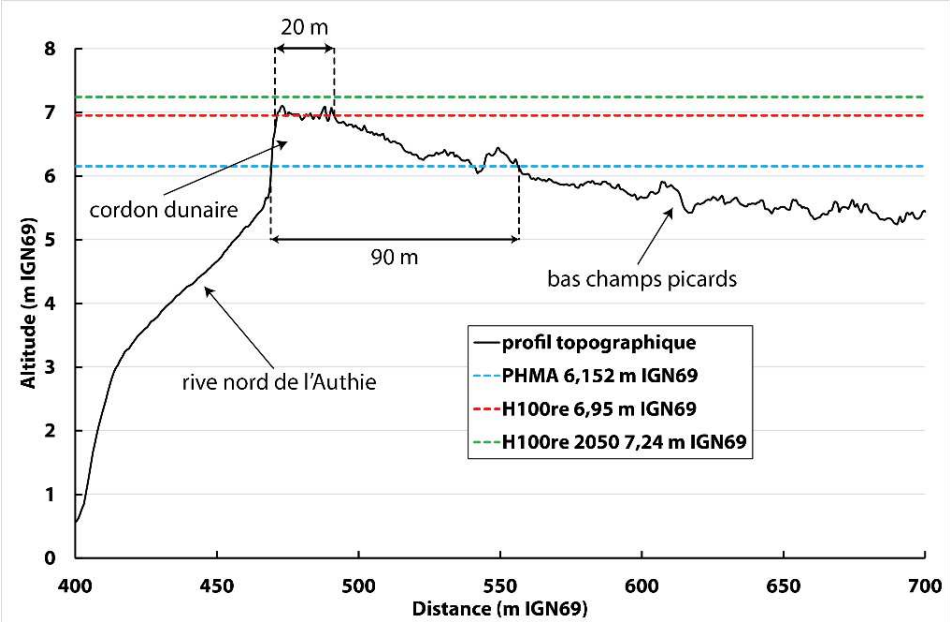



*Figure 6 : Profil topographique du secteur du « Bois de Sapins » sur la rive nord de la baie d'Authie réalisé à partir de données LiDAR acquises en décembre 2013 (Crapoulet, 2015). Le PHMA correspond au niveau des plus hautes mers astronomiques, H100re correspond à un haut niveau de tempête avec une période de retour de 100 ans, et H100re 2050 correspond à un haut niveau d'eau avec une période de retour de 100 ans en 2050 avec la hausse du niveau de la mer du scénario RCP6.0 du dernier rapport du GIEC (IPCC, 2013).*

Un autre exemple emblématique dans la région est celui de la baie de Wissant dont le trait de côte a reculé d'environ 250 m dans sa partie centrale entre 1950 et 2000, cette importante érosion du littoral étant principalement liée à un déficit sédimentaire à l'échelle de la baie (Aernouts et Héquette, 2006). Entre 2008 et 2014, plusieurs levées LIDAR ont été réalisées, permettant de retracer l'évolution du trait de côte dans la baie. Ces mesures ont révélé que plusieurs secteurs de la baie qui avaient connu une forte érosion pendant les dernières décennies ont continué à reculer à des rythmes élevés pendant les dernières années (Figure 7).

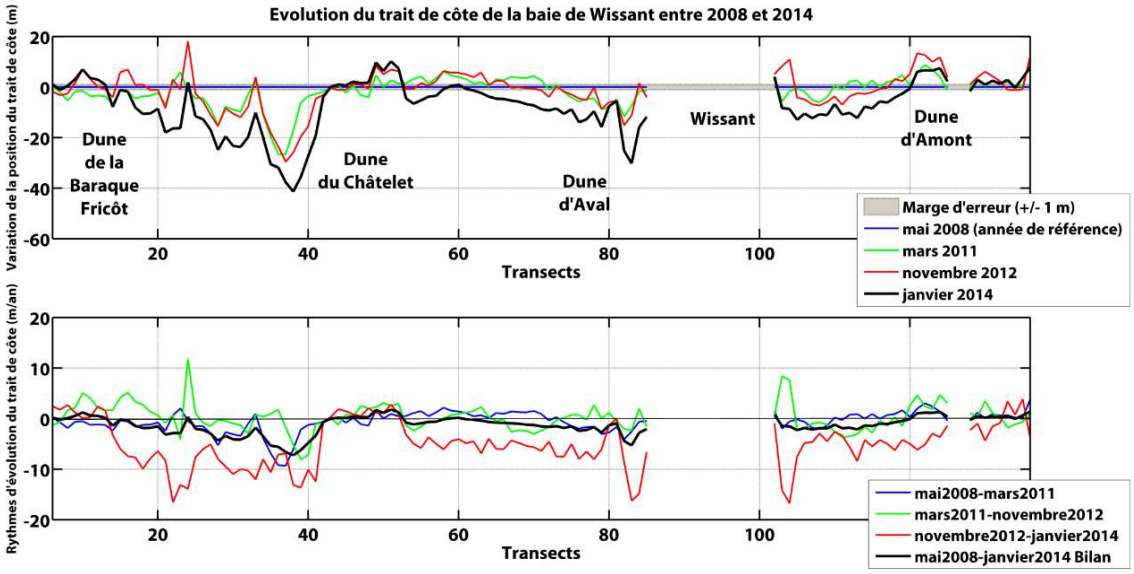



*Figure 7 : Evolution du trait de côte de la baie de Wissant entre mai 2008 et janvier 2014 (d'après Crapoulet, Héquette et al., sous presse).*

La fin de l'année 2013 a été marquée par une série de tempêtes lors desquelles de hauts niveaux d'eau ont été enregistrés par les marégraphes de la région, et ce tout particulièrement lors de la tempête Xaver lors de laquelle un niveau d'eau supérieur au niveau extrême de période de retour de 100 ans a été enregistré à Calais pendant la nuit du 5 au 6 décembre (Daubord, 2014). La Figure 7 montre de façon claire que c'est surtout entre novembre 2012 et janvier 2014 que les rythmes de recul du trait de côte ont été les plus élevés, ce qui est vraisemblablement dû aux impacts des tempêtes de la fin 2013. Il est toutefois intéressant de constater que le trait de côte est resté relativement stable à plusieurs endroits malgré l'action de ces tempêtes et que dans certains secteurs qui ont connu de l'érosion entre 2012 et 2014, le trait de côte est finalement revenu sensiblement au même niveau qu'auparavant.

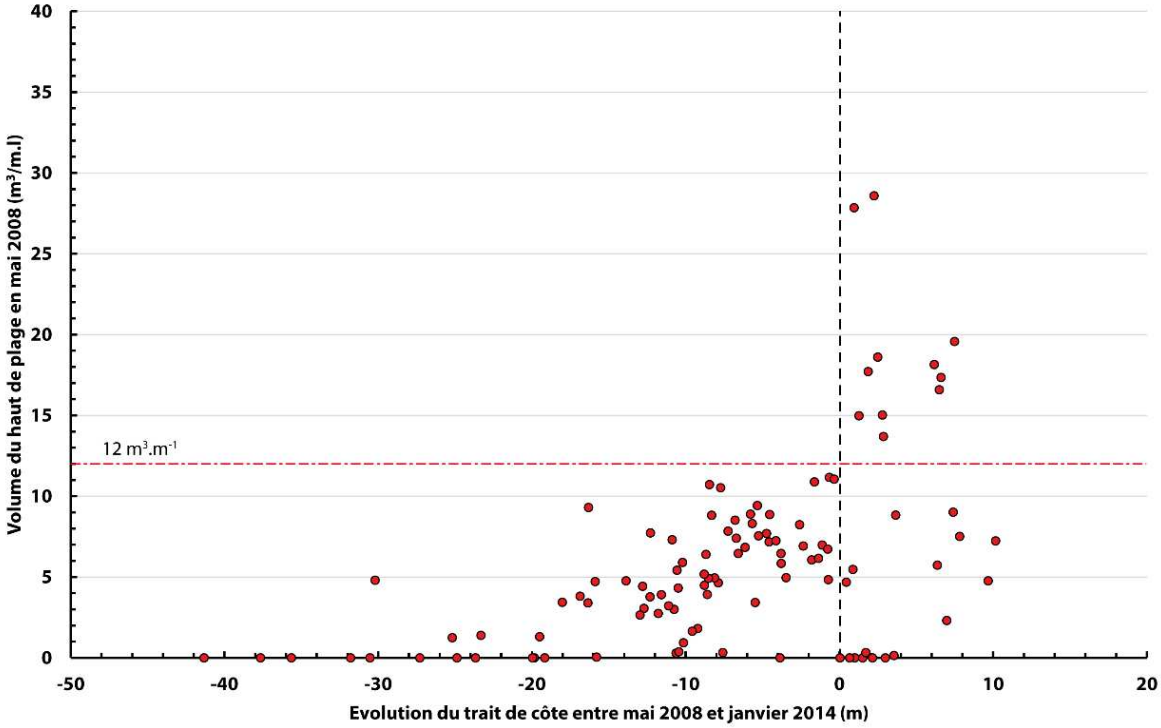



*Figure 8 : Relation entre l'évolution du trait de côte en baie de Wissant entre mai 2008 et janvier 2014 et le volume initial du haut de plage par mètre linéaire de côte ($m^3$/m.l.). Le haut de plage est considéré ici comme la zone comprise entre le niveau des pleines mers moyennes et le trait de côte qui correspond en règle général à la base des dunes côtières (Crapoulet, Héquette et al., sous presse).*

Outre la cartographie de l'évolution du trait de côte, les levés topographiques LIDAR permettent également calculer des volumes. La Figure 8 montre la relation entre l'évolution du trait de côte mesurée au niveau de radiales espacées de 50 m tout le long de ce littoral et le volume du haut de plage par mètre linéaire de côte mesuré au niveau de chaque radiale. Si la majorité des points de mesures correspond à un recul du trait de côte (valeurs négatives), plusieurs points correspondent à une stabilité ou même à une avancée du trait de côte (valeurs positives) qui peut être due au développement de dunes éoliennes sur le haut de plage. Les plus forts reculs du trait de côte, pouvant atteindre ou dépasser -20 ou même -30 m entre 2008 et 2014, se sont produits là où le volume du haut de plage en 2008 était très faible ou était inexistant à marée haute. Lorsque le volume du haut de plage est supérieur à environ 5 m3/m.l, le trait de côte peut être stable, mais il peut aussi reculer ou même avancer. Au-delà d'une valeur d'environ 12 m3/m.l, cependant, on n'observe plus de recul, mais seulement une stabilité ou une avancée de la ligne de rivage (Figure 8). Ces résultats suggèrent qu'il existe un seuil en termes de volume de sable sur la haut de plage à partir duquel le littoral ne reculerait pas même sous l'action de tempêtes comme celles qui se sont produites à la fin de l'année 2013.

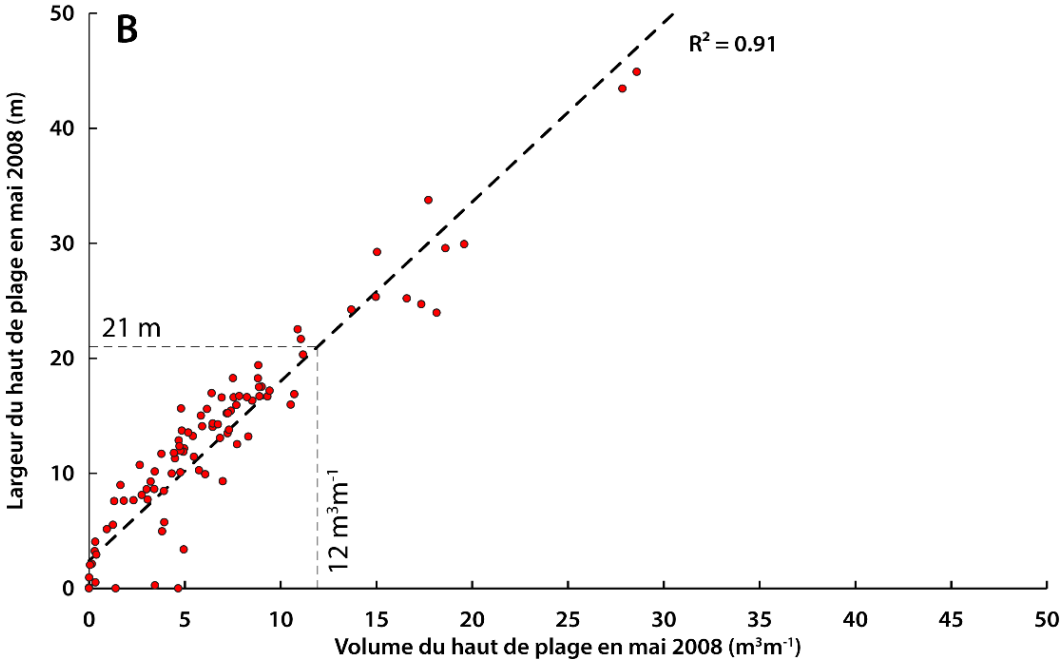



*Figure 9 : Relation entre le volume et la largeur du haut de plage mesurés en mai 2008 en baie de Wissant entre mai 2008 et janvier 2014 Crapoulet, Héquette et al., sous presse).*

Le volume de sédiment sur le haut de plage est fortement corrélé avec la largeur du haut de plage et un volume de 12 m3 par mètre linéaire correspond à un haut de plage d'environ 21 m de largeur (Figure 9). Ceci signifie qu'il serait suffisant de conserver une largeur de haut de plage d'une vingtaine de mètres à partir de la limite des pleines mers moyennes pour que ce littoral puisse résister à des tempêtes de forte intensité. Ces valeurs ne s'appliquent bien évidemment qu'au littoral de la baie de Wissant où elles ont été obtenues, mais des analyses similaires menées sur d'autres sites de la Côte d'Opale connaissant des phénomènes d'érosion ont permis de mettre en évidence de tels seuils à partir desquels le trait de côte ne semble plus connaître de recul (Crapoulet, 2015).

### Quelles solutions de gestion du littoral pour le Nord-Pas de Calais ?

Ces constats étant faits, que peut-on envisager pour l'avenir pour faire face aux effets du changement climatique sur le littoral du Nord-Pas de Calais ? Des choix sont à faire entre des solutions visant à fixer la ligne de rivage à l'aide d'ouvrages lourds ou des solutions plus souples. Faut-il construire de nouvelles digues, rehausser les digues existantes ? Ces aménagements ont pour vocation de protéger ce qui se trouve à l'arrière des ouvrages, mais ils ne sont pas faits pour préserver les plages. C'est en fait plutôt le contraire qui se produit au niveau des plages qui ont tendance à diminuer à l'avant des ouvrages.

Le recul stratégique est une autre option possible. Le recul se pratique en fait depuis longtemps là où l'on ne peut plus résister aux assauts de la mer, mais un recul n'est pas facilement applicable partout. C'est le cas notamment le long de littoraux urbanisés où l'importance des enjeux est telle que cette solution est souvent inenvisageable.

Le rechargement des plages est, comme on l'a vu précédemment, une pratique courante dans plusieurs pays. Bien que ce type de pratique soit nettement moins commun en France, il en existe néanmoins plusieurs exemples récents, comme à Dunkerque où un rechargement d'environ 1,5 million de mètres cubes de sable a été complété en début d'année 2014 pour conforter la Digue des Alliés (Figure 10).




*Figure 10 : La plage de la Digue des Alliés avant et après un rechargement de 1,5 millions de m³ de sable (clichés : A. Cartier, GEODUNES).*

Si l'on examine le bilan de ce type de solution dans les pays qui la pratiquent depuis des années, on peut constater que **l'alimentation artificielle des plages** possède plusieurs avantages. La reconstitution d'un stock de sable suffisant, notamment sur le haut de plage, peut permettre de limiter le recul du trait de côte, comme le montre l'exemple de l'évolution du littoral de la baie de Wissant. Les rechargements induisent un élargissement des plages, ce qui peut favoriser les activités récréatives et avoir ainsi des impacts touristiques. L'alimentation artificielle des plages a en outre peu d'impact environnemental et a également l'avantage de pouvoir accompagner la hausse au niveau de la mer, car des rechargements répétés peuvent permettre d'exhausser le niveau de la plage avec l'élévation du niveau marin.

Reste la question de la source du sable pouvant être utilisé pour réalimenter les plages. Des stocks de granulats de taille adéquate doivent être disponibles à proximité afin de limiter les coûts de transport. De fait, des ressources granulaires importantes existent au large des côtes du Nord-Pas de Calais, notamment au niveau de bancs sableux (Figure 11).

Ces méthodes douces de rechargement de plages peuvent être accompagnées par d'autres mesures afin de maintenir une partie du sable sur place, car l'un des inconvénients de l'alimentation artificielle des plages est qu'il est nécessaire de répéter ces opérations en raison d'un départ du sable au fil du temps. Des mesures peuvent être prises pour essayer de limiter ces départs de sable en favorisant le dépôt du sable transporté par le vent. On peut par exemple avoir recours à la mise en place de fascines ou de ganivelles sur le haut de plage, ce qui conduit au **piégeage des sables transportés par le vent** depuis la plage et résulte en un exhaussement du niveau du haut de plage, voire au développement de dunes (Figure 12). Ces accumulations éoliennes constituent des bourrelets de protection qui contribuent à protéger le littoral des attaques des vagues lors des tempêtes.

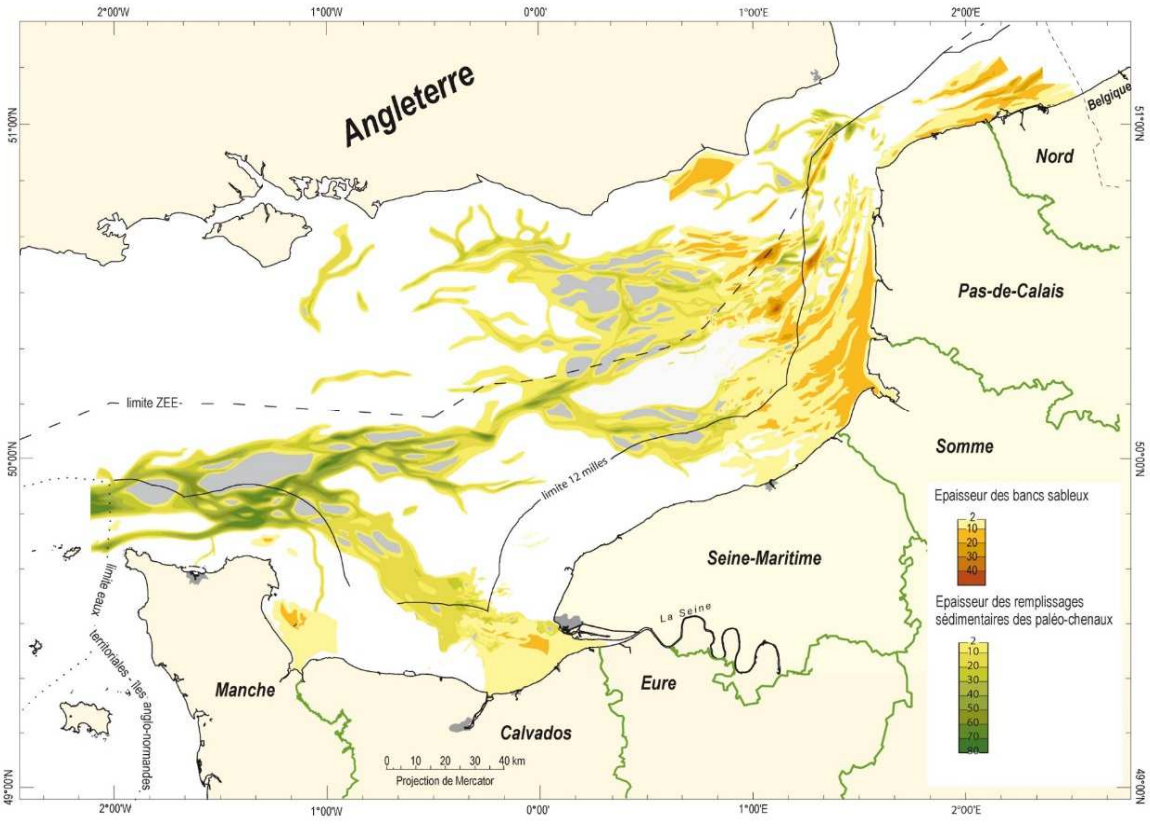



*Figure 11 : Ressources en matériaux marins identifiés en Manche orientale (Augris et Simplet, 2013).*

Tapez une équation ici.




*Figure 12 : Ganivelles sur le haut de plage du Clipon, Dunkerque (Source : Tresca et Ruz, 2014). Notez l'accumulation sableuse qui a conduit à l'enfouissement quasi-total des ganivelles entre juillet 2010 et août 2011.*

## Références bibliographiques


Aernouts, D., Héquette, A., 2006. L'évolution du rivage et des petits fonds en Baie de Wissant pendant le XXè siècle, Pas-de-Calais, France. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 1, 49-64.

Arens, S.M., Van Puijvelde S.P., Brière, C., 2010. *Effects of nourishments on dune development; geomorphology*. Bosschap Report OBN142 DK, Ministry of Agriculture, Nature management and Food quality, Netherlands, 141 pp.

Augris et Simplet, 2013. Les matériaux marins. *Géosciences BRGM*, 17, p. 82-89.

Church, J.A., White, N.J., 2011. Sea-level rise from the late 19$^{th}$ to the early 21$^{st}$ century. *Surveys in Geophysics*, 32, p. 585-602.

Crapoulet, A., 2015. *Dynamique morphologique, bilan sédimentaire et évaluation des zones à risques sur le littoral du Nord-Pas-de-Calais : analyse multi-échelles par LiDAR aéroporté*. Université du Littoral Côte d'Opale, Wimereux.

Crapoulet, A., Héquette, A, Levoy, F et Bretel, P. (soumis pour publication). Using LiDAR topographic data for identifying coastal areas of northern France vulnerable to sea-level rise. *14$^{th}$ International Coastal Symposium ICS2016*, Sidney, Australie.

Crapoulet, A., Héquette, A, Levoy, F et Bretel, P. (sous presse). Evaluation de l'évolution du trait de côte et du bilan sédimentaire littoral en baie de Wissant (nord de la France) par LiDAR aéroporté. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*.

Daubord, C., 2014. *Caractérisation de 7 évènements de tempête de l'automne-hiver 2013-2014 à partir des données disponibles au SHOM*. Rapport du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine N° 001/2014, Brest, 31 p.

IPCC, 2013. *Climate change 2013 - The physical science basis*. Contribution du Groupe de travail I au 5ème rapport d'évaluation du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat. Cambridge University Press, 1552 pp.

Mertens, T., De Wolf, P., Verwaest, T., Trouw, K., De Nocker, L., Coudere, K., 2009. An integrated master plan for Flanders future coastal safety. *Proceedings of the 31$^{st}$ International Conference on Coastal Engineering 2008*, Hambourg, Allemagne, 31 août - 5 septembre 2008. p. 4017-4028.

Neumann B., Vafeidis, A.T., Zimmermann, J., Nicholls, R.J., 2015. Future coastal population rrowth and exposure to sea-level rise and coastal flooding - A global assessment. *PLoS ONE*, 10(3): e0118571. doi: 10.1371/journal.pone.0118571

Rahmstorf, S., Foster, G., Cazenave, A., 2012. Comparing climate projections to observations up to 2011. *Environmental Research Letters*, 7, 1-5.

Sallenger, A.H. Jr., 2000. Storm impact scale for barrier islands. *Journal of Coastal Research*, 16, p. 890-295.

Tresca, A. et Ruz, M.H., 2014. Gestion des dunes littorales sur un complexe industrialo-portuaire, l'exemple du Grand Port Maritime de Dunkerque, Nord de la France. *Colloque international « Gestion des Dunes Côtières »*, Merlimont, 17-19 juin 2014.

Van der Meulen, F., Van Zetten, R., 2014. Coastal management in The Netherlands, from past developments to future perspectives. *XIII$^{èmes}$ Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil*, Dunkerque, 2-4 juillet 2014, p. 787-790.

Wahl, T., Haigh, I.D., Woodworth, P.L., Albrecht, F., Dillingh, D., Jensen, J., Nicholls, R.J., Weisse, R., Wöppelmann, G., 2013. Observed mean sea level changes around the North Sea coastline from 1800 to present. *Earth-Science Reviews*, Vol. 124, p. 51-67.



Photo : Institution interdépartementale des Wateringues

# Impacts du changement climatique sur les eaux continentales

Le changement climatique a et aura des conséquences sur les eaux continentales en raison de modifications probables de la pluviométrie et de l'évaporation des eaux de surface. Ces conséquences concerneront tant la qualité des eaux que le débit des cours d'eau, ce qui est susceptible d'avoir des impacts sur les activités économiques, et notamment la navigation, ainsi que sur les risques. Cette partie a pour objet de dresser un panorama large des impacts qui peuvent être attendus sur les eaux continentales de la région puis de se pencher sur le territoire particulier des Wateringues, polder, comptant près 450 000 habitants et présentant des enjeux importants : centrale nucléaire de Gravelines, pôles urbains et complexes industrialo-portuaire de Calais et Dunkerque, agriculture performante, biodiversité liée aux zones humides… Les risques auxquels sont confrontés les Wateringues, submersion marine et inondation continentale, seront exposés afin d'ouvrir la réflexion sur les pistes d'adaptation possibles et indispensables.

Cette partie présente les interventions suivantes :

- Effets du climat sur le comportement des contaminants situés dans les eaux de surface, les sédiments et l'eau potable
  *Ludovic Lesven, Laboratoire de Spectrochimie Infrarouge et Raman, UMR 8516 CNRS/Université de Lille - Sciences et Technologies*
  Conférence CERCLE du 12 décembre 2013

- Wateringues, des territoires menacés face aux changements climatiques ?
  *Stéphane Vanhée, Institution Interdépartementale des Wateringues*
  Conférence CERCLE du 12 décembre 2013

# Impacts des changements climatiques sur le comportement des contaminants et de la qualité de l'eau de surface, souterraine et des sédiments

Ludovic LESVEN
Laboratoire de Spectrochimie Infrarouge et Raman (LASIR), UMR 8516 CNRS/Université de Lille - Sciences et Technologies

## L'eau en Nord-Pas de Calais ?

*« Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme » (Lavoiser)*

Le Nord-Pas de Calais est une région d'eau où se rencontrent fleuves, rivières, canaux, marais, estuaires et nappes phréatiques. Si notre région peut considérer ses stocks en eau relativement élevés, il n'en reste pas moins que cette abondance est à nuancer. La qualité physico-chimique et biologique des eaux reste préoccupante et une bonne part des masses d'eau du bassin Artois-Picardie est extrêmement sensible aux différents forçages naturels ou anthropiques. Si on s'intéresse au cycle de l'eau en région Nord-Pas de Calais (Figure 1), on peut retenir les chiffres suivants : 16 milliards de mètres cubes arrivent par les précipitations (pluie ou neige) ; 20 % de ces 16 milliards s'infiltrent dans les nappes phréatiques, soit 3,5 milliards de mètres cubes d'eau potable dont environ 410 millions de mètres cubes sont consommés pour les usages domestique, industriel et agricole. Après usage, les eaux usées sont traitées, pour la quasi-totalité des polluants, en stations d'épuration puis reviennent dans le « grand » cycle de l'eau pour former à nouveau des nuages via l'évaporation, l'évapotranspiration, etc. Ce cycle peut être altéré en fonction des forçages qu'il subit.

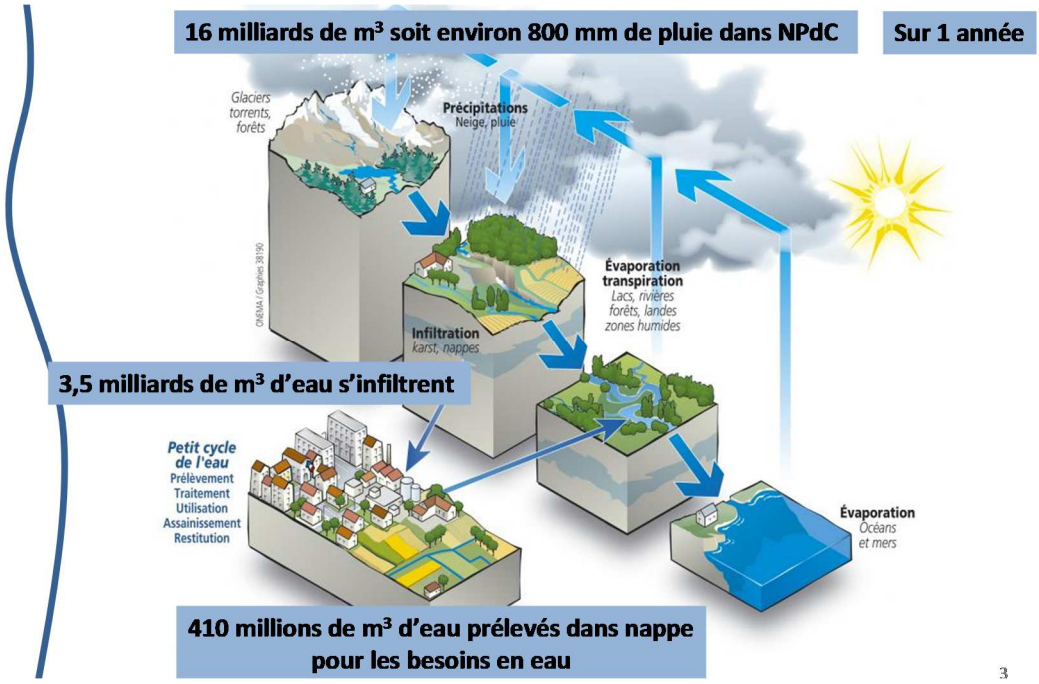



*Figure 1 : Le cycle de l'eau en région Nord-Pas de Calais*

### Les prévisions du GIEC pour le Nord-Pas de Calais d'ici 2100

Dans le cas du scénario minimaliste du GIEC, l'augmentation de température dans la région devrait être d'au moins **1,3 degré d'ici à 2100**, corrélée avec **moins de jours de gel** ainsi qu'avec une **augmentation des niveaux de sécheresse et des jours de canicule**. Le régime des précipitations sera également modifié. Si le volume des précipitations restera constant, on s'attend néanmoins à des pluies beaucoup plus intenses sur de courtes périodes. On peut déjà observer ces phénomènes dans la région. Par exemple, lors de l'hiver 2012, il est tombé au Touquet, un peu plus de 250 millimètres de pluie en un mois soit un quart de la quantité de pluie que reçoit cette ville en une année (800 mm/an). Tous ces événements extrêmes induiront forcément des crues sur les différentes rivières de la région et augmenteront par conséquence la fréquence des inondations, le lessivage des sols et leur érosion.

### Les caractéristiques du bassin Artois-Picardie

Le bassin Artois-Picardie couvre une grande partie de la région Nord – Pas de Calais Picardie. Les eaux de surface de ce bassin appartiennent au *District Hydrographique International de l'Escaut* qui est le plus petit d'Europe mais un des plus industrialisés (usines métallurgiques et sidérurgiques installées le long des canaux) et des plus peuplés. Notre bassin est ainsi un des plus pollués d'Europe. Cette configuration et ces caractéristiques induisent nécessairement des forçages au niveau de la ressource en eau et de la pollution (SI Dreal NPDC). Les masses d'eaux de surface dans la région Nord - Pas de Calais ont une seconde caractéristique : les rivières ont des débits faibles, dépendant de la collecte des eaux pluviales. En outre le faible dénivelé rend ce débit plus faible encore.

**Par ailleurs, la région connait de forts aménagements hydrauliques** pour lutter notamment contre les intrusions salines, l'évacuation des eaux de ruissellement, ou encore pour la canalisation de cours d'eau liée à l'activité industrielle… Avec environ 700 km de cours d'eau canalisés et canaux, la région a ainsi un des réseaux de voies navigables les plus importants en France.

#### *1) La qualité des eaux de surfaces*

Le suivi physico-chimique (pH, oxygène, azote, phosphore, température…), chimique (métaux, pesticides…) et biologique des eaux, suivi notamment par l'Agence de l'Eau Artois-Picardie plusieurs fois par an sur les différentes masses d'eau du bassin permet d'évaluer les différents états de qualité du réseau hydrographique de la région Nord - Pas de Calais. Depuis 1998, le suivi des matières organiques et des nutriments montre une tendance à l'amélioration (Figure 2). Cette compilation de données montre par exemple qu'au cours de cette période de monitoring, les teneurs en matière organique et en ammonium ont diminué respectivement de 50 et 40%.

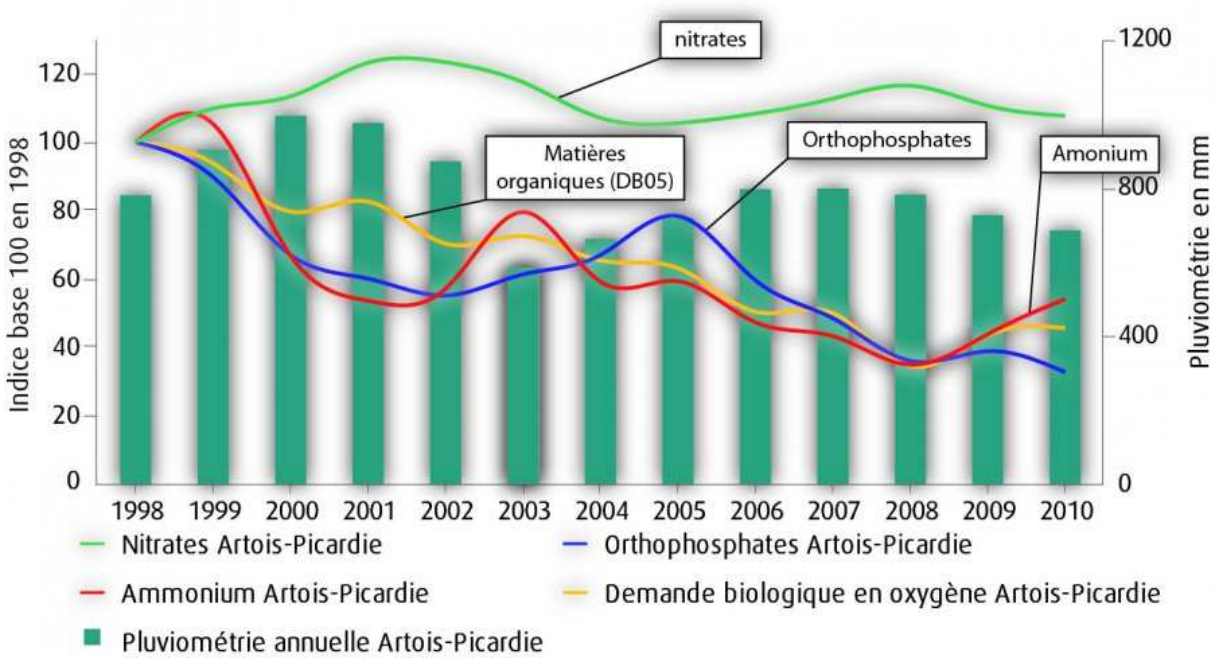



*Figure 2 : Évolution de paramètres physico-chimiques sur les cours d'eau du bassin Artois-Picardie sur la période 1998-2010 (Agence de l'Eau Artois Picardie (AEAP) et Service de l'Observation et des Statistiques (SOeS))*

Bien que la quantité d'orthophosphates dans les masses d'eau décroit progressivement depuis plus de 10 ans, ce nutriment reste le principal paramètre déclassant. Comme le montre la carte de l'état physico-chimique des eaux en 2009 (Figure 3), 50% des stations sont classées en bon état. Les autres sont classées entre « médiocres » et « mauvais », en raison essentiellement des nitrates qui restent difficilement contrôlables (DREAL).

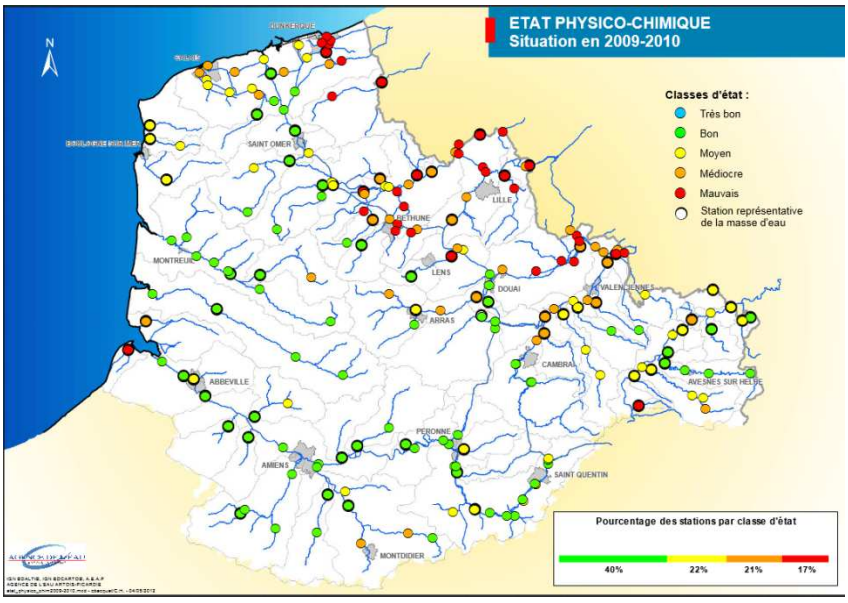



*Figure 3 : Etat physico-chimique en 2009-2010 en Nord-Pas de Calais Picardie (AEAP)*

La Figure 4a montre l'état chimique des eaux de surfaces en termes de métaux et de polluants organiques. La réponse est binaire : les stations affichent un état « bon » ou « mauvais ». Si la concentration d'une seule des 45 substances testées dépasse les normes admises, alors le cours d'eau est directement classé en mauvais état. Avec ce protocole, environ 80 % des stations sont en mauvais état. Si nous négligeons la part d'HAP (d'Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques) ou de pesticides dans cette classification, la proportion de stations de bonne qualité des eaux est augmentée (Figure 4b).

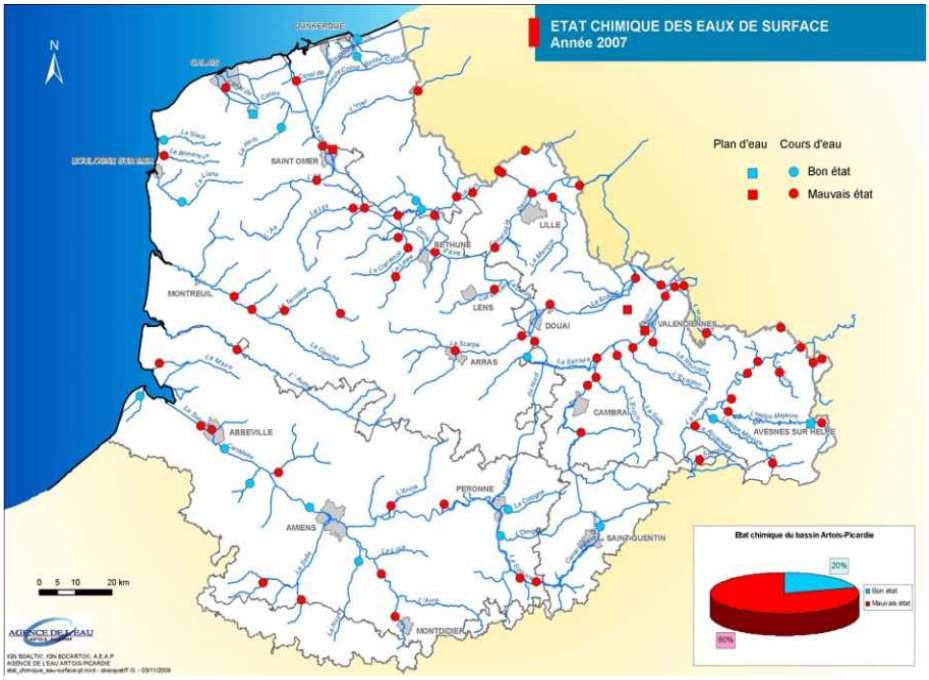



*Figure4a : Etat chimique des eaux de surface en 2007 en Nord-Pas de Calais Picardie (AEAP)*

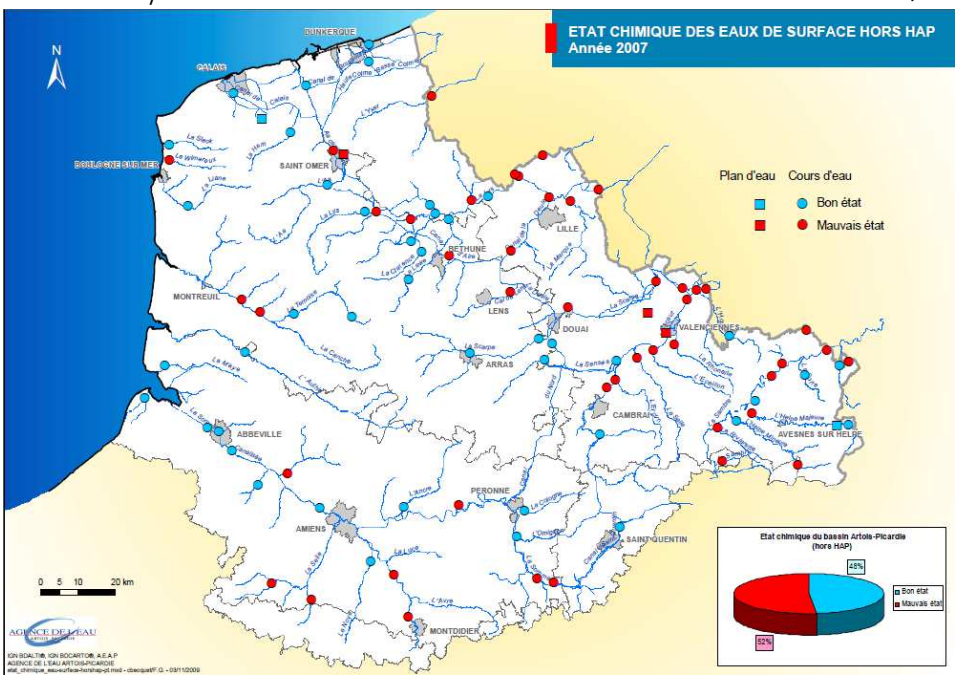



*Figure 4b : Etat chimique des eaux de surface hors HAP en 2007 dans la région Nord-Pas de Calais Picardie (AEAP)*

### *2) Aspects qualitatifs et quantitatifs des eaux souterraines*

La région bénéficie d 'une grande richesse en eaux souterraines. En effet, 90 % de l'alimentation en eau potable provient des nappes phréatiques et seulement 10 % des eaux de surface. La nappe de la Craie, située en moyenne à quelques dizaines de mètre de profondeur est la plus importante du Nord-Pas de Calais tant par sa superficie, proche des ¾ de la région que par les volumes qu'elle contient. Les autres nappes exploitées (Nappes calcaires du Carbonifère, de l'Avesnois, du Boulonnais, ...), présentes à différentes profondeurs, souvent superposées les unes aux autres, complètent les ressources en eaux de notre territoire. Ces réserves d'eau sont uniquement rechargées par les régimes de précipitations dans les zones perméables (hors zones urbaines et réseaux routiers) et pour une majeure partie l'hiver. Du fait de leurs faibles profondeurs, ces nappes constituent la principale source d'alimentation des cours d'eau de la région. Si quantitativement, le niveau des nappes est globalement satisfaisant (hormis la nappe Carbonifère), elles n'en restent pas moins très sensibles aux différentes pollutions sus-jacentes d'origines urbaine, agricole et industrielle.

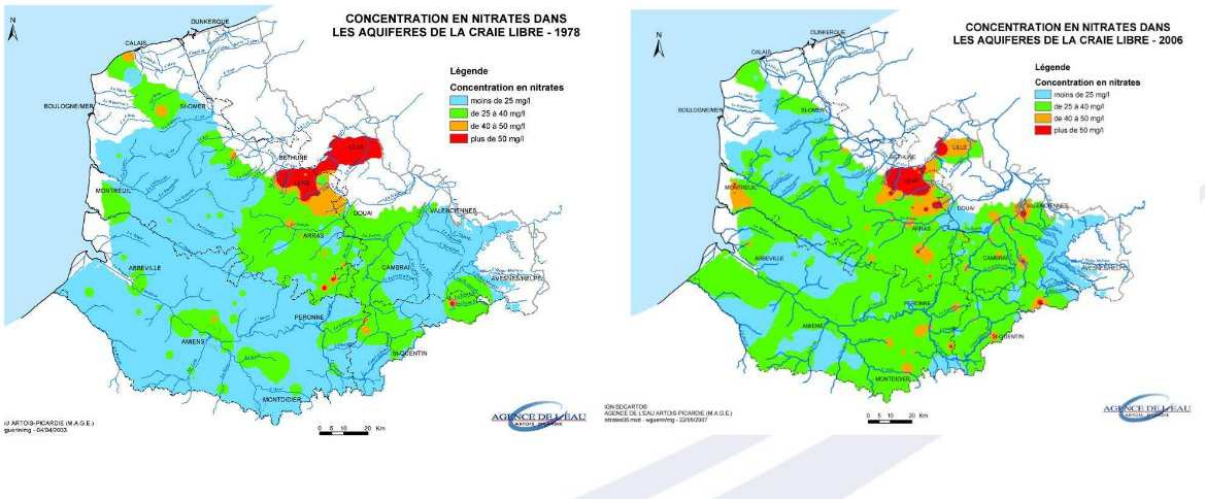



*Figure 5 : Evolution de la concentration en nitrates entre 1978 et 2006 (AEAP)*

Les polluants atteignent les nappes selon une échelle de temps très variable (de quelques jours à quelques années) définie par les caractéristiques géochimique, la profondeur, le régime de précipitation ou encore la nature des substances polluantes (Seguin et al, 2001). Il est courant de retrouver, aujourd'hui, des substances interdites depuis de nombreuses années comme certains pesticides (temps d'infiltration long). La nappe de la Craie est particulièrement vulnérable aux pollutions puisque la quasi totalité de ses eaux présentent un mauvais état qualitatif. La Figure 5 montre l'évolution de la qualité des eaux souterraines en Nord - Pas de Calais (nappe de la Craie) entre 1978 et 2006. La couleur bleue traduit une très bonne qualité des eaux souterraines avec une concentration en nitrates inférieure à 25 mg/l. La couleur verte traduit une concentration comprise entre 25 et 40 mg/l. On constate une dégradation de l'aquifère avec une augmentation généralisée de la concentration en nitrates. Il en va de même pour les pesticides : environ 50 % des stations sont polluées par les pesticides. Les stations sont classées comme polluées si elles dépassent la norme de qualité environnementale, ici fixée à 0,1 microgramme par litre.

Cette pollution (essentiellement due aux pesticides et aux nitrates) rend nécessaire des traitements beaucoup plus importants pour rendre l'eau potable avec une augmentation des coûts et donc du prix de l'eau pour les usagers.

### *3) Les effets des changements climatiques sur la qualité de l'eau*

Distinguer l'influence des différents facteurs influençant la qualité de l'eau est assez complexe. Parmi les paramètres directement liés au changement climatique, et bien que cette liste ne soit pas exhaustive, on peut retenir

- la température,
- les événements extrêmes (pluie ou sécheresse),
- l'ensoleillement et la radiation,
- la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

En partant de ces quatre paramètres, on peut établir une liste de constats et des hypothèses associées :

#### *3.1) La température*

L'un des effets attendus d'une augmentation de la température est une augmentation de la photosynthèse. L'augmentation de la photosynthèse pourrait améliorer la qualité de l'eau dans un premier temps par l'intermédiaire de l'effet de la pompe biologique du $CO_2$ exercée par les végétaux aquatiques. En revanche, l'augmentation de la photosynthèse pourrait entrainer des conséquences négatives. Ainsi peut-on s'attendre à des proliférations d'algues invasives ou non, éventuellement toxiques, comme certaines cyanobactéries qui altèreraient indirectement la qualité de l'eau. La quantité de matière organique pourrait s'accroitre avec l'augmentation de la productivité végétale. Or la dégradation de la matière organique consomme un volume d'oxygène important, ce qui pourrait entrainer des périodes d'anoxie affectant la faune et la flore aquatique (Lesven et al., 2008).

Du fait de la dilatation des océans et de la fonte des masses glaciaires, le niveau de la mer s'élèvera ce qui pourrait entrainer des intrusions salines plus fréquentes dans les régions côtières et, en particulier, dans les aquifères et les nappes du littoral. L'augmentation de la salinité augmente la mobilité des polluants et ainsi leur migration dans les eaux de surfaces et vers les eaux souterraines.

La température de l'eau devrait aussi augmenter. Les polluants se retrouveraient alors davantage sous forme dissoute et ainsi plus biodisponibles, c'est à dire plus facilement assimilables par les végétaux et les animaux (Warren et Zimmerman, 1994). L'augmentation de température pourrait entrainer ainsi indirectement une fragilisation des organismes voire l'extinction des espèces aquatiques les plus sensibles. On sait également que plus l'eau est chaude, moins les gaz atmosphériques se dissolvent, on pourrait donc s'attendre à une diminution de la concentration en $CO_2$ des eaux de surface mais cet effet sera évidemment contrebalancé par l'augmentation continue de la concentration atmosphérique de ce même gaz. Pour la même raison, l'oxygène se dissoudra plus difficilement ce qui pourrait dégrader la qualité de l'eau par l'augmentation des phases d'anoxie déjà évoquée.

Tout cela pourrait avoir des incidences directes sur le traitement de l'eau potable. A titre d'exemple, une intrusion saline provoque l'augmentation de la concentration des bromures et des iodures dans les eaux souterraines. Ainsi, lors de la potabilisation de ces eaux avant distribution, le traitement à l'ozone, utilisé pour l'élimination des germes pathogènes, accroîtrait la transformation des bromures en bromates, sous-produits de traitement, cancérigènes à partir de 10 microgrammes par litre ; cette limite est déjà atteinte dans les eaux potables sans infiltration d'eau saline (Brookman. 2010).

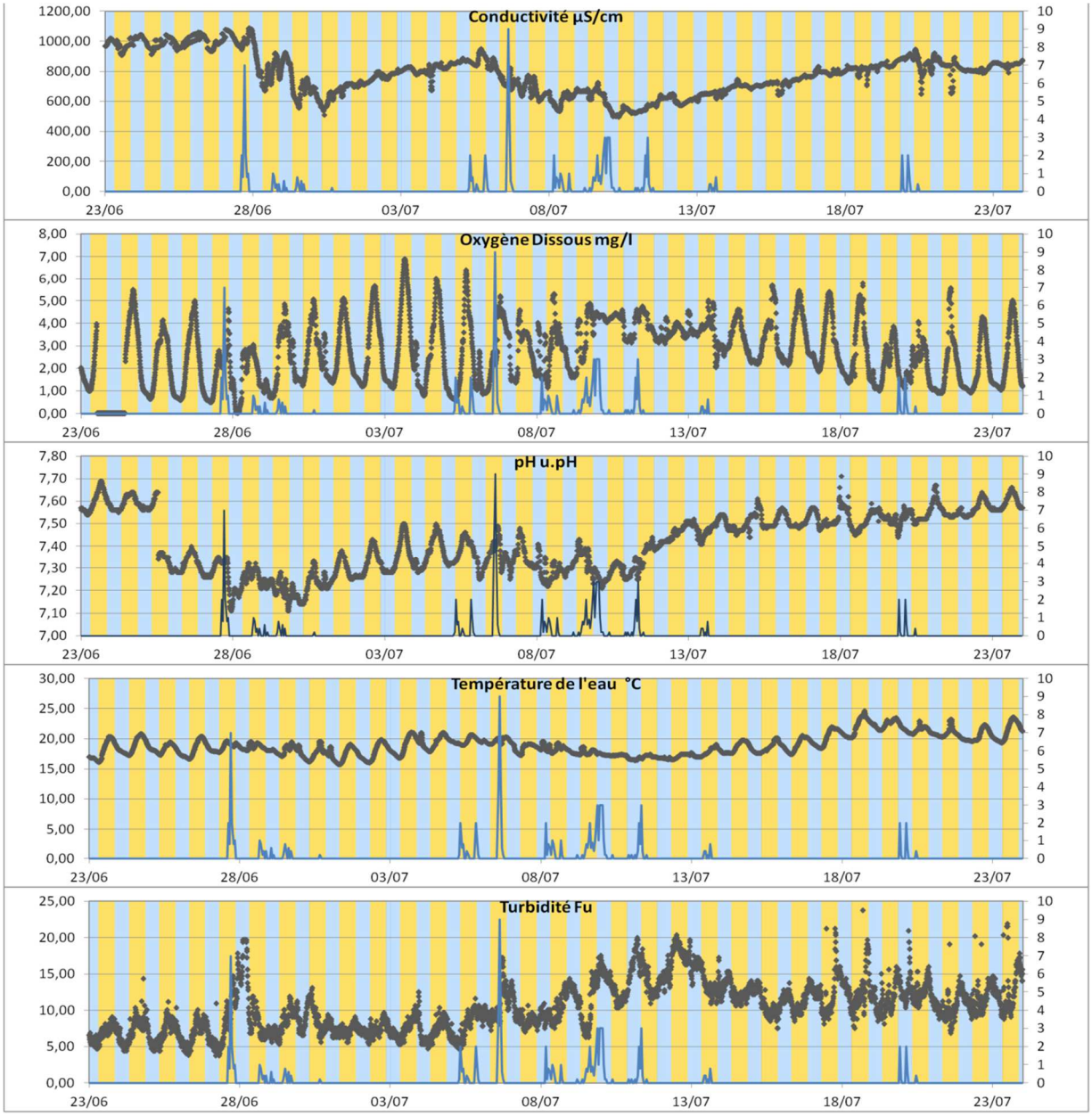



*Figure 6 : Suivi des caractéristiques physico-chimiques (Conductivité, oxygène dissous, pH, turbidité et température) des eaux de la Marque (à Hempenpont) en fonction de la pluviométrie sur la période juin-juillet 2014. Les paramètres ont été mesurés toutes les 10 min à partir de la station de monitoring haute fréquence de l'Agence de l'Eau Artois-Picardie (Ivanovsky, 2015)*

### *3.2.1) Les événements extrêmes : l'intensification des pluies*

L'augmentation de la fréquence de très fortes pluies sur de courtes périodes entrainera des conséquences multiples telles que :

- un lessivage des sols avec une augmentation des polluants terrigènes (d'origine urbaine ou agricole) dans la colonne d'eau,
- des crues et des inondations plus fréquentes,
- une augmentation de la fréquence de débordement de stations d'épuration avec pollution des eaux de surfaces,
- une baisse du niveau des nappes phréatiques en raison d'une réduction des infiltrations des eaux car les averses violentes favorisent ruissellement et lessivage,
- une augmentation brutale du débit des cours d'eau avec un impact sur le trafic fluvial.

Même si la balance penche plutôt du côté négatif, l'augmentation du régime de pluviométrie pourrait au contraire contribuer à diluer les pollutions des masses d'eau. Lors d'un suivi haute fréquence (toutes les 10 minutes) des eaux de la Marque en été 2014 (Figure 6), on peut remarquer que l'augmentation de la turbidité (matière en suspension d'origine terrigène ou sédimentaire) est souvent corrélée aux forts épisodes de pluies enregistrés sur la même période. Le lessivage et l'érosion des sols semblent dans ce cas une explication probable de l'augmentation des matières en suspension dans la colonne d'eau. L'effet est binaire ici. Ces particules peuvent contribuer à accroitre le niveau de contamination du compartiment aquatique et dans le même temps agir comme phases porteuses (piège) des polluants présents sous formes dissoutes et disponible (Davies-Colley et Smith, 2001). Sur cette même figure, on remarque que la conductivité de la rivière diminue lors des fortes pluies ce qui peut se traduire par une dilution des polluants sous formes dissoutes. Le milieu aquatique est un système complexe où les contributions des forçages d'origine naturel ou anthropique sont encore difficiles à évaluer.

### *3.2.2) Les évènements extrêmes : la sécheresse*

Les sécheresses affaiblissent et, *in fine*, diminuent la couverture végétale ce qui, combiné aux averses violentes de l'été favorise l'érosion et le lessivage des sols. On peut donc s'attendre à ce que les sécheresses contribuent à l'abaissement du niveau des nappes phréatiques et à une augmentation de la concentration des polluants dans la colonne d'eau. La pression anthropique, lors de ces évènements, serait alors critique dans des cours d'eau qui connaissent déjà un faible débit et où la dilution de la pollution est plus lente (120$m^3$/s de débit au mieux dans le bassin contre 1700 $m^3$/s dans le Rhône).

### *3.2.3) Les évènements extrêmes : les vents violents*

Le dérèglement climatique pourra se traduire également par une intensification des tempêtes et des vents forts. Nos masses d'eau étant peu profondes (en moyenne 3-4 mètres), le vent et la modification des régimes hydrauliques qui s'en suit, pourraient remettre en suspension des contaminants (Bailey et Hamilton, 1997) qui étaient piégés dans les sédiments, mémoire des pollutions historique de la région.

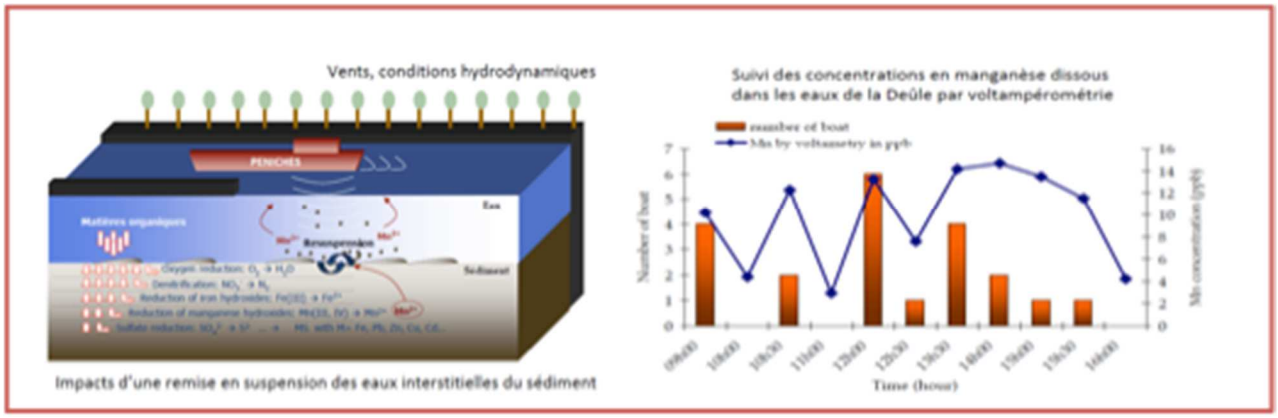



*Figure 7 : Schéma des conséquences du trafic fluvial sur les sédiments (Lesven, 2006)*

A titre d'analogie, on peut observer les conséquences du trafic fluvial sur la remise en suspension des sédiments dans les eaux de la Deûle. Les pics de trafic sont assimilables aux phénomènes de tempête (Figures 6 et 7). Ce trafic modifie le régime hydrodynamique puisqu'il perturbe la colonne d'eau en créant des mouvements et des courants qui remettent en suspension les sédiments. Ces sédiments comprennent une phase particulaire et une phase « eaux interstitielles ». Chacune des deux phases est plus ou moins contaminée et agit de manière distincte dans la colonne d'eau. L'étude présentée dans ces figures s'appuie sur le suivi du manganèse dissous issu des eaux interstitielles du sédiment, dans la colonne d'eau. Elle peut s'appliquer à tous les métaux. En raison de l'intensification du trafic des péniches, on observe bien une augmentation du manganèse dissous dans la colonne d'eau. Suivant les teneurs, ce manganèse peut être toxique pour l'activité biologique aquatique. Il est à noter que dans un contexte de changement climatique, les autorités auraient tendance à privilégier le transport de marchandises sur les voies navigables au détriment du réseau routier. Cette solution, bien que moins émettrice de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, pourrait, en revanche, remobiliser les sédiments (souvent très contaminés) des canaux avec des impacts plus ou moins toxiques pour l'écosystème aquatique (Garad et al, 1987).

### *3.3) L'ensoleillement et le rayonnement*

Si le régime des précipitations change, on doit s'attendre à une évolution temporelle de la couverture nuageuse par rapport à celle de la période actuelle. La conséquence est que le rayonnement solaire indispensable pour la photosynthèse pourrait varier assez sensiblement en intensité. En particulier, si les pluies estivales se font plus rares, l'ensoleillement pourrait augmenter sensiblement. Cela devrait encore augmenter l'activité photosynthétique et entraîner davantage de photodégradation des composés chimiques présents dans les eaux de surface sous différentes formes plus ou moins toxiques (Halmann, 1995). Aujourd'hui, les chercheurs ne sont pas en mesure de prévoir les effets et impacts du rayonnement en particulier sur les polluants émergents comme les résidus pharmaceutiques, que par ailleurs nous n'arrivons pas encore à traiter dans les stations d'épuration et qui se retrouvent dans les eaux de surface ou dans les eaux souterraines.

*3.4) La concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère.*

L'augmentation de la concentration en $CO_2$ stimulera la photosynthèse, ce qui est plutôt un effet positif. En revanche, on peut s'attendre à une acidification des eaux (Whitehead et al., 2009). La diminution du pH (acidification) augmentera la biodisponibilité des polluants en particulier des polluants métalliques (Spry et al., 1991). Ce lien entre le pH et l'activité phytoplanctonique est particulièrement visible sur la Figure 6 où on peut observer les cycles nycthéméraux traduisant l'alternance photosynthèse (production d'$O_2$ et consommation du $CO_2$) la journée et respiration (rejet de $CO_2$) par les organismes la nuit. Toutes les particules qui se trouvent dans la colonne d'eau ou dans les sédiments et qui contiennent beaucoup de polluants métalliques ou organiques libèreront ces polluants dans la colonne d'eau. Le pH acide rendra ces polluants plus solubles ou donc plus biodisponibles pour l'activité biologique. Il changera également la spéciation, à savoir la forme dans laquelle se trouve le polluant et donc son degré de toxicité. Toutefois, ce phénomène d'acidification des eaux est à relativiser pour le bassin Artois-Picardie où les eaux sont pour une bonne part, fortement tamponnées.

## Difficultés et enjeux

Le changement climatique est une des composantes des changements anthropiques. Une question importante est de savoir si le changement climatique impactera davantage la qualité de l'eau que d'autres facteurs comme la pollution liée aux rejets d'eaux industrielles, ou des stations d'épuration, les prélèvements d'eau dans les nappes pour les usages industriels, agricoles ou domestiques qui, impactent déjà la qualité de l'eau.

Les laboratoires n'ont pas énormément de recul sur cette question. Cependant grâce au soutien de l'Agence de l'Eau qui dispose de séries temporelles conséquentes de données, ils pourront, via des analyses diachroniques, mieux comprendre l'évolution temporelle de la qualité physico-chimique du réseau hydrographique et dégager s'il existe un effet du changement climatique. Les stations de mesures haute fréquence dont dispose l'Agence de l'Eau Artois-Picardie pour une dizaine de paramètres physico-chimique et qui sont en cours de développement dans certains laboratoires de la région (Superville et al., 2011) pour les métaux pourraient alimenter des modèles sur les impacts probables des changements climatiques sur la qualité des eaux du bassin. Toutefois, ce type d'études est couteuse en temps et en moyen et il faudrait donc que l'ensemble des autorités régionales, mais aussi les citoyens, prennent conscience du financement de ce type d'enjeux. Parmi ces derniers, on peut retenir :

- le maintien de la fourniture en eau pour les usagers et une prévision des aménagements en ce sens (développement de nouvelles techniques de traitement des nouveaux polluants par exemple),
- la préservation de la qualité de la ressource, déjà plus ou moins polluée,
- la sensibilisation de plus en plus du grand public aux économies d'eau.

## Références


Bailey, M.C., Hamilton, D.P., 1997. Wind induced sediment resuspension: a lake-wide model. *Ecological Modelling*, 99(2), 217-228.

Brookman, R., 2010. *Controlling Bromate Formation by Conventional and Innovative Titanium Dioxide Photocatalysis* (Doctoral dissertation).

Davies-Colley, R.J., Smith, D.G., 2001. Turbidity, suspended sediment, and water clarity: a review. *J. of the American Water Resources Association*, 37 (5).

Garrad, P.N., Hey, R.D., 1987. Boat traffic, sediment resuspension and turbidity in a broadland river. *Journal of Hydrology*, 95(3), 289-297.

Halmann, M.M., 1995. *Photodegradation of water pollutants*. CRC Press.

Ivanovsky A., 2015. Thèse en cours à l'Université de Lille - Sciences et Technologies

Lesven, L., Skogvold, S.M., Mikkelsen, Ø., Billon, G., 2009. Determination of manganese in natural media by anodic stripping voltammetry using a rotating solid silver amalgam electrode. *Electroanalysis*, 21(3-5), 274-279.

Lesven, L., Gao, Y., Billon, G., Leermakers, M., Ouddane, B., Fischer, J.C., Baeyens, W., 2008. Early diagenetic processes aspects controlling the mobility of dissolved trace metals in three riverine sediment columns. *Science of the total environment*, 407(1), 447-459.

Seguin, J.J., Le Guern, C., Guyonnet, D., Baranger, P., Saada, A., Darmendrail, D., Colombano, S., 2001. *Guide sur le comportement des polluants dans le sol et les nappes*. Ed. BRGM.

Spry, D.J., & Wiener, J.G., 1991. Metal bioavailability and toxicity to fish in low-alkalinity lakes: a critical review. *Environmental Pollution*, 71(2), 243-304.

Superville, P.J., Louis, Y., Billon, G., Prygiel, J., Omanović, D., Pižeta, I., 2011. An adaptable automatic trace metal monitoring system for on line measuring in natural waters. *Talanta*, 87, 85-92.

Warren, L.A., Zimmerman, A.P., 1994. The influence of temperature and NaCl on cadmium, copper and zinc partitioning among suspended particulate and dissolved phases in an urban river. *Water Research*, 28(9), 1921-1931.

Whitehead, P.G., Wilby, R.L., Battarbee, R.W., Kernan, M., & Wade, A.J., 2009. A review of the potential impacts of climate change on surface water quality. *Hydrological Sciences Journal*, 54*(*1), 101-123.

L'ensemble des cartes des états physico-chimiques, chimiques et biologiques dans le bassin Artois Picardie proposées dans ce document est issu du site internet de l'Agence de l'Eau Artois-Picardie (http://www.eau-artois-picardie.fr/*)*

http://www.nord-pas-de-calais.developpement-durable.gouv.fr/

# Wateringues,
# des territoires menacés face au changement climatique ?

Stéphane VANHÉE
Institution Interdépartementale des Wateringues

Wateringues, au sens strict, est un mot flamand qui signifie « cercle d'eau ». D'une manière générale, il définit les associations de propriétaires qui ont en charge l'assèchement d'un territoire que l'on appelle le territoire des Wateringues : l'objet de cette présentation. Le territoire des Wateringues correspond à l'extension de la plaine maritime flamande qui se prolonge vers la Belgique et encore plus au nord vers les Pays-Bas (Figure 1). Situé dans le triangle Saint-Omer – Calais – Dunkerque, le territoire des Wateringues correspond à l'ancien delta de l'Aa. D'une superficie de 100 000 ha de terres à une altitude inférieure au niveau des plus hautes mers, ce polder, gagné sur la mer à force de travail et d'obstination compte près 450 000 habitants et présente des enjeux importants : la centrale nucléaire de Gravelines, seconde centrale nucléaire d'Europe, les pôles urbains et les complexes industrialo-portuaire de Calais et de Dunkerque, une agriculture performante, une biodiversité liée aux zones humides…

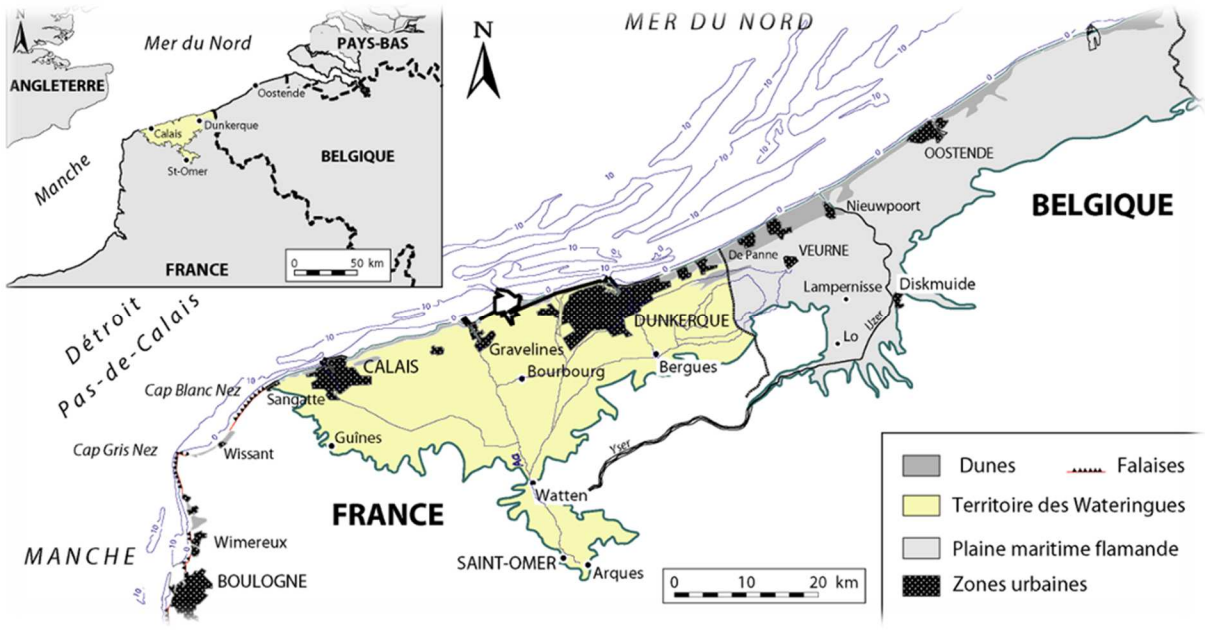



*Figure 1 : Territoire des Wateringues dans la plaine flamande*

### La topographie du territoire des Wateringues

Situé sous le niveau des hautes mers, d'altitude générale de l'ordre de 1 à 2 m NGF (nivellement général de la France), avec des zones très basses au-dessous du 0 NGF (Les Moëres : -2,50 m NGF), le territoire des Wateringues se caractérise par l'absence de pente.

De par ses caractéristiques topographiques, l'écoulement naturel des eaux à la mer dit gravitaire ne peut se faire qu'à marée basse. L'assainissement de ce polder a nécessité un aménagement hydraulique patiemment réalisé et constamment amélioré depuis le XIIème siècle. Caractérisé par un réseau dense de 1 500 km de canaux et de watergangs et plus de 100 stations de relevage, ce dispositif, situé aux limites des possibilités d'écoulement gravitaire aux exutoires à marée basse a été complété par des grands ouvrages d'évacuation des crues à la mer gérés par l'Institution Interdépartementale des Wateringues (Figure 2).

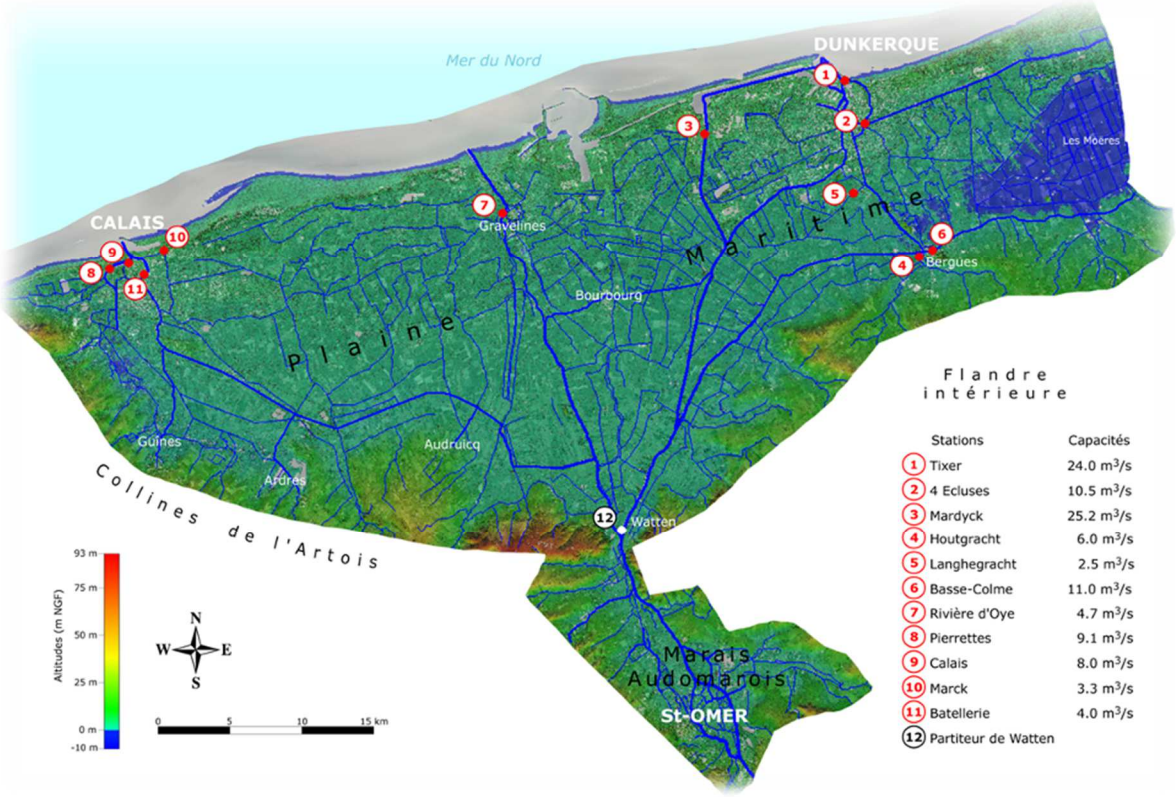



*Figure 2 : Topographie et réseau hydraulique du territoire des Wateringues*
*Les grands ouvrages d'évacuation des crues à la mer (source : S. VANHÉE, Institution Interdépartementale des Wateringues d'après les données LIDAR fournies par la DDTM du Nord).*

Le territoire des Wateringues est protégé de la submersion marine par les dunes, les digues et les portes à la mer (Figures 2 & 3).



*Figure 3 : Portes à la mer. Ouvrage Tixier. Dunkerque, Nord*
*(source : Institution Interdépartementale des Wateringues).*

Ces portes à la mer, situées à Calais, Gravelines et Dunkerque, jouent un rôle essentiel par rapport aux fluctuations de la marée. Une gestion de l'eau permanente y est nécessaire rythmée par la marée. A marée haute, fermées, elles empêchent la mer d'entrer à l'intérieur des terres et d'inonder l'arrière-pays. À marée basse, ouvertes, elles sont l'unique exutoire des eaux du territoire des Wateringues. Le système de drainage est complété par de nombreuses stations de relevage et de pompage de grande capacité permettant d'évacuer artificiellement les eaux excédentaires à la mer.

Ces principes de gestion de l'eau soulignent l'importance de disposer d'ouvrages efficaces pour empêcher la mer d'entrer mais également pour pouvoir évacuer les eaux du territoire en cas de crue. Cette efficacité de protection nécessite des travaux lourds et onéreux comme illustrés à Dunkerque : à partir de 2009, les cinq portes à la mer de l'ouvrage Tixier ont été réhabilitées complètement pour un montant de plus de 1 million d'euros. Le manque de protection de la digue des Alliés vis-à-vis des tempêtes a débouché sur des travaux de réensablement de sa plage de près de 1,5 millions de $m^3$ sur la période 2011-2015 pour un montant de plus de 7 millions d'euros. A ces dépenses s'ajoutent les dépenses d'exploitation et de fonctionnement des ouvrages : portes à la mer et stations de pompage.

### Des écoulements naturels rythmés par les marées et déterminés par le niveau bas de mer aux exutoires du territoire

Le niveau de la mer est un paramètre déterminant pour ce territoire. Il est le résultat de l'amplitude des marées exprimée par les coefficients de marée et des phénomènes météo-marins : surcotes, décotes, tempêtes... A marée basse, le niveau de la mer conditionne les possibilités d'évacuation des eaux du territoire des Wateringues. L'écoulement gravitaire ne peut se faire qu'à marée basse lorsque le niveau de la mer est inférieur au niveau d'eau dans les canaux (Figure 4).

L'amplitude de la marée et la durée du tirage gravitaire permettent d'évacuer des volumes d'eau plus importants (Figure 4). Pour compenser un déficit d'évacuation gravitaire provoqué par une surcote et lorsque les apports d'eau ne peuvent pas être stockés dans les canaux sans provoquer de débordements, les stations de pompage permettent d'évacuer artificiellement les eaux excédentaires à la mer pendant la phase de marée haute. Les capacités d'évacuation gravitaires sont supérieures aux capacités d'évacuation par pompage la limite étant définie par les capacités de l'ouvrage (Figure 4).

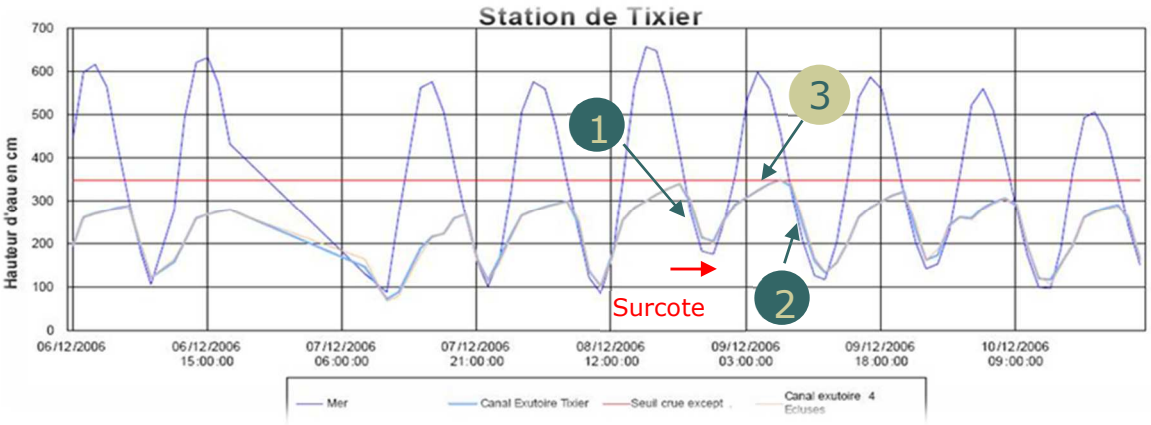



*Figure 4 : Enregistrements des niveaux mer et canal exutoire à la station Tixier de Dunkerque.*
*Cas 1 : Tirage gravitaire : 1 575 000 m³ évacués en 03h30 – Moyenne 125 m³/s ;*
*Cas 2 : Tirage gravitaire : 1 940 000 m³ évacués en 04h15 – Moyenne 126 m³/s ;*
*Cas 3. Pompage : 586 000 m³ évacués en 07h45 – Moyenne 21 m³/s.*

### Le territoire des Wateringues face aux risques d'inondation d'origine continentale et de submersion marine

Les Wateringues sont des territoires exposés aujourd'hui à un risque d'**inondation d'origine continentale**. Ces inondations résultent d'une accumulation trop importante d'eau et d'une saturation des sols. Elles se traduisent par le débordement des cours d'eau et des canaux, des inondations des pieds de coteaux suite aux ruissellements, des accumulations d'eau dans les casiers suite à une incapacité d'infiltration (Figure 5). En milieu urbain, elles résultent de la saturation des réseaux d'assainissement. A Dunkerque, la voie rapide construite dans un ancien canal servant à l'évacuation des eaux retrouve cette fonction temporaire de stockage (Figure 5).



Dunkerque - Inondation de la voie rapide dans l'ancien canal de Mardyck



Débordement de la Hem



Débordement d'un casier Marais Audomarois

*Figure 5 : Illustrations des situations d'inondation d'origine continentale dans les Wateringues (source : Institution Interdépartementale des Wateringues. DREAL Nord-Pas de Calais).*

Le territoire des Wateringues est un territoire exposé au risque de **submersion marine**. Ce risque a été avéré en 1949 et en 1953 sur Dunkerque - Rosendaël (Figure 6), mais aussi sur Calais et d'autres zones du littoral.



*Figure 6 : Submersion du Pont de Rosendaël et de la Rue Paul Dufour à Dunkerque en février 1953 (source : Archives municipales de la ville de Dunkerque).*

Encore aujourd'hui, le territoire des Wateringues est exposé à ce risque de submersion marine, en atteste, la tempête Xaver de décembre 2013. Alors que le coefficient de marée était de 100, une surcote de 1,26 m a été mesurée à pleine mer provoquant la submersion de la digue des Alliés à Dunkerque (Figure 7).



*Figure 7 : Submersion de la digue des Alliés Dunkerque le 6 décembre 2013 lors d'une surcote de 1,26 m à pleine mer (source : La Voix du Nord).*

### L'incapacité à évacuer les eaux du territoire sous l'effet des surcotes.

Le territoire des Wateringues est exposé aux risques de submersion marine et d'inondation continentale par incapacité à évacuer les eaux du territoire des Wateringues par l'effet des phénomènes de surcote. La surcote désigne la différence positive entre le niveau marin observé et le niveau marin qui existerait en présence de la marée astronomique seule.

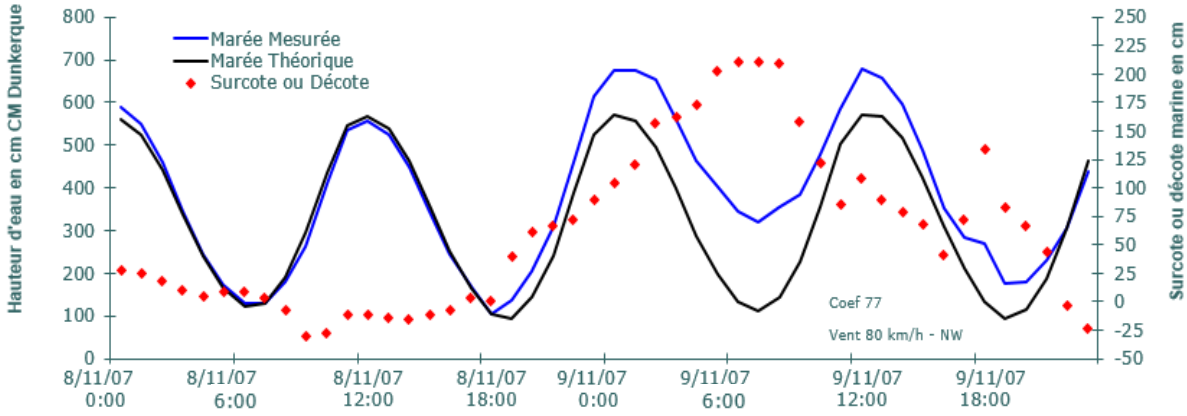



*Figure 8 : Hauteur d'eau et amplitude de surcotes et décotes à la Porte à la mer Tixier, Dunkerque, les 8 et 9 Novembre 2007.*

Le 9 novembre 2007, à marée haute, avec un coefficient relativement modeste de 77, une surcote mesurée de ± 1 m (Figure 8) sous l'effet de vents de 80 km/h de secteur Nord-Ouest, la mer est venue recouvrir la digue des Alliés (Figure 9). Le même jour, mais à marée basse, une surcote instantanée de ± 2,10 m a été mesurée à Dunkerque (Figure 8). Bien qu'exceptionnelle, parce que cette surcote s'est produite à marée basse, elle n'a constitué aucune menace en terme de risque de submersion marine (Figure 9), mais a empêché l'évacuation des eaux du territoire des Wateringues.

Digue des Alliés - Dunkerque
9 Novembre 2007 - Surcote ± 1 m
Submersion de la digue à marée haute




*Figure 9 : Phénomène des surcotes à marée haute et à marée basse (source : Institution Interdépartementale des Wateringues).*

Il semblerait que les surcotes les plus importantes se produisent principalement à marée basse. Ainsi, si parmi les incidences des changements climatique une augmentation de la fréquence des surcotes devrait se produire, le risque d'inondation du territoire des Wateringues serait plus grand non pas en raison des pluies mais en raison du niveau de la mer qui empêcherait l'évacuation gravitaire des eaux du territoire.

### L'équilibre fragile du système actuel

L'équilibre fragile du système actuel dépend de 3 composantes : le niveau de la mer, le rapport pluviométrie - saturation des sols et la fiabilité des équipements d'évacuation des eaux. La Figure 10 synthétise la situation actuelle en matière de gestion du système Wateringues. Sur la zone du Calaisis, il existe des difficultés pour gérer l'évacuation des eaux de ce territoire lorsque de fortes précipitations se produisent, suite au ruissellement important issu des collines de l'Artois, qui se déversent dans les secteurs bas à partir desquels l'acheminement de l'eau à la mer via Calais est difficile.

Sur le système Aa - Grand gabarit, nous avons un déficit d'évacuation de l'ordre de 20 $m^3/s$ pour répondre à une crue décennale. Ce déficit peut être en partie comblé de manière temporaire par le biais des pompes Bergeron au niveau de l'écluse maritime de Mardyck.

Une forte sensibilité aux marées défavorables, donc aux marées dites de mortes eaux, associées à des phénomènes de surcotes est observée pour les secteurs les plus bas du dunkerquois.

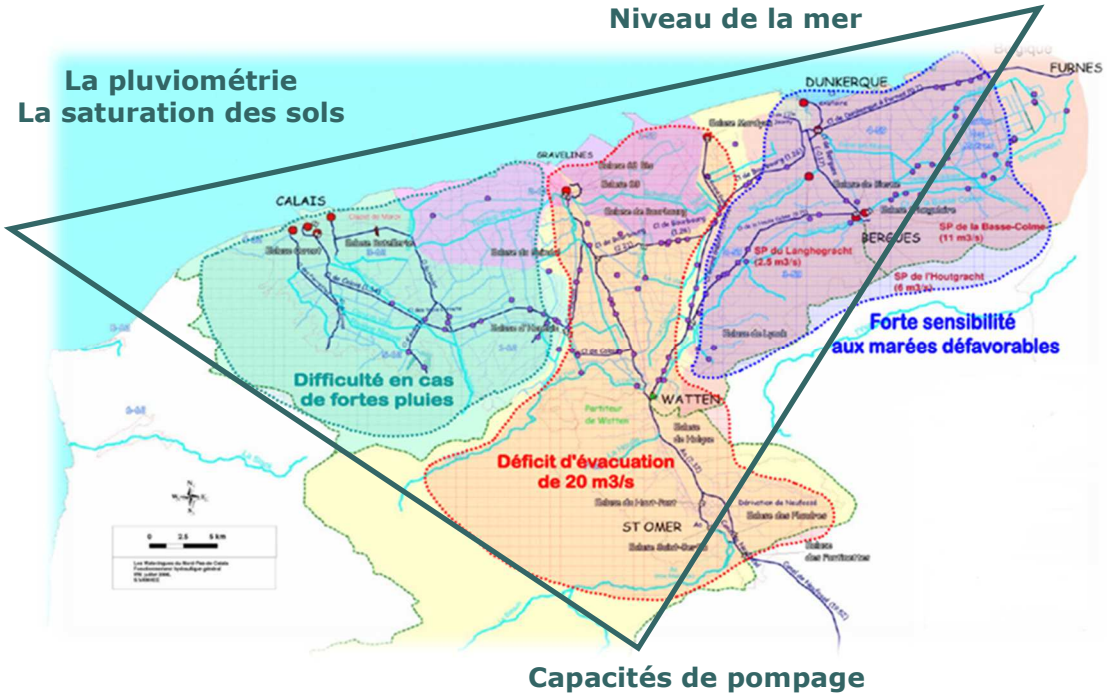



*Figure 10 : Les trois composantes à prendre en compte dans la gestion des Wateringues et les problématiques propres à chaque territoire*

### Des inquiétudes sur la capacité du système

Des inquiétudes fortes existent sur la capacité du système à répondre aux incidences possibles du changement climatique : élévation du niveau de la mer, augmentation des précipitations, intensité et fréquence des tempêtes. Au-delà du risque de submersion marine, ces inquiétudes portent sur sa capacité à évacuer naturellement les eaux et sur la nécessité de recourir plus fréquemment aux pompages pour éviter les inondations continentales.

En ce qui concerne les hypothèses des conséquences du changement climatique, il est évoqué l'augmentation des précipitations, voire des précipitations exceptionnelles. A titre d'exemple, sur le Calaisis, en août 2006, deux journées successives de pluviométrie journalière centennale ont été enregistrées. Le système a été incapable de faire face à ces précipitations et d'éviter les inondations avec ces cumuls de pluviométrie. Autre exemple, sur le littoral Est-dunkerquois, en 2007, il est tombé l'équivalent d'un mois de pluie en seulement deux heures. Là encore, une saturation des réseaux et des inondations se sont produites. Face à ces précipitations exceptionnelles, à l'augmentation des précipitations, il est à craindre d'avoir des difficultés à **gérer des volumes d'eau importants sur des durées limitées**.

Concernant l'élévation du niveau de la mer, on peut s'interroger sur la possibilité, à l'avenir, à évacuer naturellement (i.e., par écoulement gravitaire) les eaux du territoire des Wateringues. Si les phénomènes de surcote se produisent de manière régulière, il faudra forcément avoir recours au pompage de manière plus fréquente et sur des durées plus importantes.

Sur le territoire de Dunkerque, une simulation d'une élévation du niveau de la mer de + 30 cm a été réalisée afin d'évaluer ses conséquences sur les pertes de capacité d'évacuation gravitaire et sur les pompages complémentaires nécessaires, ainsi que sur l'incidence des niveaux d'eau dans les canaux dans les conditions optimales de pompage et en cas de défaillance du système de pompage. Les résultats indiquent une augmentation de pompages supplémentaires de l'ordre de 45 % pour des marées de mortes eaux et de 20 % pour les marées de vives eaux (Figure 11).

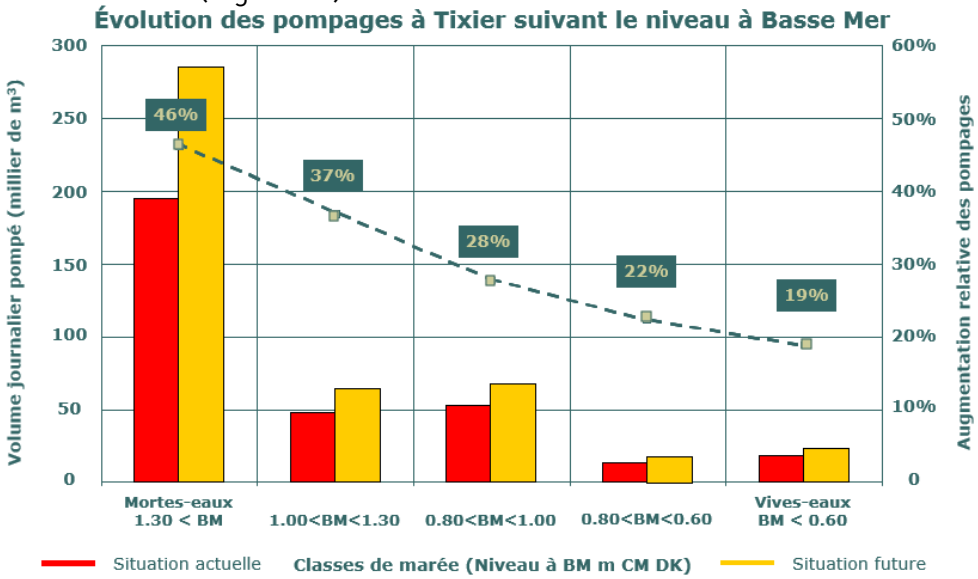



*Figure 11 : Evaluation de l'incidence d'une élévation du niveau de la mer de 30 cm sur le niveau de pompage pour différentes classes de marées ; les estimations sont basées sur les enregistrements en 2006-2007 à Dunkerque (source : Institution Interdépartementale des Wateringues).*

### Les pistes d'adaptations aux incidences du changement climatique

Notre champ d'action est limité sur les composantes dont dépend l'équilibre fragile du système Wateringues : élévation du niveau de la mer, augmentation de la fréquence et de l'intensité des précipitations. L'action de l'Institution Interdépartementale des Wateringues porte essentiellement sur des opérations de réhabilitation et de maintenance préventive des ouvrages généraux d'évacuation des crues. En revanche, des pistes d'adaptation sont évoquées pour répondre aux incidences du changement climatique.

La première piste d'adaptation du système serait d'**accroître et d'optimiser les capacités de stockage sur le linéaire important de canaux et de watergangs**. L'idée aujourd'hui est de développer un réseau d'instruments de mesure pour permettre d'optimiser au mieux le stockage des eaux dans ces 1 500 kilomètres de watergangs, afin d'attendre la phase de marée basse et pouvoir évacuer les eaux. Une autre solution de stockage serait de créer des zones d'expansion de crue. La contrainte sur ce territoire à topographie plane est la nécessité de recourir au terrassement pour créer ces zones d'expansion de crue.

Une autre piste d'adaptation possible serait d'**accroître les capacités de pompage du système actuel**. Cette orientation n'est pas privilégiée aujourd'hui notamment en raison des coûts de fonctionnement en électricité. Les dépenses en électricité ont atteint 800 000 euros sur l'année 2012. Peut-être qu'à terme, le recours à des capacités supplémentaires de pompage sera nécessaire pour accroitre la protection du territoire des Wateringues.

Au-delà des solutions techniques à mettre en œuvre pour optimiser la gestion des eaux, il faut **développer une « culture du polder »** pour permettre de prendre conscience des risques, prendre les mesures nécessaires pour réduire la vulnérabilité des biens et des personnes, apprendre de nouveau à vivre avec l'eau afin de construire un territoire résilient et transformer la menace en une opportunité pour pérenniser et développer ce territoire des Wateringues.



Photo : Yves Piquot



Yves Piquot est maître de conférences à l'Université de Lille au sein de l'unité Evolution – Ecologie – Paléontologie (EEP) – UMR CNRS 8198 depuis 1998. Il est docteur en écologie et travaille sur les conséquences des changements globaux sur la biodiversité, il est spécialiste en biologie de la conservation des espèces en déclin et a contribué à plusieurs projets de réintroduction d'espèces animales et végétales menacées. Il anime depuis 2010 le groupement d'intérêt scientifique « Biodiversité » qui regroupe onze laboratoires de recherche dont 4 sont associés au CNRS et 5 structures en charge de la connaissance et de la gestion du patrimoine naturel.

# Impacts du changement climatique sur la biodiversité

Partie coordonnée par Yves Piquot
Unité Evolution-Ecologie-Paléontologie UMR 8198
CNRS / Université de Lille - Sciences et Technologies

De nombreux travaux de recherche ont étudié les conséquences des changements climatiques sur l'évolution de la biodiversité permettant de proposer un premier bilan des conséquences potentielles à l'échelle du Nord-Pas de Calais. Le premier constat est que dans une telle région, qui a connu des modifications profondes, nombreuses et parfois anciennes de ses paysages, il reste difficile de dissocier les effets du climat des autres composantes de l'action humaine. Néanmoins, il y a des signaux non-ambigus en particulier en domaine marin. Les principales conséquences attendues et visibles sont celles d'un changement de distribution géographique des espèces, changements qui peuvent être scénarisés par l'utilisation de méthode de modélisation des niches écologiques. Ces projections peuvent être réalisées à l'échelle d'une espèce, d'un réseau d'espèces en interaction, ou d'un écosystème. Ces modèles nous amènent à envisager des bouleversements importants dans l'organisation et le fonctionnement des écosystèmes avec des conséquences majeures dans certains secteurs économiques.

Cette partie présente les interventions suivantes :

- Impacts du changement climatique sur les ressources et la biodiversité marines
  *Grégory Beaugrand, Laboratoire d'Océanologie et Géosciences, UMR 8187 CNRS /Université de Lille – Sciences et Technologies & Université du Littoral Côte d'Opale*
  Conférence CERCLE du 3 avril 2015

- Evolutions de la biodiversité en Nord-Pas de Calais dans le cadre des changements globaux
  *Nina Hautekèete, Unité Evolution-Ecologie-Paléontologie – UMR 8198 CNRS / Université de Lille - Sciences et Technologies*
  Conférence CERCLE du 12 décembre 2013

- Impacts du réchauffement climatique récent sur la flore forestière
  *Jonathan Lenoir, Laboratoire Ecologie et DYnamique des Systèmes Anthropisés, Université d'Amiens*
  Conférence CERCLE du 12 décembre 2013

- Impacts des aires de répartition des agents pathogènes des frênes
  *Eric Goberville, The Laboratory, Sir Alister Hardy Foundation for Ocean Science, Plymouth*
  Conférence CERCLE du 3 avril 2015

# Impacts du changement climatique sur la biodiversité marine et les ressources exploitées

Grégory BEAUGRAND

Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, station marine de Wimereux, UMR 8187 CNRS / Universités de Lille – Sciences et Technologies et Université du Littoral Côté d'Opale

Depuis le début des observations instrumentales, vers 1880, la planète a connu une augmentation de la température globale de 0,9 degrés en deux phases, la première dans les années 1920-1940 et la deuxième après les années 1970. Les projections pour la fin du siècle sont pessimistes puisque l'on pourrait avoir au minimum 1 degré, mais vraisemblablement 4 voire 5 degrés d'augmentation de la température globale. C'est la différence entre une période glaciaire et une période interglaciaire.

Lors du dernier maximum glaciaire il y a 20 000 ans, nous avions, sous nos latitudes, des steppes ou une toundra arctique. 20 000 ans plus tard, après une augmentation de 4 à 5 degrés de la température, nous avons un changement radical du paysage de notre planète. Sous nos latitudes, l'écosystème naturel actuel est une forêt de feuillus. Il a fallu 5 000 ans pour que le réchauffement observé entre le dernier maximum glaciaire et l'holocène prenne place. Or nous pourrions, en un siècle ou deux, subir un réchauffement de la même amplitude, qui aurait donc des conséquences majeures en termes de biodiversité et de services écosystémiques.

Notre océan est une composante essentielle du système climatique : il couvre 71 % de la surface terrestre et a absorbé 90 % du réchauffement. Comme le milieu terrestre, il est constitué d'une mosaïque d'écosystèmes structurée en biomes, en provinces, le plus souvent en équilibre avec le régime climatique.

**L'importance de l'océan pour la vie sur terre et les services écosystémiques.** L'importance de l'océan pour la régulation du cycle du carbone planétaire peut être illustrée par les falaises de Douvres, que l'on peut observer de Wimereux, des falaises de craie composées de restes de foraminifères, organismes planctoniques marins. Ces falaises de craie ont capté du $CO_2$ atmosphérique lorsque le calcaire s'est déposé. De même, l'essence des véhicules est du plancton marin fossilisé, donc du carbone biogénique, du $CO_2$ qui a été pris depuis l'atmosphère et piégé dans les sédiments. L'atmosphère primitive était autrefois composée principalement de dioxyde de carbone. Elle est actuellement composée de 21 % d'oxygène grâce aux cyanobactéries marines. Cela a permis en l'occurrence la formation de la couche d'ozone stratosphérique qui a permis l'établissement de la vie sur Terre.

La biodiversité est également une source incroyable de nouveaux médicaments. De l'aiguillat commun, un requin que l'on trouve dans le Nord - Pas de Calais, on extrait la scolamine, un antibiotique très puissant contre le staphylocoque doré. D'un organisme tel que l'Arthropode Chélicérate, on peut extraire le Limulus Amébocyte Lysate (LAL), qui permet de détecter la

présence d'endotoxines dans les vaccins ou les médicaments et d'éviter les septicémies. D'une éponge marine (*Cryptitethya crypta*), on extrait la spongouridine, qui a servi de modèle pour la synthèse de l'AZT (azydothymidine) utilisé pour traiter les personnes atteintes du Sida. L'ensemble des services écosystémiques marins est évalué entre 16 et 54 trillions par an, soit environ deux fois le produit brut global. Ce sont les écosystèmes côtiers qui sont les plus productifs, environ 4 000 $ américains par hectare et par an. Dans le monde, 80 millions de tonnes de poissons marins sont exploitées par an, dont 4 millions de tonnes en Manche, Mer du Nord, ce qui représente 5 %.

**Comment la biodiversité va-t-elle se réorganiser dans le contexte du changement climatique ?** Les exemples qui apparaissent dans cette courte présentation utilisent trois outils méthodologiques complémentaires : la théorie biologique, l'observation et la scénarisation de l'évolution des systèmes biologiques. Grâce à la théorie écologique, biogéographique, bioclimatique, biologique, nous pouvons reconstruire la biodiversité superficielle de l'environnement marin (Figure 1). Notons que la biodiversité est fortement corrélée aux données d'observation de foraminifères, de crustacés, de poissons et cétacés.

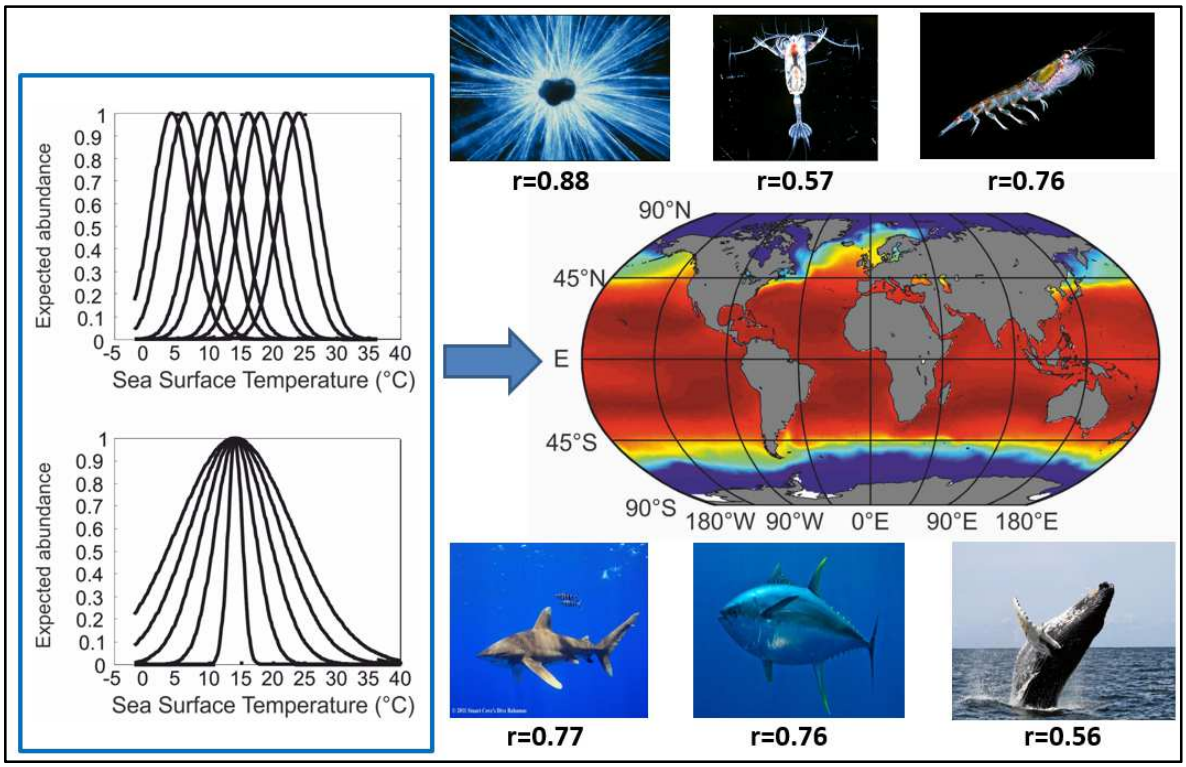



*Figure 1 : Reconstruction théorique de la biodiversité superficielle océanique et corrélations avec les observations actuelles. Source : Beaugrand et al., Global Ecology and Biodiversity, 2013, Beaugrand et al., Nature Climate Change, 2015.*

Il s'agit ici d'une reconstruction contemporaine mais la méthode permet aussi de voir dans le passé, lors du dernier maximum glaciaire par exemple, quelle était la biodiversité (Figure 2). En comparant les prédictions avec la biodiversité observée, et avec les foraminifères contenus dans les carottes sédimentaires, on détermine des indicateurs de biodiversité. La biodiversité actuelle est plutôt bien corrélée avec la biodiversité observée. Si on réalise la même opération pour le pliocène moyen, on a une bonne corrélation également.

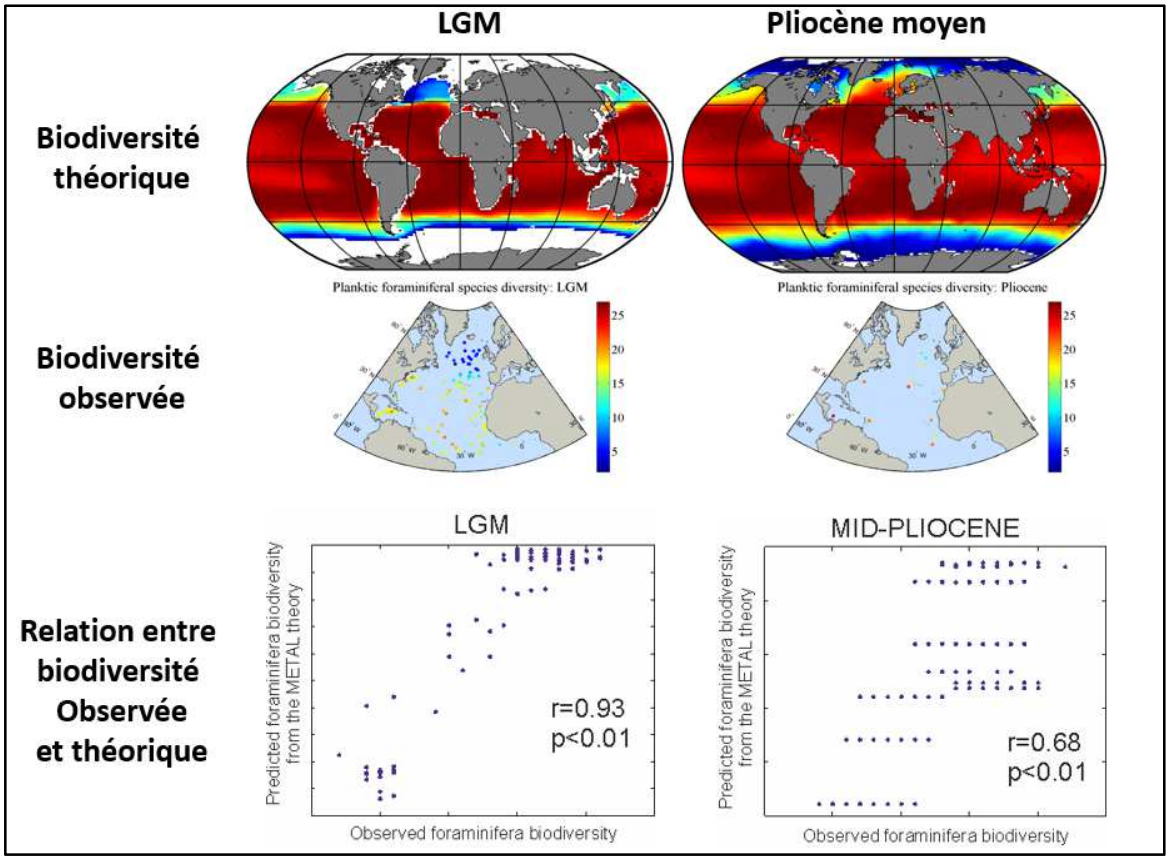



*Figure 2 : Reconstructions théoriques de la biodiversité pélagique (foraminifères) pour l'actuel et le Pliocène moyen. Source : Beaugrand et al., Nature Climate Change, 2015.*

Pourquoi le pliocène moyen ? Cette période du passé (il y a 3,3 millions d'années) est considérée comme un analogue proche de l'environnement que nous pourrions avoir d'ici la fin du siècle. Le taux de $CO_2$ était alors de 400 ppmv (parties par million en volume). En février 2015, le taux de $CO_2$ à Mauna Loa a atteint 400 ppmv. Au pléistocène, la position des continents était très proche de l'actuelle, mais la température globale était de 2 à 3 degrés plus chaude qu'elle n'est aujourd'hui, et le niveau de la mer était supérieur de 25 m par rapport à l'actuel. Le climat était alors dans un état d'équilibre ; actuellement, nous ne sommes pas encore dans un état d'équilibre. Les températures extra-tropicales étaient 10 à 20 degrés plus chaudes qu'aujourd'hui et nous avions également un phénomène El Niño permanent qualifié d'El Padre.

**On peut reconstituer la biodiversité du passé mais également estimer la biodiversité future d'ici la fin du siècle et les différences par rapport à la biodiversité actuelle** (Figure 3). Dans les régions tropicales, en permanence stratifiées, on peut s'attendre à une érosion de la biodiversité. En revanche, dans les régions extra-tropicales, la biodiversité va augmenter, par réorganisation, sans création d'espèces. Actuellement, nous avons une érosion massive de la biodiversité, au niveau planétaire ; la réorganisation attendue dans les régions extra-tropicales ne va pas la compenser, c'est simplement une **réorganisation de la biodiversité**.

Pour la fin du siècle, si le réchauffement est important, entre 78 et 95 % de la superficie totale des océans pourrait subir des modifications significatives, supérieures à la variabilité naturelle pour la période 1960-2013. Certes l'incertitude est énorme sur nos prédictions, mais il existe un patron de variabilité sur ces incertitudes. Si le réchauffement est faible (conforme à un scénario de type RCP 2.6), 42 % de la superficie des océans risque d'avoir des changements significatifs, à plus ou moins 26 % ; l'incertitude est importante. En revanche, si le réchauffement est très fort, de type RCP 8.5, c'est 92 %, plus ou moins 9 %, **l'incertitude diminue donc avec l'intensité du réchauffement** (Figure 3).

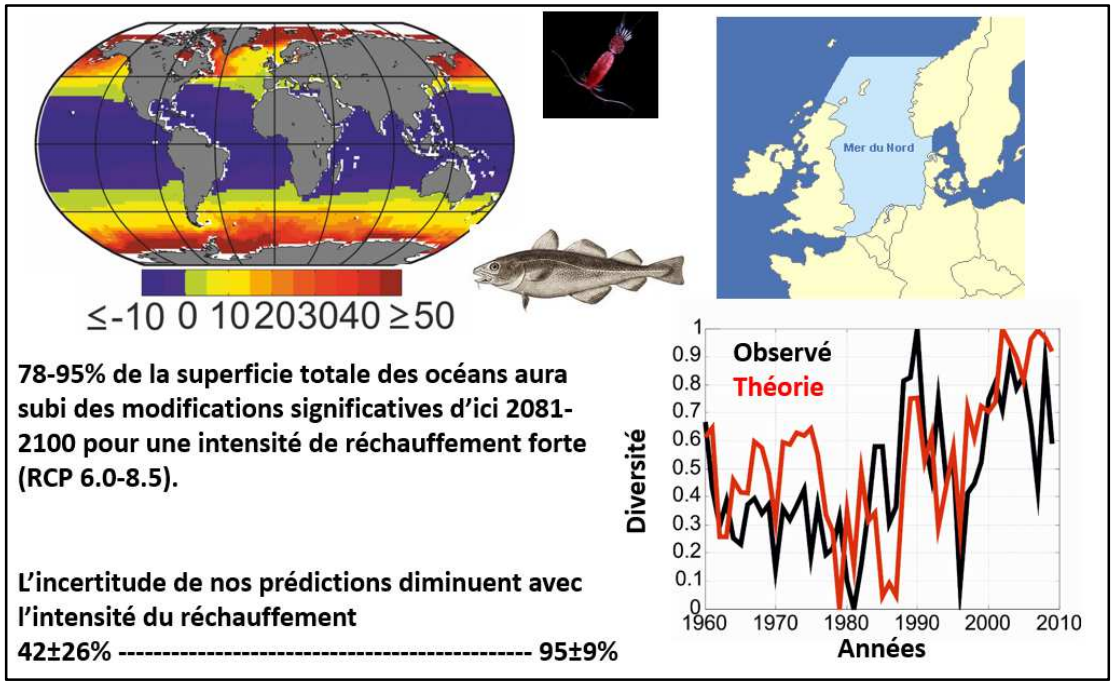



*Figure 3 : Changements de la biodiversité océanique prédits pour la fin du XXI$^{ème}$ siècle, et comparaison avec les observations en Mer du Nord. Source : Beaugrand et al., Nature Climate Change, 2015.*

Pour le scénario RCP 2.6, correspondant à une augmentation de la température globale d'environ 2 degrés voire moins, nous aurions au total peu de changement significatif dans le milieu marin, à l'exception des mers nordiques. Pour un scénario de réchauffement moyen du type RCP 4.5, nous envisageons des changements de biodiversité au moins trois fois plus fréquents que pour la période 1960-2013 et deux à trois fois plus importants en termes d'amplitude. Pour des scénarios très forts de réchauffement RCP 6.0 ou 8.5, entre 50 et 70 % de la superficie océanique mondiale pourrait montrer des changements supérieurs à ce que nous avons observé entre le dernier maximum glaciaire et actuellement ou entre le pliocène moyen et actuellement (Figure 4). Ce n'est ni du pessimisme, ni de l'optimisme, c'est un fait.

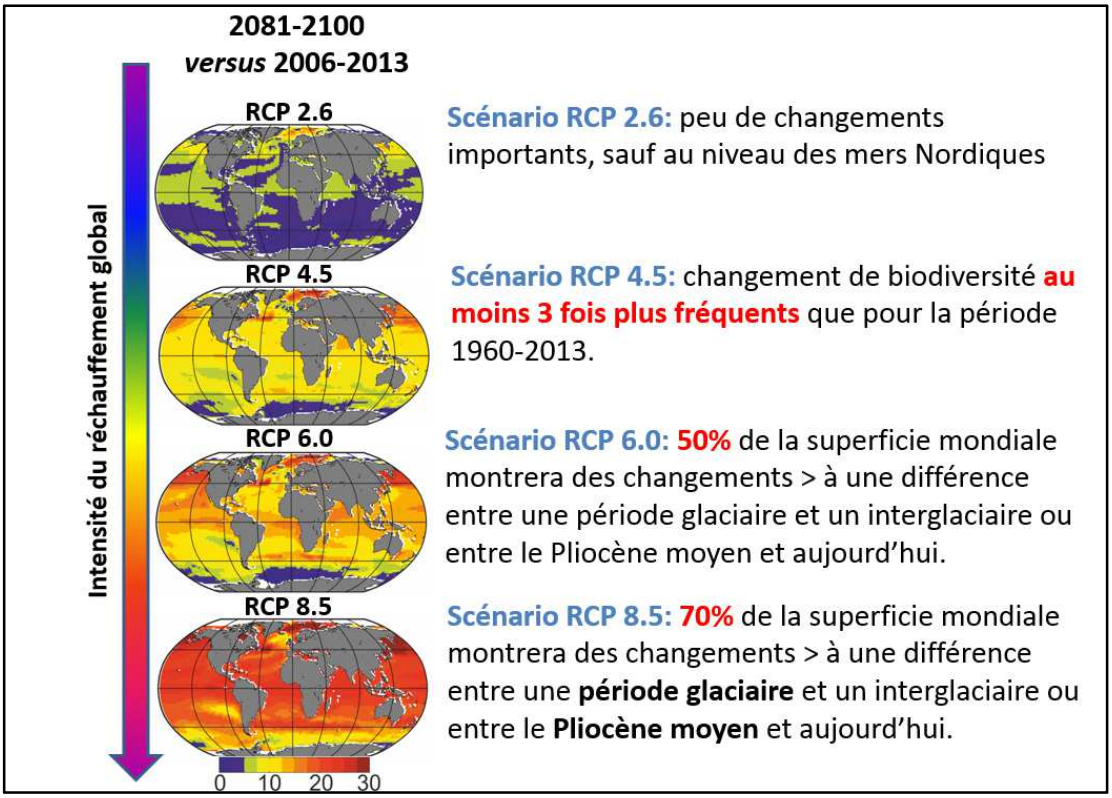



*Figure 4 : Changements de la biodiversité océanique prédits pour la fin du XXIe siècle, selon l'intensité du réchauffement global (scénarios RCP du GIEC). Source : Beaugrand et al., Nature Climate Change, 2015.*

**A des échelles régionales, la théorisation appuyée sur les observations permet de prédire le devenir d'espèces individuelles**, par exemple dans l'Atlantique nord et la Mer du Nord.

On dit le plancton calcaire menacé par l'effet de l'acidification. C'est un fait mais, actuellement, le planton calcaire dans l'océan Atlantique nord-est réagit positivement à l'augmentation des températures (Figure 5). On constate un parallélisme étroit entre les variations de la température et celles de l'abondance du plancton calcaire.

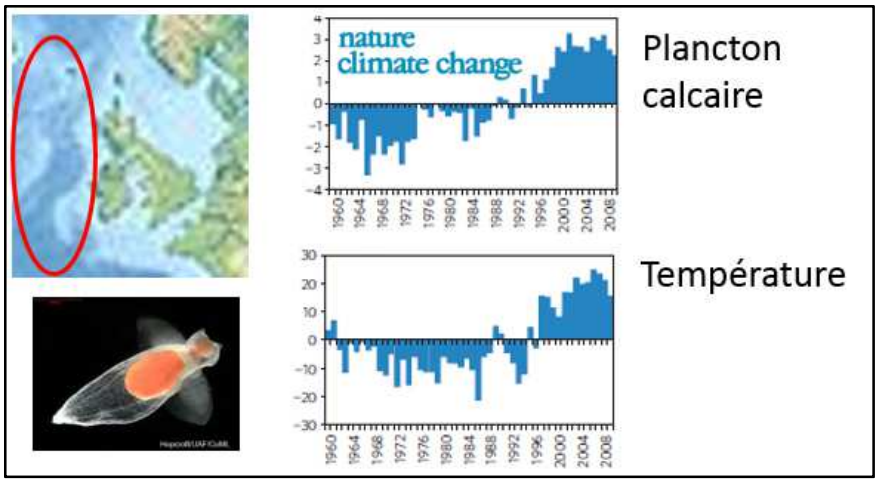



*Figure 5 : Evolution parallèle de la température et de l'abondance du plancton calcaire dans l'Atlantique nord. Source : Beaugrand et al., Nature Climate Change, 2013.*

99,9 % des organismes vivants sur notre planète sont ectothermes, c'est-à-dire qu'ils ont la température de leur environnement et que leur métabolisme est contraint par la température. Ils ne pourront donc pas véritablement s'adapter au réchauffement des températures, au moins comme les espèces endothermes.

En Mer du Nord, la reconstruction théorique et les observations concordent (Figure 3, en bas à droite). On observe une **augmentation de la biodiversité observée, pour les crustacés marins comme pour les poissons**. Il s'agit d'une **réorganisation de la biodiversité sensible depuis le début des années 1980, avec une remontée des espèces thermophiles**. Les espèces caractérisant les eaux chaudes progressent vers le nord et, associée à ce mouvement, nous avons une diminution dans le nombre d'espèces caractérisant les eaux froides, que nous appelons les psychrophiles. Or, les espèces thermophiles étant plus nombreuses que les espèces psychrophiles, le bilan a été une augmentation de la biodiversité. L'ensemble de la mer du Nord s'est réorganisé : on est passé d'un écosystème à un autre. Ce changement de régime fait suite à une augmentation de 1 degré de la température moyenne annuelle observée en mer du Nord.

Cela n'est pas forcément une bonne chose pour le fonctionnement de l'écosystème puisque l'augmentation de la biodiversité s'est **accompagnée d'un nanisme adaptatif**, c'est-à-dire que les organismes sont plus petits. Cela peut avoir des effets notables sur le cycle du carbone, mais aussi sur certaines espèces commercialement exploitées. Par exemple, nous avons une relation négative entre la biodiversité et les probabilités d'occurrence de la morue. **Plus la biodiversité augmente, moins la morue survit dans l'écosystème.** Pourquoi ? La taille des organismes diminue. Les larves de morue nécessitent des proies énergétiques. Nous avons donc, à cause des proies moins énergétiques une réduction de la survie des larves de morue.

La scénarisation permet d'essayer de voir comment le système biologique va changer dans les décennies à venir, indépendamment des effets de l'exploitation par les activités de pêche. La distribution spatiale de la morue devrait ainsi connaître des changements importants, même dans le cas d'un réchauffement modéré : on devrait observer une diminution de la probabilité d'occurrence de la morue en mer du Nord, c'est-à-dire l'abondance attendue, et son augmentation en mer de Barents, au nord de la Norvège. La distribution actuelle de la coquille Saint-Jacques serait aussi fortement modifiée (Figure 6). Pour la moitié du siècle, on entrevoit un début de contraction de son aire de répartition en Manche. **Si le réchauffement se poursuit, on peut penser que l'abondance de la coquille Saint-Jacques en Manche risque de fortement diminuer d'ici la fin du siècle, si elle ne s'adapte pas**.

Des espèces vont disparaître, mais d'autres vont les remplacer. C'est le cas de l'anchois, actuellement présent essentiellement en Atlantique et en Méditerranée. Pour un scénario de réchauffement important, de type RCP 8.5, on pourrait avoir des anchois en quantité importante dans la moitié sud de la mer du Nord. Nous avons le même résultat pour la sardine. Pour la sole, actuellement abondante en Manche et Mer du Nord, c'est différent. Elle va dans un premier temps augmenter mais, si le réchauffement se poursuit, elle risque ensuite de diminuer.

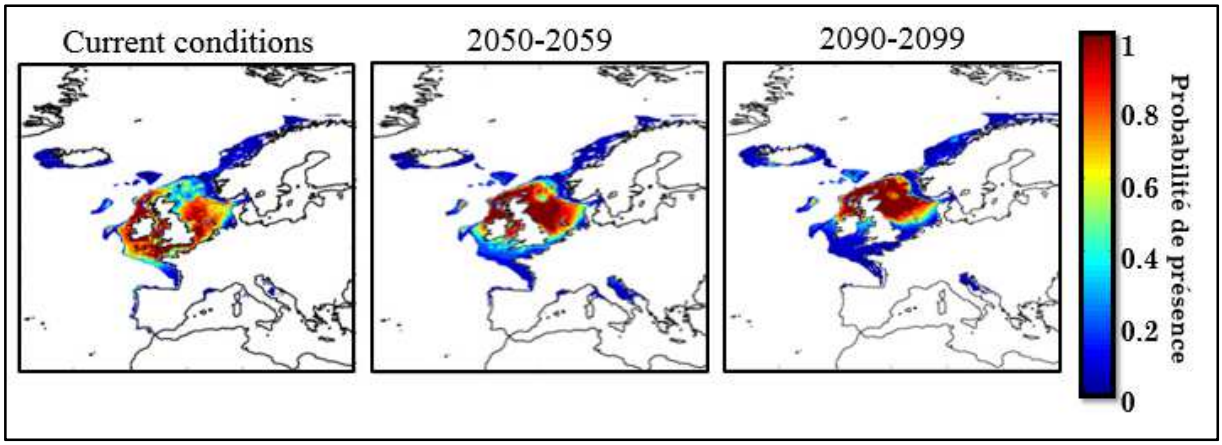



*Figure 6 : Changements de la distribution de la Coquille Saint-Jacques au cours du XXI*ème *siècle pour un scénario de changement climatique de type SRES A2.*
*Source : Rombout, Beaugrand, Dauvin, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2012.*

En conclusion, nous comprenons beaucoup mieux les réponses de la biodiversité face au changement climatique. Cette meilleure compréhension est liée au programme de suivi de l'environnement marin. Il est essentiel, et même crucial, de poursuivre ces programmes d'observation, de les étendre, de les standardiser d'un pays à l'autre. L'absence de programme de suivi adapté risque de devenir un facteur limitant dans les prochaines années. Théoriser les effets du climat sur la biodiversité est également important, en lien étroit avec les observations. Les théories qui commencent à être esquissées permettront de mieux comprendre et anticiper les effets du changement climatique sur la biodiversité marine et les services écosystémiques.

**Références :**

Beaugrand, G., McQuatters-Gollop, A., Martin E., Goberville, E., 2012. Long-term responses of North Atlantic calcifying plankton to climate change. *Nature Climate Change* 3, p. 263–267.

Beaugrand, G., Rombouts, I., Kirby, R.R., 2012. Towards an understanding of the pattern of biodiversity in the oceans. *Global Ecology and Biogeography*, 22 (4), p. 440–449.

Beaugrand, G., Edwards, M., Raybaud, V., Goberville, E., Kirby, R.R., 2015. Future vulnerability of marine biodiversity compared with contemporary and past changes. *Nature Climate Change*.

Rombouts I., Beaugrand, G., Dauvin, J.-C., 2012. Potential changes in benthic macrofaunal distributions from the English Channel simulated under climate change scenarios. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 99 (1), p. 153–161.

# Evolutions de la biodiversité en Nord - Pas de Calais dans le cadre des changements globaux

Nina HAUTEKEETE

Unité Evolution-Ecologie-Paléontologie (EEP) UMR 8198
CNRS / Université de Lille - Sciences et Technologies

Le climat est un des facteurs majeurs déterminant la répartition des espèces à l'échelle mondiale. En découlent des groupements d'espèces répartis géographiquement que l'on appelle des « grands biomes ». En raison de cette relation espèce-climat, il est probable que la distribution géographique de ces biomes sera modifiée par les changements climatiques, comme elle l'a été par exemple lors du dernier grand bouleversement climatique du Pléistocène. Mais les réponses ne pourront pas être homogènes : on peut poser l'hypothèse qu'une espèce méditerranéenne pourra suivre le déplacement Sud-Nord de sa niche climatique mais qu'adviendra-t-il des espèces sibériennes ?

On peut envisager différents types de réponses face aux modifications environnementales profondes provoquées par le changement climatique :

- Des réponses adaptatives non génétiques, que l'on qualifie de plasticité phénotypique,
- Des réponses adaptatives impliquant une évolution génétique,
- Un déplacement de l'aire de distribution de l'espèce vers les pôles.

Reste la probabilité, non négligeable, que les espèces ne changent pas assez vite ou ne se déplacent pas suffisamment vite ou n'arrivent pas à le faire ; elles pourraient alors éventuellement s'éteindre.

### Les observations à l'échelle mondiale des effets du changement climatique sur la biodiversité

A l'échelle planétaire, les effets du changement climatique se traduisent de plusieurs manières. On observe un avancement de tous les signaux du printemps pour la faune et la flore, tels que la date de reproduction ou de migration. On trouve dans la littérature des réponses très majoritairement non génétiques mais on peut également observer des cas d'évolution génétique. On constate également des cas de déplacement des aires de distribution vers les pôles qui vont, en moyenne, de 6 à 25 kilomètres par décennie selon les études et les régions (Parmesan, 2003). Parmi les groupes les plus mobiles, les libellules se déplacent d'environ 50 à 100 kilomètres en moyenne par décennie.

A une échelle plus locale, des changements d'abondance des espèces en fonction de leurs besoins climatiques sont constatés. Le schéma (Figure1) montre ces changements sur une période de 1980 à 2005. L'abondance des espèces qui ont des besoins thermiques faibles, donc plutôt froids (en bleu) est en diminution alors que l'abondance des espèces qui ont des besoins thermiques élevés (en rouge) est en augmentation.

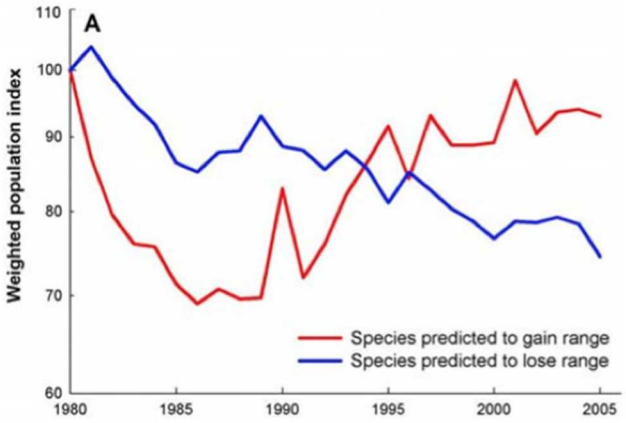



*Figure 1 : Evolution de l'abondance des oiseaux européens aux besoins thermiques faibles et élevés entre 1980 et 2005 (d'après Richard et al. 2009)*

**Les paramètres nécessaires sont manquants ou erronés.**

Au-delà du changement climatique récent, d'autres composantes du changement global ont déjà, depuis des décennies, des impacts non négligeables sur la biodiversité, en particulier, la destruction des habitats et le changement d'usage des sols. La carte de la Figure 2 présente les grands biomes évoqués plus haut. Sont indiqués en gris clair, jaune clair, vert clair, les biomes qui sont encore assez naturels. Tous les autres, qu'ils soient verts foncés, roses, bleus ou violets, sont des habitats très fortement marqués par les activités humaines que l'on appelle maintenant des anthromes, des biomes anthropisés. 75 % des terres émergées à l'échelle du globe sont considérés comme des anthromes, et à l'échelle de l'Europe, ils couvrent à peu près 100 % des terres émergées.

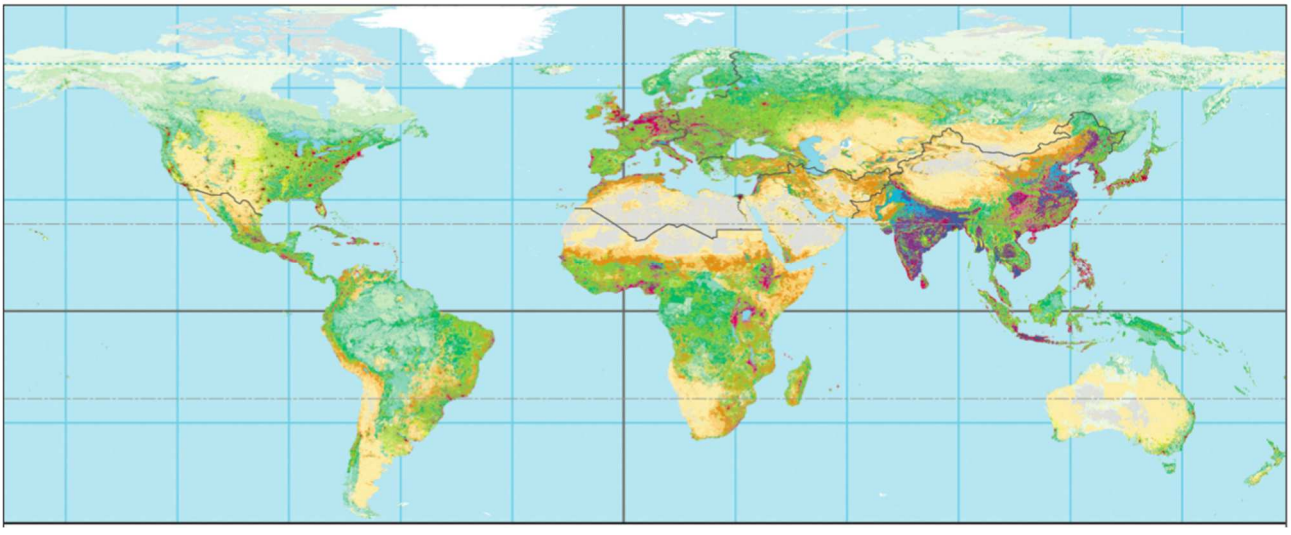


*Figure 2 : Carte des grands biomes*

**Dans les habitats anthropisés s'expriment d'autres composantes du changement global.**

1- La perte d'habitat et la fragmentation. La réduction de surface et la fragmentation des habitats sont actuellement les principales causes d'extinction de la biodiversité. Par exemple, la réduction de surface des forêts à l'échelle planétaire est un enjeu écologique majeur, aussi bien en termes d'émissions de gaz à effet de serre que de pertes de biodiversité. Il existe une relation positive entre la surface d'un habitat, et sa diversité en espèces, en particulier en espèces végétales. Donc s'il y a une diminution de la surface, il y a une diminution de la diversité en espèces.

La fragmentation traduit la division de l'espace forestier en une multitude de petites forêts isolées les unes des autres. Cette notion n'implique pas nécessairement une diminution de la surface globale de l'habitat, mais ce sont les effets de barrière qui comptent. Destruction des habitats et fragmentation ont des conséquences bien connues sur les espèces. Les populations sont plus petites et isolées les unes des autres, en raison du faible nombre d'individus, la diversité génétique s'amoindrit, accentuée par la diminution des échanges génétiques entre populations liée à la diminution des déplacements d'individus ou de graines d'une population à l'autre.

Les espèces en populations fragmentées seront confrontées à des problèmes de dérive génétique, des problèmes de consanguinité et l'isolement des individus rend parfois impossible leur reproduction. Elles entrent de fait dans une spirale d'extinction, c'est à dire un cercle vicieux irréversible : la diminution de l'effectif de l'espèce entraine des problèmes génétiques qui affectent la démographie et accentuent le déclin démographique.

2- L'intensification agricole et l'eutrophisation. Dans les habitats anthropisés, l'eutrophisation, liée aux apports d'engrais ou aux retombées atmosphériques d'azote, diminue la richesse en espèces que ce soit pour des habitats naturels ou des espaces cultivés. Il s'agit aujourd'hui d'un effet majeur en particulier dans l'Eurorégion qui affecte non seulement les espèces rares mais aussi globalement l'ensemble des espèces animales et végétales. L'intensification agricole implique également d'autres pratiques néfastes à la biodiversité : pesticides, monocultures, retournement des prairies et contribue à la fragmentation des habitats.

3- La synergie entre facteurs. Tous ces facteurs agissent en même temps. Les populations sont affectées à la fois par :

- la perte d'habitat,
- la fragmentation,
- l'intensification agricole et les retombées atmosphériques d'azote,
- la surexploitation (pêche, chasse, cueillette),
- éventuellement les incendies dans certaines régions du globe,
- le changement climatique.

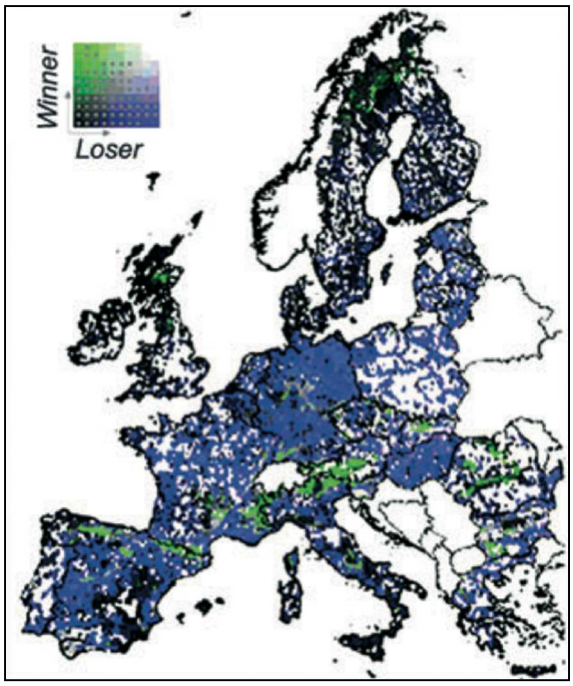



*Figure 3 : Modélisation des habitats des espèces ciblées par la directive « Habitat » (D'après Araujo et al. 2011*

Les modélisations permettent d'aborder la question des changements de surface d'habitat avec le changement climatique en fonction des espèces. La carte en Figure 3 met en évidence l'impact potentiel du changement climatique sur les espèces de l'annexe 2 de la directive habitat, donc des espèces déjà affaiblies par la fragmentation et la perte de surface d'habitat. Les régions présentant une diminution des espaces d'habitat sont en bleu, celles où ces espèces sont gagnantes sont en vert. Les régions gagnantes sont relativement peu nombreuses et donc pour ces espèces déjà fragiles, le changement climatique les fragilisera encore plus. Par ailleurs, ces espèces auront du mal à se déplacer puisque les habitats sont très fragmentés.

### De l'échelle globale à l'échelle locale

Le problème d'échelle est également très important puisque le choix de l'échelle d'étude a des conséquences sur les observations.

A l'échelle mondiale, on voit essentiellement des extinctions. Les chercheurs ont estimé les pertes annuelles de biodiversité à environ une espèce pour 1 000. Cela est très supérieur à la perte de diversité estimée à l'échelle des temps géologiques, et ce, pour différents groupes animaux.

A l'échelle régionale et locale, on observe des patrons tout à fait différents, en particulier en raison de l'apport d'espèces nouvelles qui sont cosmopolites ou qui appartiennent à une autre région du globe et qui viennent s'installer. Elles peuvent parfois perturber largement les écosystèmes comme la Jussie, plante aquatique d'origine sud-américaine qui envahit nos cours d'eau régionaux. Si l'on s'intéresse aux patrons régionaux sur l'ensemble de la planète, on observe des zones avec des pertes d'espèces et des zones avec des gains d'espèces qui peuvent générer des perturbations des écosystèmes.

### Le Nord-Pas de Calais, une région modelée par les activités humaines

La région Nord - Pas de Calais a été largement modelée par les activités humaines. Dès le Pléistocène, la chasse a certainement participé à la destruction des grands herbivores, avec des conséquences sur nos paysages. Il y a eu ensuite l'installation des activités agricoles qui n'ont cessé de s'amplifier depuis la période celte. Le territoire garde encore des traces du cadastre romain des activités agricoles passées.

La végétation potentielle (attendue lorsqu'on considère uniquement les facteurs environnementaux) du Nord - Pas de Calais est potentiellement quasiment entièrement forestière (Figure 4), avec les hêtraies (en bleu) et des chênaies (en vert et marron). Mais les activités humaines ont entrainé un processus de déforestation depuis au moins l'époque celte, conduisant à une surface relative de 9 % de forêt seulement, ce qui est à peu près autant que la surface totale des surfaces imperméabilisées (routes, villes etc.).

Néanmoins, les activités humaines traditionnelles et le déboisement ont été à l'origine de paysages écologiquement très intéressants, avec une forte biodiversité dans certains habitats. Par exemple, les pelouses calcaires à orchidées, entièrement liées à une activité de pâturage extensif généralement ovin et riches en espèces patrimoniales, ou les bocages et leur belle diversité en espèces prairiales, forestières et de lisière.



*Figure 4 : Répartition forestière potentielle en région* Nord-*Pas de Calais (d'après Leguédois et al. 2011, http://cybergeo.revues.org/24688)*

Ces dernières décennies, l'anthropisation s'est fortement accrue avec une augmentation des transports et des échanges, de l'urbanisme, de l'industrie, de l'agriculture intensive.

Pour observer l'influence du changement climatique sur la biodiversité, la grande difficulté est donc de distinguer les conséquences des différentes composantes de ce changement global, alors que ces facteurs sont concomitants. Par exemple, la courbe de l'évolution de la température moyenne globale, montre que cette augmentation s'est accrue depuis les années 1970, tandis que depuis environ la moitié du XX$^{ème}$ siècle, un changement s'est opéré

dans les types et les niveaux de pollution affectant les cours d'eau. Les pollutions les plus anciennes sont organiques, puis à partir de la fin de la Seconde Guerre mondiale, s'ajoute une pollution liée à l'agriculture intensive, par les pesticides et les nitrates. Dans le même temps, se développe le réseau routier et autoroutier. L'ensemble des indicateurs socio-économiques et écologiques montre une accélération des pressions liées à nos activités et de leurs conséquences (Steffen et al. 2015).

Il faut, de plus, composer avec les problèmes de retard de réponse des écosystèmes. Un écosystème perturbé ne répondra pas immédiatement. Ce décalage dans le temps dépend des organismes. Un exemple évident est celui des espèces pérennes à longue durée de vie, comme les arbres, qui ne disparaîtront pas tout de suite. Il s'agit d'un processus progressif, de même les arrivées d'espèces se feront assez progressivement. Cette latence, ou effet retard, complique également la tâche des chercheurs en charge de l'étude de l'impact du changement climatique sur la biodiversité.

### Les changements de biodiversité à l'échelle régionale

A l'échelle régionale, on observe, en particulier, une augmentation de l'indice de température des communautés d'oiseaux. L'augmentation de cet indice signifie qu'il y a une augmentation de l'abondance des espèces qui ont des besoins thermiques élevés. On observe également une désynchronisation de la date de ponte des mésanges par rapport à l'émergence des chenilles indispensables à l'alimentation des poussins. Ce phénomène a été observé aux Pays-Bas. Les mésanges savent très bien calibrer leur date de ponte par rapport aux signaux environnementaux. Mais avec le changement climatique relativement rapide, elles ont de moins en moins la capacité de suivre etne parviennent plus à s'adapter.

En Nord - Pas de Calais, on détecte aussi l'arrivée de nouvelles espèces. Intuitivement, on peut penser que l'arrivée de ces espèces est imputable au changement climatique mais au regard de la concomitance avec d'autres changements anthropiques, il faut confirmer cet effet avec des études plus poussées, en particulier des études statistiques à partir de bases de données. Les bases de données sur le passé récent nous permettront de suivre les changements de faune, de flore, d'environnement en relation avec l'évolution des activités humaines. Il faut pour mener à bien ce type d'analyse, des données standardisées, continues dans le temps. Il est donc indispensable de poursuivre et renforcer la collecte professionnelle de données actuelles et de données historiques qui permet cette collecte standardisée. Enfin, on peut compléter par des réseaux d'observatoires citoyens qui ne donnent pas forcément tout-à-fait les mêmes données.

> Par exemple, la base de données d'observation d'espèces végétales Digitale2, menée par le Conservatoire Botanique National de Bailleul, intègre des données historiques collectées grâce aux herbiers et aux documents, ainsi que des données plus récentes d'inventaires floristiques. Une base de données de traits écologiques et biologiques lui a été adossée (projet ISYFLOR de l'Université Lille1), informée par analyse bibliographique, phénotypage ou mesure sur le terrain.

1 - Qu'observe-t-on avec ce type de base de données ? Depuis 1900, dans un premier temps, on observe une diminution des espèces locales (Figure 5) et dans le même temps, des arrivées d'espèces nouvelles. Au total, il y a une diminution du nombre d'espèces jusqu'à la moitié du XX$^{ème}$ siècle environ, puis une augmentation du nombre d'espèces. Mais d'un habitat à l'autre, les patrons sont très diversifiés. Certains habitats ont subi des pertes majeures d'espèces végétales qui leurs sont typiques. Cette diminution concerne en particulier les végétations d'eaux douces pauvres en nutriments, les landes ou les messicoles, c'est-à-dire les plantes des moissons (telles que les coquelicots ou les bleuets, beaucoup moins fréquentes qu'auparavant, et accompagnées de bien moins d'espèces). A l'opposé, certains habitats gagnent des espèces, comme par exemple, les habitats anthropisés, de même pour l'habitat littoral.

L'ensemble de ces informations, gains comme pertes, traduisent probablement les effets de changements globaux liés aux usages des sols (tels que l'intensification agricole et l'eutrophisation, l'extension urbaine, les échanges routiers, la fragmentation, etc.).

2-Peut-on détecter un effet du changement climatique sur la biodiversité régionale ?

L'indice thermique des espèces végétales est une manière de mesurer leur besoin en chaleur. Suivre les changements dans la proportion d'espèces ayant des besoins thermiques élevés permet d'aborder la question des conséquences du changement climatique sur les espèces. On s'attend à ce que cette proportion augmente ou qu'elle soit forte dans les espèces immigrantes.

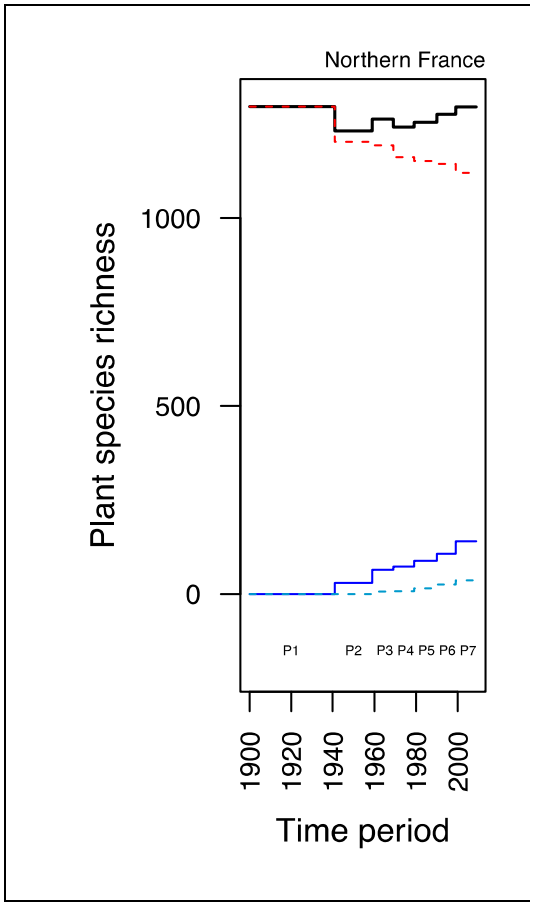



*Figure 5 : Changements de biodiversité dans le Nord de la France.*
*Ligne rouge pointillée = nombre d'espèces présentes lors de la première période P1; une diminution représente les extinctions régionales;*
*Ligne bleue = nombre d'espèces immigrantes (c.-à-d. naturalisées après P1);*
*Pointillé bleu clair = retours, c'est à dire nombre d'espèces avec succès de réinstallation après une extinction locale;*
*Ligne noire = richesse en espèces totale.*

*Périodes: P1 = 1900-1940; P2 = 1941-1958; P3 = 1959-1968; P4 = 1969-1978; P5 = 1979-1989; P6 = 1990-1998 et P7 = 1999 à 2009.*
*(D'après Hautekèete et al. 2014)*

L'indice thermique pour l'ensemble des espèces végétales présentes depuis le début du XX$^{ème}$ siècle en Nord - Pas de Calais est plutôt constant (Figure 5). En revanche, pour les espèces nouvellement arrivées (de 10 à 45 espèces nouvelles sont arrivées par décennie), il y a à peu près deux fois plus d'espèces qui ont besoin de températures élevées (dites thermophiles) que dans le lot d'espèces constantes. Quelle que soit la période depuis le début du XX$^{ème}$ siècle, il est arrivé plus d'espèces thermophiles que les espèces normalement présentes dans la région. Un signal climatique fort, aurait dû se traduire par une augmentation de la proportion d'espèces thermophiles uniquement sur les deux dernières périodes. Il y a donc un effet supplémentaire. Il faut envisager dans ce cas un effet « neutre », il y a plus d'espèces au sud de la région que d'espèces au nord de la région, le potentiel d'immigration est donc plus important à partir du sud de la région. Statistiquement, nous avons donc plus de chances d'avoir des espèces thermophiles qui arrivent dans la région.

Ces résultats montrent l'importance à la fois d'une approche multi- échelle des études sur l'impact du changement climatique et la nécessité de mettre en place des expérimentations sur le long terme pour mieux comprendre ce qui se passe sur le territoire. Il est nécessaire non seulement de mettre en place des suivis de la biodiversité en Nord - Pas de Calais, mais aussi de réaliser des suivis de phénologie, par exemple de dates de floraison sur des espèces modèles et/ou d'étude de changements génétiques sur ces espèces. Nous pouvons également envisager d'autres types d'expériences à long terme comme le suivi de communautés expérimentales d'espèces pour voir celles qui peuvent disparaître, ou au contraire s'étendre.

3- Les besoins en modèles de prédiction de déplacement de niches. Le déplacement des aires de distribution vers les pôles et en altitude est une des conséquences attendues du réchauffement global du climat. Les modèles de niches, c'est-à-dire de la zone climatique qui convient à l'espèce, permettent d'imaginer les changements de distribution géographique qu'une espèce pourrait effectuer sous l'effet du changement climatique. Ce n'est pas forcément ce qu'elle va faire mais c'est un des scénarios envisageables. Les déplacements dépendront évidemment des capacités de dispersion de l'espèce et du degré de fragmentation du paysage. Dans l'exemple présenté Figure 6, le bouleau nain (*Betula nana*) est actuellement très présent en Scandinavie. Le déplacement vers le Nord de l'aire de distribution de cette espèce sub-boréale est limité par la présence de terres émergées au-delà de la Scandinavie. En conséquence, en 2090, son territoire sera peut-être réduit à la portion congrue.

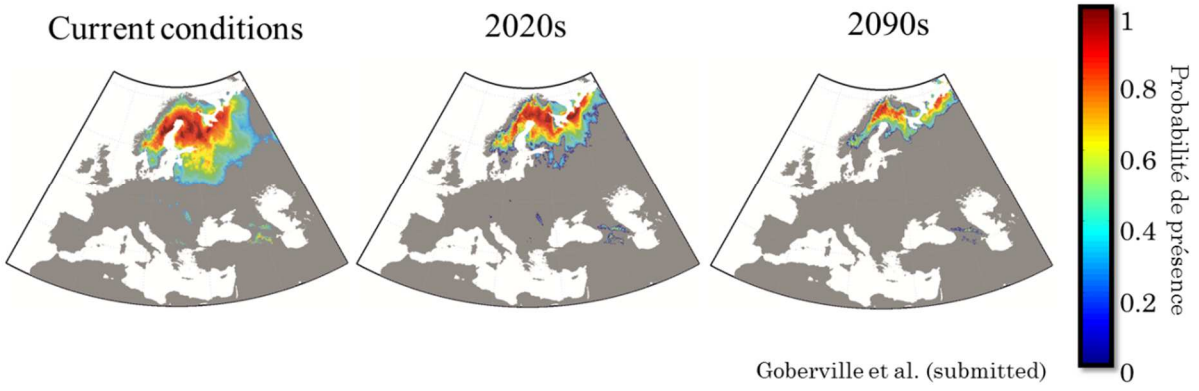



*Figure 6 : Modélisation du déplacement de l'espèce Betula Nana d'aujourd'hui à 2090. (D'après Goberville et al. 2015)*

Avec ce type d'études, on peut voir si un territoire comme le Nord - Pas de Calais sera affecté ou potentiellement affecté par des déplacements d'espèces, engendrant des pertes d'espèces ou des gains. Pour cela, il faut gérer les incertitudes. Par exemple, pour le modèle de distribution de *Betula nana*, de nombreux modèles de circulation mondiale des masses d'air et des modèles de prédiction du climat ont été utilisés. Les travaux de recherche montrent qu'il existe une très grosse variation des prédictions selon les modèles utilisés. Les modèles de circulation influent autant que le pessimisme ou l'optimisme du scénario climatique utilisé. Gérer les incertitudes est donc extrêmement important car il est difficile de faire des prédictions sans évaluer les incertitudes.

Il apparaît nécessaire également de créer des modèles de prédiction à l'échelle de la gouvernance et donc à une échelle plus locale en développant des méthodes de travail de type downscaling (descente d'échelle) afin de comprendre ce qui peut arriver à une espèce sur un territoire donné.

4- La compréhension des réseaux entre espèces. Nous avons également une mauvaise connaissance de ce qui peut se passer dans un réseau d'espèces. En effet, les espèces sont constamment en interaction entre elles dans les écosystèmes et il est encore difficile de prévoir les conséquences soit d'une perte d'une espèce parmi les espèces en interaction, soit de l'arrivée d'une nouvelle espèce ou, a fortiori, d'un taux élevé de remplacement d'espèces par d'autres. De même il est difficile de prédire les conséquences d'un changement pour la date de floraison d'une plante sur les communautés d'insectes pollinisateurs qui assurent sa reproduction.

Alors que les pertes de biodiversité sont majeures et nous ont d'ores et déjà fait entrer dans la 6ème extinction, il est essentiel de nous interroger sur les impacts d'un changement de biodiversité sur les écosystèmes et sur les sociétés humaines, qui en dépendent entièrement.

### Références bibliographiques


Araujo, M.B., Alagador, D., Cabeza, M., Nogués-Bravo, D., Thuiller, W., 2011. Climate change threatens European conservation areas. *Ecology Letters*, 14, p. 484–492.

Parmesan, C., Yohe, G., 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature.* 421, p. 37–42.

Hautekèete, N.-C., Frachon, L., Luczak, C., Toussaint, B., Van Landuyt, W., Van Rossum F., Piquot, Y., 2015. Habitat type shapes long-term plant biodiversity budgets in two densely populated regions in north-western Europe. *Diversity and Distributions*, 21, p. 631-642.

Goberville, E., Beaugrand, G., Hautekèete, N.-C., Piquot, Y., Luczak, C., 2015. Uncertainties in the projection of species distributions related to general circulation models. *Ecology and Evolution.*

Gregory, R.D., Willis, S.G., Jiguet, F., Vorisek, P., Klvanova, A., van Strien, A., Huntley, B., Collingham, Y.C., Couvet, D., Green, R.E., 2009. An Indicator of the Impact of Climatic Change on European Bird Populations. *PLoS ONE*, 4 : e4678.

Will, S., Broadgate, W., Deutsch, L., Gaffney, O., Ludwig, C., 2015. The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. *The Anthropocene Review,* p. 1–18.

# Impacts du réchauffement climatique récent sur la flore forestière ; comparaison forêts de plaine et forêts de montagne

Jonathan LENOIR

Unité de Recherche « Ecologie et dynamique des systèmes anthropisés »
Université de Picardie Jules Verne

Les modifications observables dans la flore forestière ne sont pas toutes attribuables aux seuls changements climatiques. D'autres facteurs, fort nombreux, interviennent et se conjuguent au réchauffement comme décrit dans le texte de Nina Hautekèete. Un enjeu important est de détecter les corrélations possibles entre les facteurs de changement et de comprendre leur impact respectif ou l'impact des facteurs en synergie.

## Le contexte climatique

La Figure 1 présente la variation de la température moyenne annuelle en France entre deux périodes de vingt années centrées sur 1975 et 2005, c'est à dire en 30 ans.

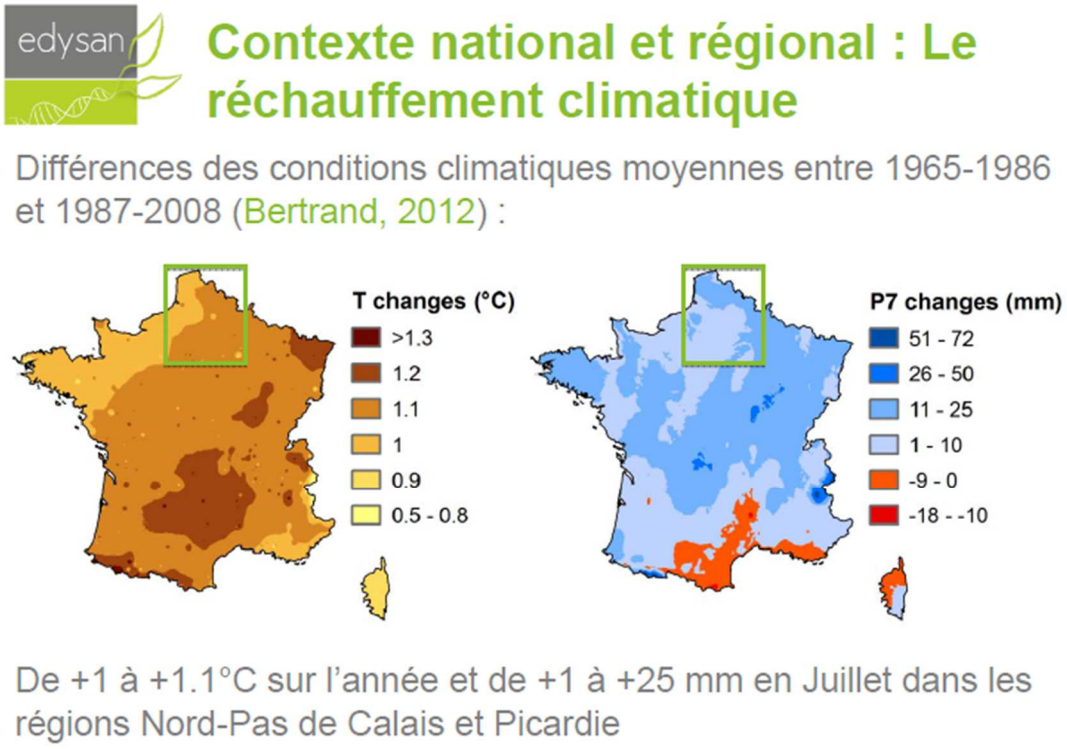



*Figure 1 : Changements climatiques entre les périodes 1965-1986 et 1987-2008 (D'après Bertrand, 2012)*

Globalement, sur l'ensemble du territoire, les anomalies thermiques sont partout positives. Certaines zones présentent un réchauffement un peu plus important que d'autres (couleurs plus brunes), notamment le Massif Central, l'Est de la France ou les Pyrénées mais le

réchauffement est général. Pour les précipitations (partie droite, pour le mois de juillet), la situation est beaucoup plus disparate, avec des anomalies positives dans certaines régions et des anomalies négatives dans d'autres régions, en particulier dans les régions méditerranéennes. Dans ces régions, les précipitations diminuent pendant les périodes estivales tandis qu'on note pour le reste de la France, une augmentation sensible de l'ordre de 50 mm dans certaines zones.

Pour les régions Nord – Pas de Calais et Picardie, l'augmentation de la température moyenne annuelle est voisine de 1 degré, avec un gradient positif de la côte vers l'intérieur. Les précipitations, en juillet augmentent de +1 à +10 mm dans le sud de la région alors que le Nord de la région se situe dans la classe supérieure, entre +10 et +25 millimètres.

### Le contexte forestier

Au niveau régional, le taux de boisement est très faible, surtout en Nord – Pas de Calais avec moins de 10% du territoire boisé. La Figure 2 montre la carte du taux de boisement pour la période 2008 - 2012 d'après l'Inventaire Forestier National (IGN-IFN). On constate que le taux de boisement est surtout important dans les régions de montagne, à l'exception peut-être du bassin aquitain et du plateau lorrain qui sont des régions forestières.

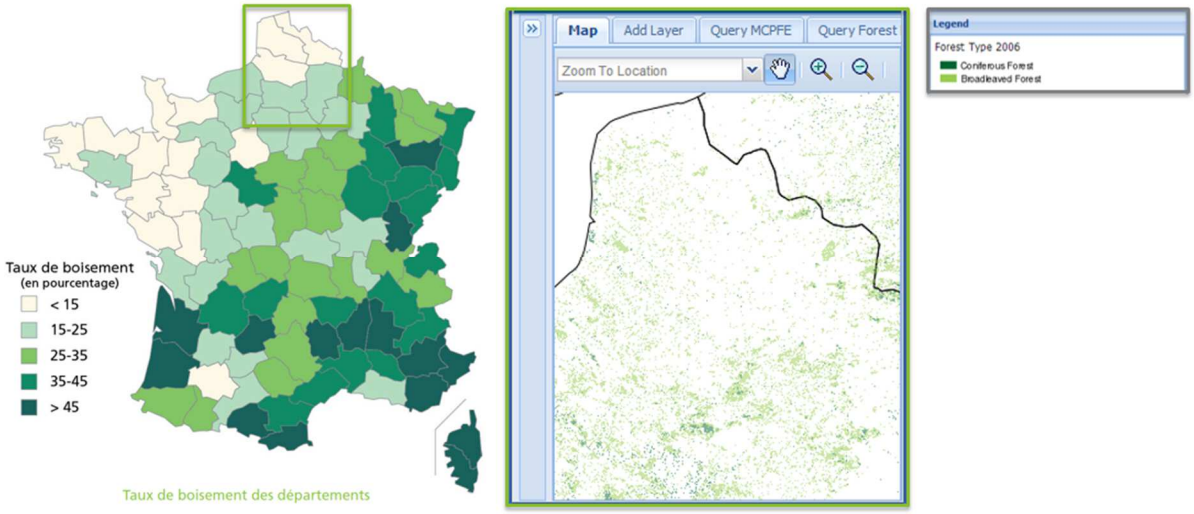



*Figure 2 : Répartition du boisement en France (Source : IGN-IFN http://inventaire-forestier.ign.fr/) et en région Nord – Pas de Calais (Source : EFDAC http://forest.jrc.ec.europa.eu/efdac/)*

Dans la région Nord–Pas de Calais Picardie, le couvert forestier est très fortement fragmenté (partie droite de la carte). Cette fragmentation affecte directement la libre circulation des organismes vivant dans ces habitats forestiers, que ce soit la faune ou la flore. Les espèces végétales ne bougent pas, si ce n'est par les phénomènes de dispersion des graines, du pollen, etc. C'est donc par l'intermédiaire des phénomènes de reproduction que les plantes peuvent se disperser et migrer entre ces habitats totalement fragmentés.

### La distinction plaine/montagne

En France, les deux types d'habitats, plaine et montagne, sont présents. Les différences écologiques, en particulier climatiques, sont très importantes et influent l'évolution des espèces. Par exemple, les isothermes sont beaucoup plus proches en montagne qu'en plaine. L'exemple de la Figure 3 est caricatural mais explicatif. Dans le cas d'un réchauffement moyen au niveau national de +1 degré par exemple, la proximité des isothermes en montagne est telle, que le chemin à parcourir pour retrouver les mêmes conditions de température est beaucoup plus faible qu'en plaine. Ceci favorisera évidemment la migration des espèces.

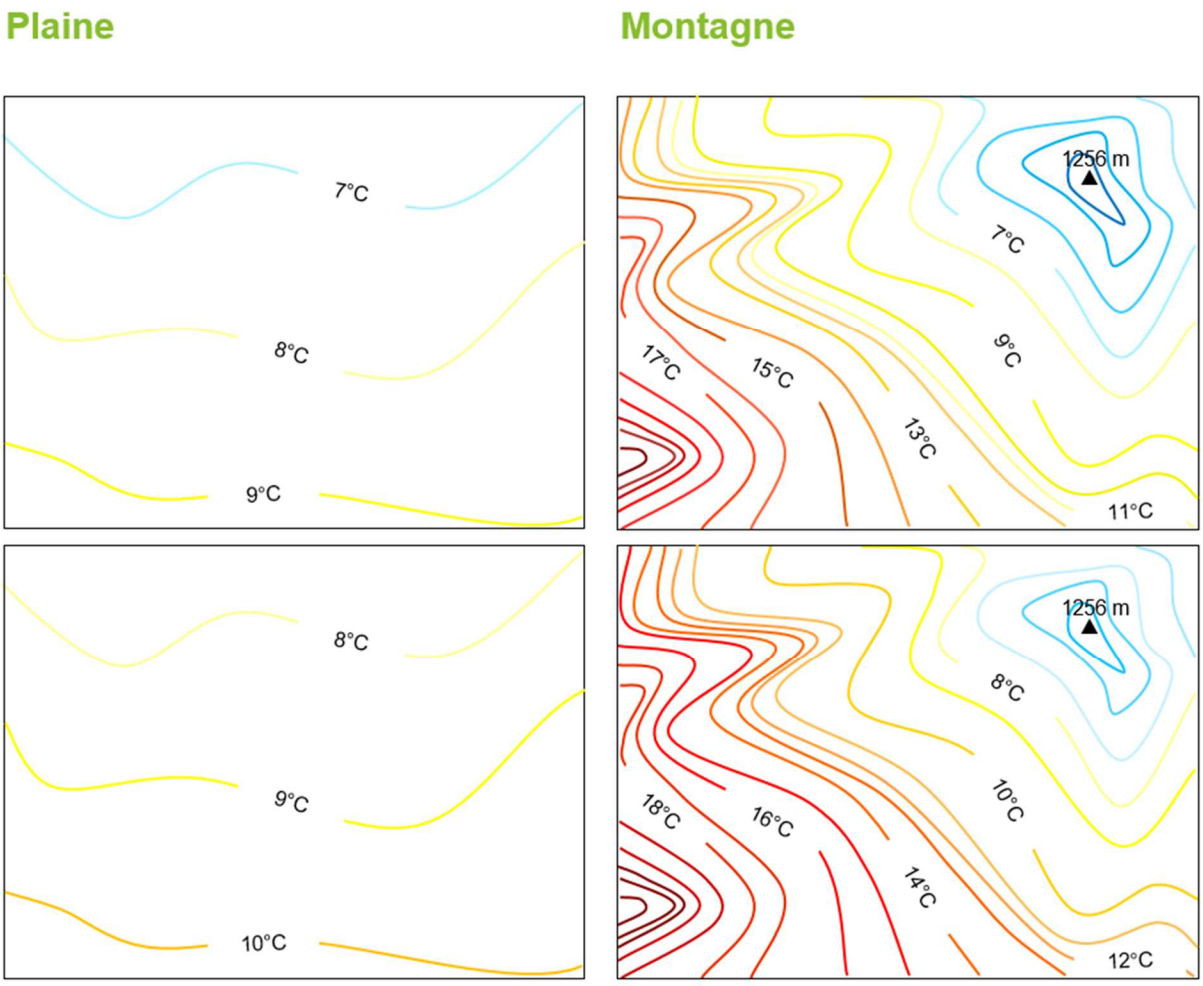



*Figure 3 : Evolution des isothermes de montagne et de plaine si la température nationale n'augmente que d'un degré (D'après Lenoir, 2009)*

### Les déplacements d'aire de distribution

La Figure 4 présente la distance minimale que devrait parcourir un organisme donné pour suivre les changements d'isothermes et retrouver un habitat dont les conditions climatiques sont favorables, c'est à dire permettant survie et reproduction. La carte distingue les données de plaine (à gauche) et les données de montagne (à droite). Les couleurs rouge, orange et jaune représentent les distances importantes. On constate que dans certaines régions de France, notamment en plaine, les distances à parcourir peuvent atteindre 50 à 100 km, voire

plus dans les zones en rouge. **C'est surtout dans le nord de la France que les distances à parcourir sont les plus grandes**, conséquence évidente de la très grande fragmentation de l'habitat forestier. En montagne, les distances à parcourir sont faibles. Cela est dû à la faible fragmentation mais également à la proximité des isothermes.

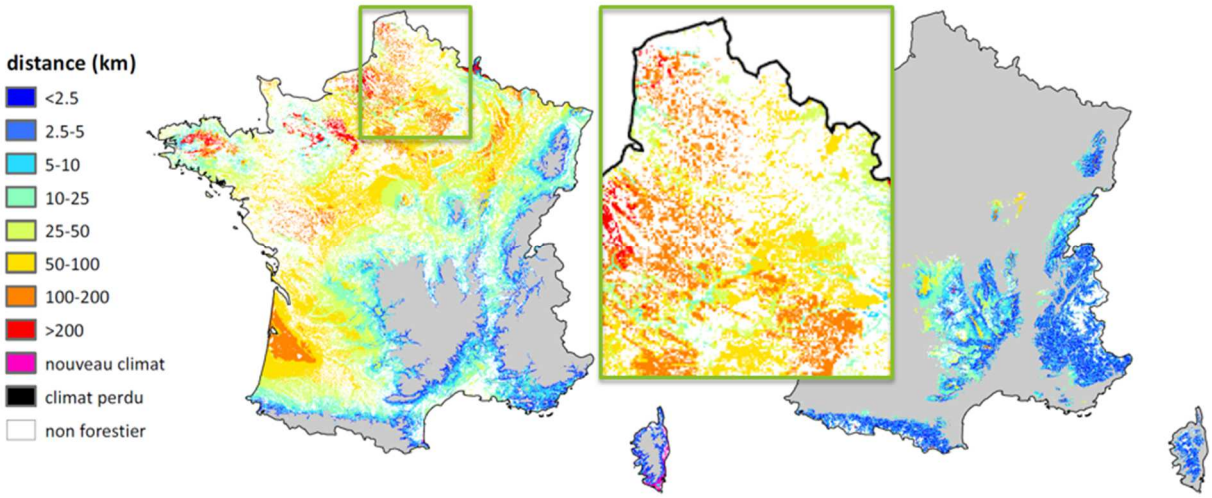



*Figure 4 : Carte représentant les distances à parcourir par les espèces pour retrouver une isotherme adéquate en fonction de la fragmentation (D'après Bertrand, 2012)*

### Les relevés floristiques pour la bioindication des effets du changement climatique

Pour suivre l'évolution temporelle de la flore forestière, on dispose de bases de données qui servent un peu de sentinelles à l'échelle nationale ou régionale. Parmi les bases exploitables, on peut citer SOPHY (Brisse et al., 1995), EcoPlant (Gégout et al., 2005) et les bases de données IGN-IFN (http://inventaire-forestier.ign.fr/) qui totalisent ensemble 170 000 relevés floristiques de 1913 à 2008. Un relevé floristique forestier est un inventaire des espèces présentes localement sur une surface, en général, de 300 $m^2$ et qui permettent la description des assemblages d'espèces composants les communautés végétales forestières.

La Figure 5 schématise une évolution des températures au cours du temps et les assemblages d'espèces qui en résultent. Chaque petite pastille de couleur représente une espèce et chaque espèce est représentée par la gamme de température à laquelle elle est adaptée, c'est à dire sa niche climatique ou niche thermique. Par exemple, l'espèce « pastille violette » est une espèce qui préfère les faibles températures, tandis que les deux pastilles rouges représentent des espèces présentes pour des températures assez élevées et qu'on qualifie de thermophiles. Les espèces se caractérisent par leur préférence climatique mais également par leur amplitude thermique. Ainsi il existe des espèces plutôt spécialistes d'une gamme étroite de températures (cf. pastilles violette et rouges) et des espèces généralistes avec une large amplitude thermique (cf. pastilles vertes). Si l'on considère une gamme de température particulière caractérisant une localité, on peut identifier une communauté d'espèces a priori. Par exemple l'ensemble des espèces représentées par les pastilles violettes bleues et vertes correspondent à une plage de température nettement différente de celle des pastilles jaunes à rouges. L'assemblage d'espèces rencontrées localement est donc un indicateur d'une plage de températures.

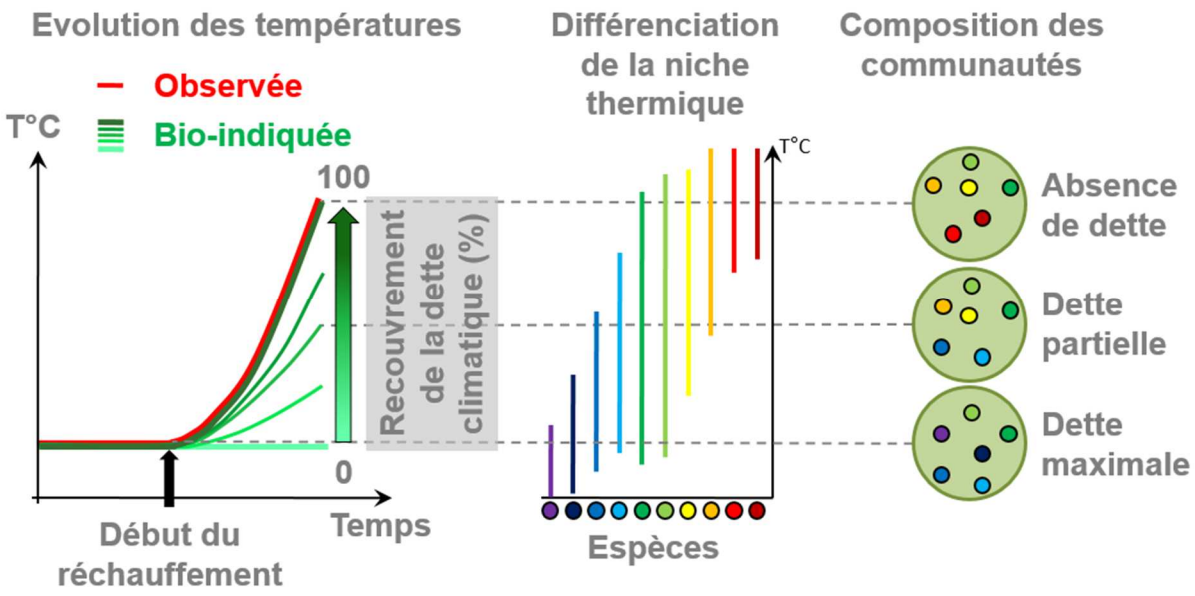



*Figure 5 : Schéma du suivi temporel de la réponse de la végétation par bio-indication et notion de dette climatique (D'après Bertrand, 2012)*

Si la composition de la flore forestière évolue de façon synchrone au réchauffement climatique, on considère qu'il n'y a **pas de dette climatique**, c'est à dire que **l'assemblage d'espèces est en équilibre et adapté aux nouvelles conditions climatiques**. Mais il est possible que ces relevés floristiques au cours du temps révèlent un **retard dans les changements de flore par rapport aux changements du climat, on parle alors de dette partielle ou de dette maximale** selon l'importance du retard.

La Figure 6, graphique de gauche, compare l'évolution des températures en montagne, telle qu'elle est estimée à partir du cortège floristique (en vert) et des relevés météorologiques (en rouge). Les courbes évoluent de façon similaire mais ne sont pas entièrement synchrones, en particulier les bio-indicateurs lissent fortement les fluctuations interannuelles. On peut noter qu'à partir de 1985, un détachement s'entame au moment où le réchauffement commence à s'opérer. Ce détachement est beaucoup plus important en plaine (graphique de droite) qu'en montagne. Dans ce cas, la bio-indication révèle une **dette importante pour les forêts de plaine** comme celle des régions Nord – Pas de Calais et Picardie.

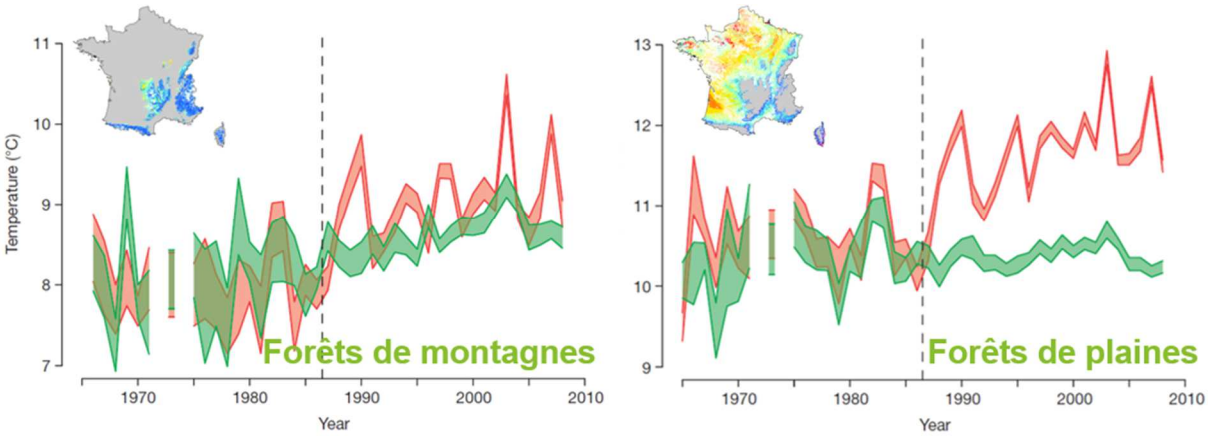



*Figure 6 : Comparaison des températures relevées par Météo France (en rouge) et par bio-indication (en vert) en montagne et en plaine (D'après Bertrand, 2012)*

### Les comparaisons diachroniques

Nous pouvons également comparer l'évolution temporelle de la distribution des espèces. La Figure 7 traduit les résultats d'une étude réalisée sur 171 espèces de plantes forestières qui montre la migration en altitude des espèces montagnardes. On a distingué le cas des arbres de celui des herbacées. Les arbres sont des organismes à durée de vie très longue. Or, le climat connaît une évolution très rapide. La capacité de réponse des arbres à un réchauffement qui s'opère sur un pas de temps court est donc limitée ce qui explique une remontée en altitude de seulement 20 mètres. En revanche, les herbacées présentent une durée de vie beaucoup plus courte ainsi qu'une dynamique de reproduction beaucoup plus rapide. Leur remontée, entre 1971 et 1993 est de l'ordre de 85 mètres en moyenne, les plantes herbacées constituent donc de bons indicateurs des changements climatiques, surtout en contexte de montagne.

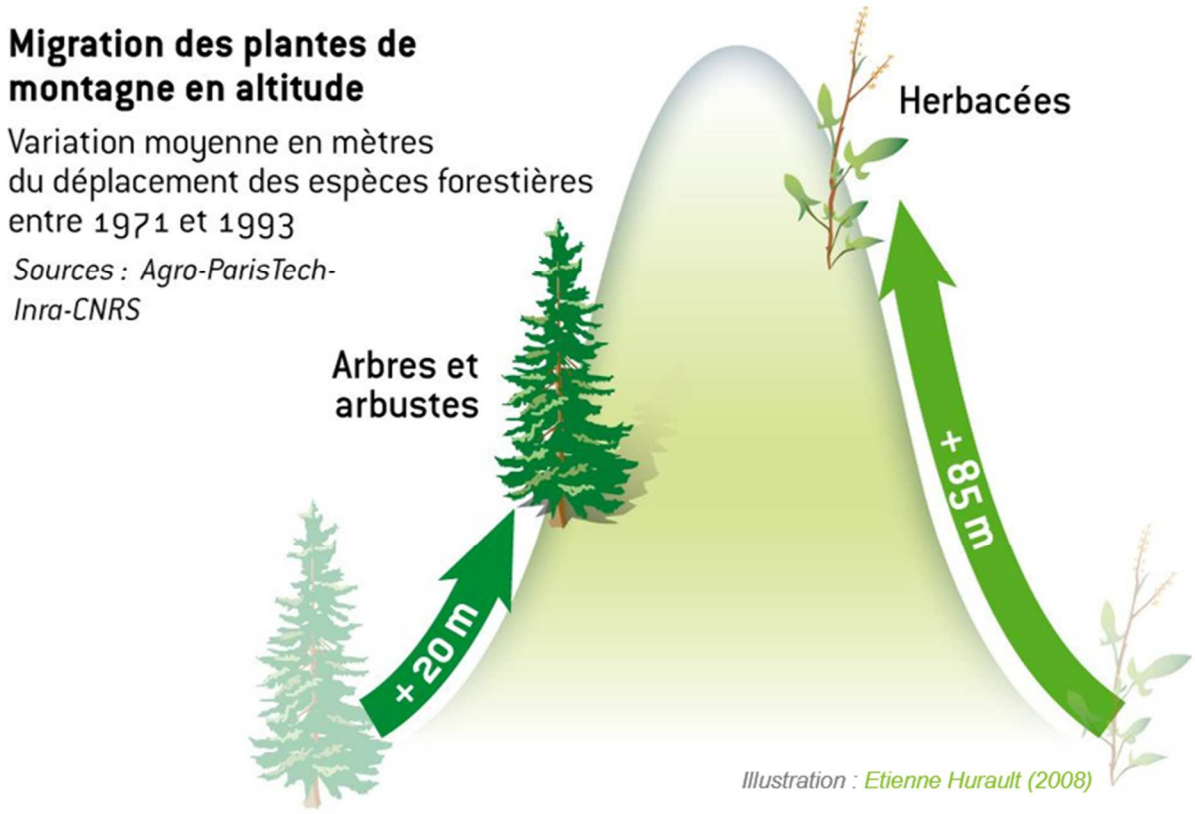



*Figure 7 : Schéma de la migration des plantes de montagne (D'après Lenoir, 2009)*

La proximité des isothermes en montagne permet une migration relativement facile des espèces. En plaine ou, plus généralement, pour des altitudes inférieures à 500 mètres, les distances minimales à parcourir sont élevées (Figure 4). **Dans la zone de plaine, la dette climatique est de près de 100% puisqu'il n'y a quasiment pas de possibilité de réponse des communautés végétales forestières aux changements climatiques à cause de la fragmentation des habitats.** En revanche, en montagne, la dette climatique est beaucoup moins importante. Probablement de l'ordre de 40% d'espèces non adaptées ou ayant élargi récemment leur niche climatique. La proximité des isothermes et la fragmentation plus faible dans les zones de montagne permettent certainement aux espèces de circuler au sein d'un

même massif et donc de trouver un habitat favorable. Néanmoins, le déplacement moyen de 85 mètres pour les espèces herbacées est bien inférieur à ce que l'on pourrait attendre dans un cas de suivi totalement synchrone. Le déplacement synchrone conduirait à un déplacement moyen pour l'ensemble des espèces forestières de l'ordre de 120 mètres voire de 130 mètres.

En conclusion, l'étude de l'évolution des populations en zone de montagne permet de mieux comprendre la manière dont les espèces réagissent aux variations climatiques : quand elles le peuvent, elles migrent vers des zones qui leur sont climatiquement favorables mais elles le font avec une certaine inertie traduite ici par la notion de dette climatique. En plaine, comme c'est le cas dans la région Nord – Pas de Calais, ces migrations sont rendues très difficiles voire impossibles par la distance à parcourir entre les isothermes et aussi par la très grande fragmentation de l'habitat forestier.

### Références bibliographiques


Bertrand, R., 2012. *Réponse spatio-temporelle de la végétation forestière au réchauffement climatique - Évaluation du remaniement de la végétation et caractérisation de l'effet des facteurs écologiques et géographiques le modulant à l'échelle de l'espèce et des communautés*. Thèse de doctorat, LERFoB – Laboratoire d'Etudes des Ressources Forêts-Bois.

Brisse, H. et al.,1995. European vegetation survey. The phytosociological database ''Sophy''. Part 1. Calibration of indicator plants. Part 2. Socio-ecological classification of the relevés. *Ann. Bot.* 53, p. 177-223.

Gégout, J.C. et al., 2005. EcoPlant: a forest site database linking floristic data with soil and climate variables. *J. Veg. Sci.* 16, p. 257-260.

Lenoir, J., 2009. *Impacts d'un réchauffement rapide du climat sur la distribution des espèces végétales forestières le long du gradient d'altitude.* Thèse de doctorat, LERFoB – Laboratoire d'Etudes des Ressources Forêts-Bois.

# La chalarose du frêne, scénarisation de l'impact du changement climatique

Eric GOBERVILLE

Research Associate, Sir Alister Hardy Foundation for Ocean Science,
Laboratoire d'Océanologie et de Géoscience

Le changement climatique, *via* l'augmentation des températures et/ou des sécheresses accrues, a d'ores et déjà eu des conséquences directes sur de nombreuses espèces forestières, entraînant, par exemple, de sévères mortalités du pin sylvestre en Europe, du mulga en Australie ou du cèdre de l'Atlas en Afrique du Nord (Allen et al. 2010). Au-delà de cette influence directe qui accroît la sensibilité des espèces, le changement climatique agit également indirectement en altérant les interactions biotiques. Ces altérations peuvent alors conduire à l'émergence de maladies dont l'initiation peut être liée à une extension de l'aire de répartition de l'agent infectieux (e.g. Kurz et al. 2008)

Conjointement à l'effet climatique, l'influence des activités humaines, et notamment l'accroissement des échanges commerciaux, est également à l'origine de l'apparition de maladies affectant les espèces forestières. Le commerce du bois, le commerce de palettes, l'introduction directe de plantes ou de graines *via* les échanges de semence, de bouture de plantes d'intérêt agronomique ou horticole peuvent entraîner l'introduction d'organismes pathogènes (Anderson et al. 2004).

Au cours des dernières décennies, les apparitions de maladies en milieu forestier se sont multipliées, certaines espèces étant profondément touchées par des attaques parasitaires : l'orme, l'aulne, le platane ou encore le châtaignier. En Europe, une nouvelle espèce à fort intérêt économique et patrimonial est touchée depuis quelques années : le frêne.

Le pathogène du frêne affecte de manière différentielle les différentes espèces de frêne européens, l'influence étant forte sur *F. excelsior* mais modérée sur *F. ornus*. Dans l'étude présentée ici, un intérêt particulier a été porté à l'effet du pathogène sur l'espèce la plus fortement impactée : le frêne commun (*Fraxinus excelsior* ; Figure 1).



*Figure 1 : effet du champignon parasite sur le feuillage du frêne (crédit photo : http://www.easthants.gov.uk )*

### Le pathogène du frêne commun

La maladie, dite « chalarose », est apparue en 1992, le premier cas de dépérissement du frêne étant identifié en Pologne. A partir de ce foyer d'infection, le pathogène s'est ensuite dispersé dans le reste de l'Europe (Allemagne, Roumanie, Danemark, Suède…). Plusieurs années ont été nécessaires pour identifier précisément l'agent à l'origine de ce dépérissement. D'abord identifié comme étant *Chalara fraxinea,* forme asexuée du champignon *Hymenoscyphus albidus*, des recherches moléculaires plus poussées ont permis la découverte d'une nouvelle espèce : *H. pseudoalbidus.* Depuis 2014, il est renommé *Hymenoscyphus fraxineus* (Baral et al. 2014 ; Figure 2).




*Figure 2 : Hymenoscyphus fraxineus, pathogène responsable du dépérissement du frêne (crédit photo : http://asco-sonneberg.de et www.pharmanatur.com)*

En France, les premiers cas qui ont été répertoriés dès 2009. En 2014, les frênes dépérissent sur près d'un tiers du territoire français (Figure 3).

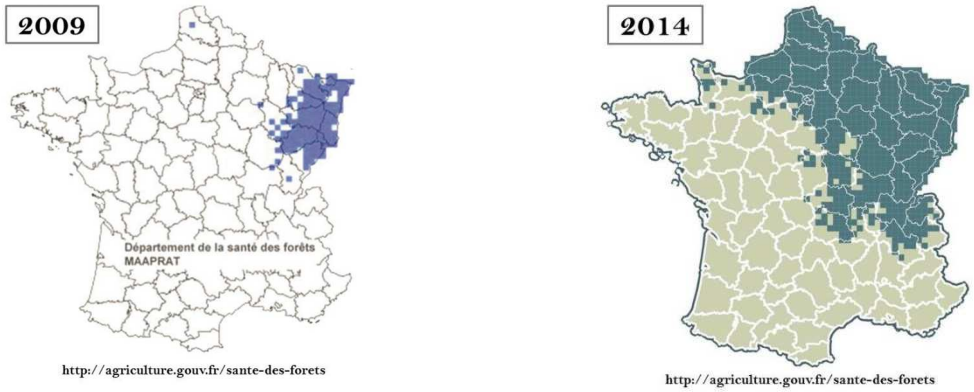



*Figure 3 : Extension géographique de l'infection en France entre 2009 et 2014*

### Les effets du changement climatique sur le devenir du frêne et de son pathogène

Comment le changement climatique pourrait-il affecter le devenir du frêne et de son pathogène ? Les changements de distribution géographique du frêne et de son parasite, en réponse aux changements climatiques, pourraient-ils modifier les interactions entre l'arbre et le pathogène ?

Afin de répondre à cette problématique, les chercheurs ont appliqué le concept de niche écologique (*sensu* Hutchinson) dans le but de modéliser la distribution géographique des espèces. L'approche consiste, à partir des données de présence d'une espèce, à calculer sa niche écologique en fonction de différents paramètres environnementaux (ici climatiques). Cette niche écologique théorique, une fois projetée dans l'espace géographique, permet une estimation de la distribution spatiale de l'espèce. En appliquant cette méthode sur les données d'observation du frêne et du pathogène (Figure 4), il est alors possible de modéliser la distribution spatiale des deux espèces sous la forme de probabilités de présence, les valeurs en rouge attestant d'un environnement climatique favorable pour l'espèce.

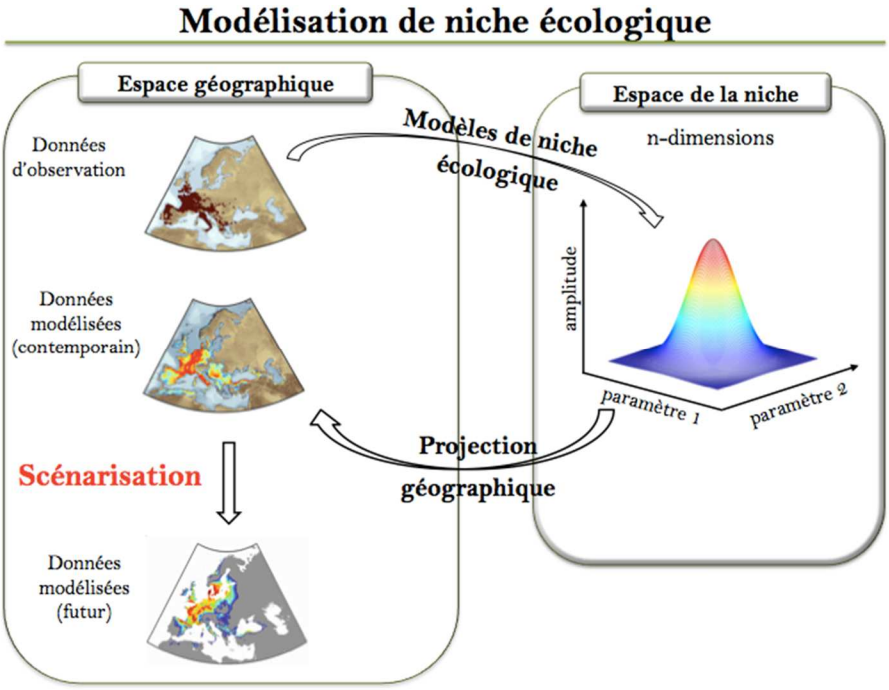



*Figure 4 : Modélisation de la niche écologique d'une espèce et projection de sa distribution spatiale*

Dès lors que la niche écologique est modélisée, il est possible d'établir des scénarios de la distribution géographique future des espèces, en se basant sur des projections des conditions environnementales futures. Cependant, il n'est pas possible d'estimer avec certitude le climat futur. Afin d'intégrer cette source d'incertitude, les chercheurs ont considéré sept modèles climatiques (issus de différents centres climatologiques) et les quatre scénarios de forçages radiatifs en 2100[2] établis par le GIEC : du plus optimiste (~1 degré d'augmentation d'ici la fin du siècle) au plus pessimiste (~5 degrés). A partir des différentes modélisations obtenues, les chercheurs ont ensuite évalué les changements de superficie des deux espèces au cours du 21ème siècle et estimé comment pourrait évoluer l'aire de distribution du frêne en réponse (1) au climat seul et (2) à l'action conjugué du climat et du pathogène.

[2] Representative Concentration Pathways : RCP2.6, 4.5, 6.0 et 8.5

Si les scénarios les plus optimistes (RCP2.6 ; Figure 5) prévoient une stabilité voire une augmentation de la superficie couverte par l'arbre lorsque seul l'effet du climat est considéré, les scénarios les plus pessimistes (RCP8.5 ; Figure 5) montrent une diminution de l'aire de répartition du frêne d'environ 20% à la fin du siècle. De plus, un déplacement biogéographique de l'espèce vers le nord-est de l'Europe est projeté, induisant une extirpation du frêne des pays du sud de l'Europe (Figure 5).

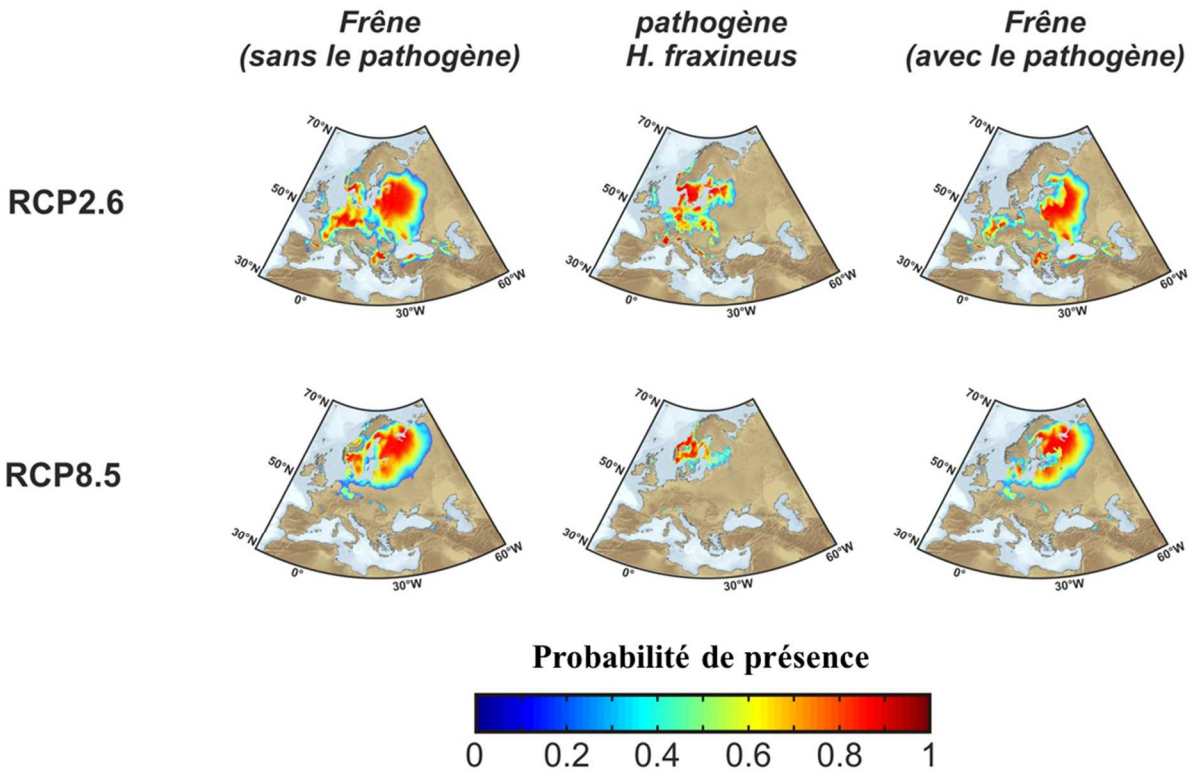



*Figure 5 : Projections de la distribution du frêne sans le pathogène (gauche), du pathogène (milieu) et du frêne lorsque l'effet négatif du pathogène est considéré (droite) pour la fin du siècle (2080-2099) pour deux scénarios climatiques : RCP2.6 (optimiste) et RCP8.5 (pessimiste) (Goberville et al. soumis).*

Lorsque l'effet du changement climatique sur le pathogène est étudié, les modélisations projettent une réduction de la superficie couverte par le parasite ainsi qu'un déplacement vers le nord de l'Europe, et ce dès les premières décennies. Si le réchauffement est fort (RCP8.5), une diminution drastique (~60%) de la présence du pathogène est projetée, et seules quelques populations isolées sont attendues au sud de la Scandinavie (Figure 5). Plus l'intensité du réchauffement est importante, plus la superficie projetée des deux espèces tend à diminuer.

En admettant que le pathogène *H. fraxineus* puisse induire une disparition massive du frêne en Europe, les scénarios de distributions de l'arbre doivent tenir compte de cet effet interactif afin de mieux appréhender les influences directe et indirecte du changement climatique. L'influence climatique sur le frêne restant relativement limitée au cours de la première partie du 21ème siècle, une augmentation de la superficie couverte par l'arbre est projetée lorsque l'interaction avec le parasite est considérée dans le modèle, celui-ci étant fortement altéré

par le changement climatique. A la fin du siècle, un effet négatif du climat sur la distribution du frêne étant attendu pour un réchauffement important (RCP8.5 ; Figure 5), une diminution de la superficie de l'arbre d'environ 10% est projetée malgré une influence quasi inexistante du pathogène (l'effet du parasite étant limité au sud de la Scandinavie).

Ces résultats suggèrent que le changement climatique pourrait induire un découplage géographique entre l'hôte et son pathogène, conduisant à une modulation de la chalarose du frêne. Si le changement climatique continue au rythme projeté par le GIEC, il est probable que les écosystèmes forestiers seront fortement impactés (1) directement par les modifications environnementales et (2) indirectement par l'émergence de maladies et pestes (Thornton et al., 2014). Cependant, comme montré dans cette étude, les espèces ne répondront pas de la même façon aux forçages climatiques. Des espèces ayant des niches écologiques différentes présenteront des réponses différentielles aux effets du changement climatique entraînant un découplage spatial d'espèces actuellement en interaction. Dès lors, une réorganisation des communautés telles que nous les connaissons et une altération des interactions entre les espèces sont à prévoir. Ces phénomènes auront des conséquences importantes sur le fonctionnement des écosystèmes. Il apparaît donc crucial de considérer les interactions entre espèces dans les approches de modélisation des conséquences du changement climatique afin de proposer des scénarios de gestion et de conservation pertinents.

## Références Bibliographiques


Allen, C.D., Macalady, A.K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., et al., 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management,* 259, p. 660-684.

Anderson, P.K., Cunningham, A.A., Patel, N.G., Morales, F.J., Epstein, P.R., et al., 2004. Emerging infectious diseases of plants: pathogen pollution, climate change and agrotechnology drivers. *Trends in Ecology & Evolution,* 19, p. 535-544.

Baral, H.-O., Queloz, V., Hosoya, T., 2014. *Hymenoscyphus fraxineus*, the correct scientific name for the fungus causing ash dieback in Europe. *IMA Fungus,* 5, p. 79-80.

Goberville, E., Hautekèete, N.-C., Piquot, Y., Luczak, C., Beaugrand, G., (soumis). Climate change and the ash dieback crisis.

Kurz, W.A., Dymond, C.C., Stinson, G., Rampley, G.J., Neilson, E.T., et al., 2008. Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change. *Nature* 452, p. 987-990.

Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., et al., 2013. *Climate change 2013: The physical science basis. Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5)*. Cambridge Univ Press, New York.

Thornton, P.K., Ericksen, P.J., Herrero, M., Challinor, A.J., 2014. Climate variability and vulnerability to climate change: a review. *Global Change Biology,* 20, p. 3313-3328.



Photo : Denis Petitprez



Coralie Schoemaecker est chargée de recherche CNRS au laboratoire de Physicochimie des Processus de la Combustion et de l'Atmosphère (PC2A, UMR CNRS 8522) de l'Université de Lille depuis 10 ans. Elle mène ses travaux de recherche sur la compréhension des processus d'oxydation dans l'atmosphère mais également en air intérieur, leur évolution et leur impact sur la qualité de l'air au sein de l'équipe "Physicochimie de l'atmosphère"

# Impacts du changement climatique sur la qualité de l'air et l'atmosphère

Partie coordonnée par Coralie Schoemaecker
Laboratoire Physicochimie des Processus de Combustion et de l'Atmosphère, Université de Lille

L'évolution des conditions climatiques de notre planète peut entrainer de multiples effets sur la qualité de l'air et sur les processus affectant la composition de l'atmosphère tels que les émissions biogéniques et les transformations chimiques. Cette partie fait le point sur l'état des connaissances actuelles concernant la caractérisation des polluants dans l'atmosphère et leur devenir mais également leur évolution potentielle. L'augmentation de la fréquence d'épisodes qualifiés "d'extrêmes" de part des conditions météorologiques peu fréquentes à l'heure actuelle mais favorables à la formation de polluants de type particulaires est à prévoir. Les changements dans la circulation atmosphérique sont également attendus et leurs impacts sur la répartition des polluants dans la région est à considérer.

Cette partie présente les interventions suivantes :

- Analyse physicochimique de la pollution atmosphérique
  *Esperanza Perdrix, Nadine Locoge, Stéphane Sauvage, Aude Pascaud, Antoine Waked, Laurent Alleman, Patrice Coddeville Département Sciences de l'Atmosphère et Génie de l'Environnement, Ecole des Mines de Douai*
  Conférence CERCLE du 3 avril 2015

- Analyse d'un événement « extrême » de pollution : mars 2014, du satellite … au microscope
  *Philippe Goloub, Laboratoire d'Optique Atmosphérique, UMR 8518 CNRS/ Université de Lille - Sciences et Technologies, Marie Choël, LAboratoire de Spectroscopie Infrarouge et Raman, UMR 88516CNRS/ Université de Lille - Sciences et Technologies, Véronique Riffault, Département Sciences de l'Atmosphère et Génie de l'Environnement, Ecole des Mines de Douai*
  Conférence CERCLE du 3 avril 2015

- Pollution de l'air : des échelles météorologique et climatique
  *Hervé DELBARRE, Laboratoire Physico-chimie de l'Atmosphère, Université du Littoral et de la Côte d'Opale*
  Conférence CERCLE du 12 décembre 2013

- Changement climatique : quelles conséquences sur la diffusion de la pollution atmosphérique en région en 2100 ?
  *Valérie FEVRE-NOLLET et Patrick LEBEGUE, Laboratoire de Physico-chimie des Processus de Combustion et de l'Atmosphère, UMR 8522 CNRS/ Université de Lille - Sciences et Technologies, Caroline NORRANT, Laboratoire Territoires, Villes, Environnement et Société, Université de Lille - Sciences et Technologies*
  Conférence CERCLE du 12 décembre 2013

# Analyse physicochimique de la pollution atmosphérique

Esperanza PERDRIX,

Nadine LOCOGE, Stéphane SAUVAGE, Aude PASCAUD, Antoine WAKED, Laurent ALLEMAN, Patrice CODDEVILLE,

Département Sciences de l'Atmosphère et Génie de l'Environnement (SAGE), Ecole des Mines de Douai

Cette communication vise à présenter quelques éléments sur les liens entre pollution atmosphérique et changement climatique, à travers les exemples des polluants gazeux organiques volatils et des retombées atmosphériques.

La couche atmosphérique la plus chargée en polluants est la troposphère, qui s'étend de la surface terrestre jusqu'à environ 10 km (Figure 1). Elle se divise en deux parties : la couche limite atmosphérique, en contact direct avec la surface terrestre et d'une hauteur maximale d'environ 2 000 m, et la troposphère libre, située au-dessus, dans laquelle les polluants en moindre quantité peuvent se déplacer sur de très longues distances.

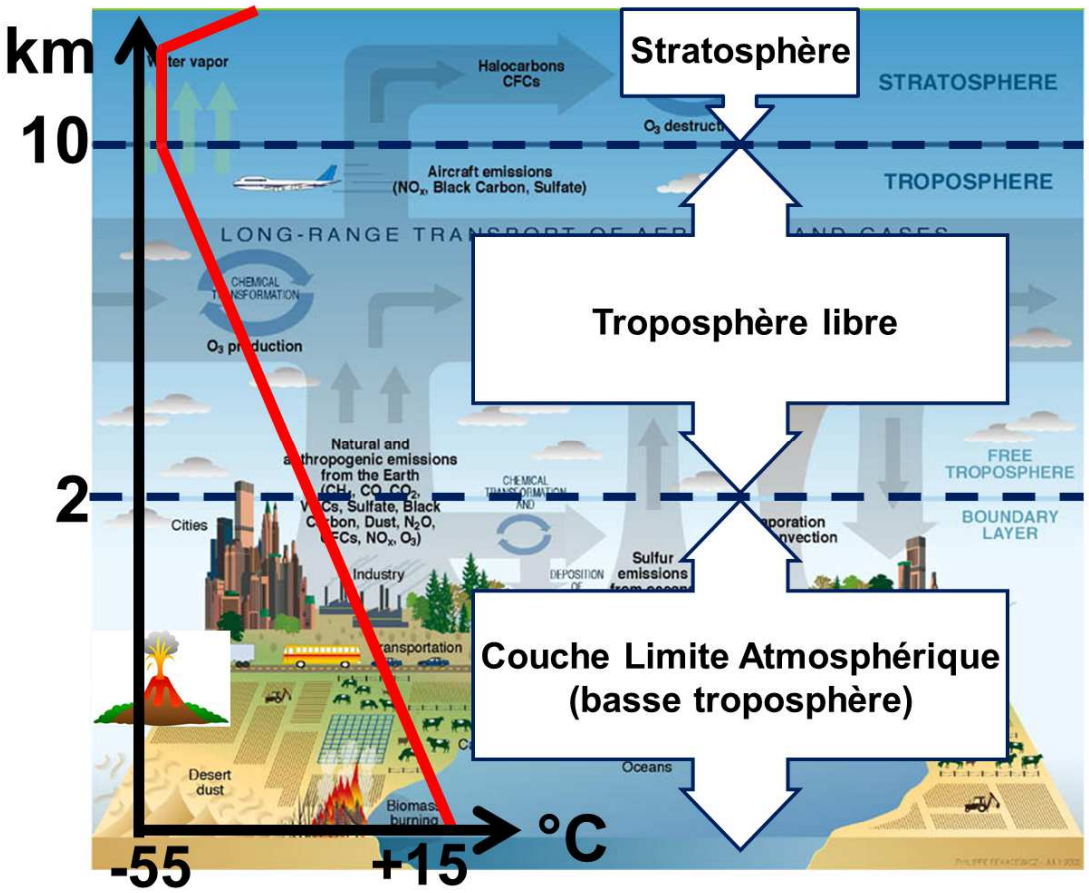



*Figure 1 : Les différentes couches de la basse atmosphère*

Les polluants sont émis par des sources naturelles comme les océans, les déserts, les sols, la végétation, les feux de forêt, le volcanisme et également par les activités anthropiques liées aux villes, à l'industrie, aux transports, à la culture et à l'élevage (Figure 2). Ces polluants atmosphériques peuvent être sous différents états physiques : en phase gazeuse ou condensée (liquide, solide, aérosol déliquescent). L'état physique d'une substance polluante peut varier au cours de son séjour dans l'atmosphère, en fonction des conditions physiques (température, pression, humidité, rayonnement) et chimiques (oxydants) rencontrées. Ainsi, un gaz émis depuis la surface terrestre (comme la vapeur d'eau) peut se condenser au fur et à mesure qu'il s'élève dans l'atmosphère (la vapeur d'eau générant des nuages). Par ailleurs, l'atmosphère peut être considérée comme un réacteur, dans lequel les espèces présentes peuvent subir des transformations photochimiques (l'énergie nécessaire étant apportée par le rayonnement solaire). Les polluants primaires, directement émis par les sources, sont distingués des polluants secondaires, formés dans l'atmosphère à partir des polluants primaires. La formation des polluants secondaires et leurs transformations sont d'autant plus importantes que le temps de séjour des polluants dans l'atmosphère est long.

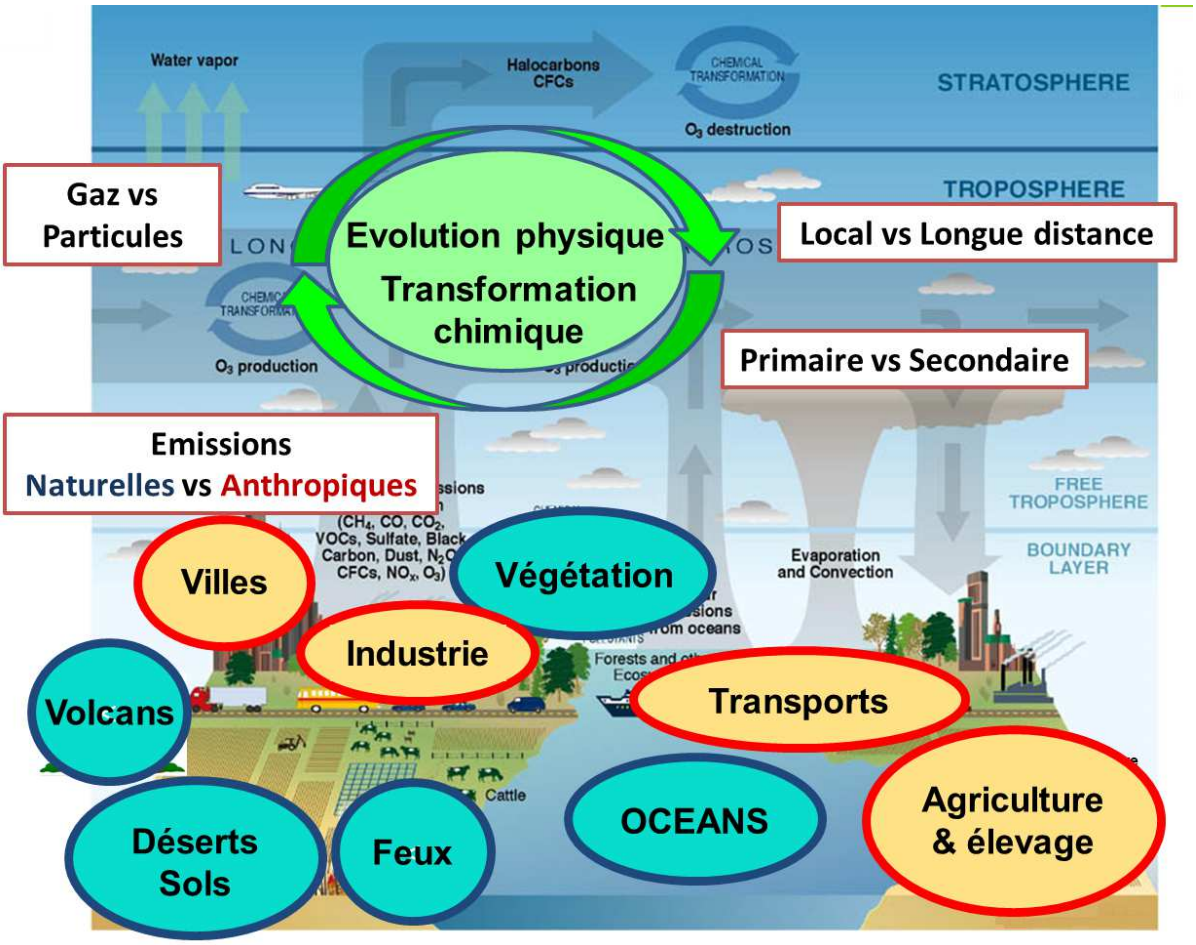



*Figure 2 : Origine des polluants atmosphériques*

### Les composés organiques volatils

Certains polluants gazeux sont surveillés réglementairement du fait de leurs effets sur la santé humaine et l'état des écosystèmes (Figure 3). Parmi les gaz organiques, on peut citer le benzène et le benzo(a)pyrène, deux composés organiques volatiles (COV). Ces derniers sont définis comme les molécules contenant du carbone et de l'hydrogène dont la température d'ébullition à pression atmosphérique (101,3 kPa) est inférieure à 250 degrés. Parmi les espèces inorganiques, le monoxyde de carbone est surveillé ainsi que certaines molécules aux propriétés acides ou oxydantes :

- le dioxyde de soufre et le dioxyde d'azote sont deux gaz précurseurs des acides sulfurique et nitrique que l'on retrouve dans les retombées atmosphériques et qui impactent les écosystèmes, en provoquant par exemple le dépérissement des forêts par les pluies acides ;
- l'ozone, un polluant secondaire typique, est formé par réaction des COV avec les oxydes d'azote sous l'effet du rayonnement solaire.

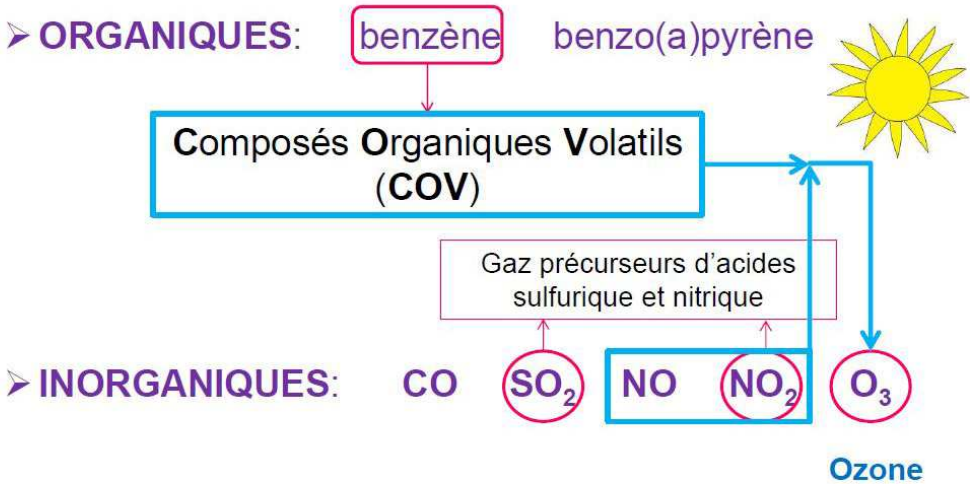
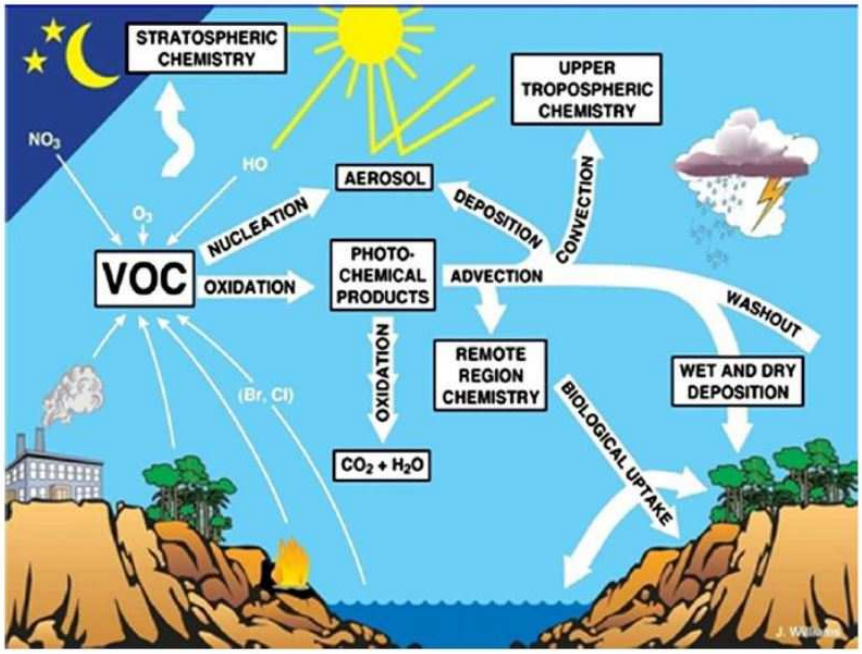



*Figure 3 : Les polluants atmosphériques gazeux faisant l'objet d'une surveillance réglementaire dans l'air ambiant en Europe*

Les COV subissent différentes transformations dans l'atmosphère avant de retomber sur le sol (Figure 4).




P.S. Monks et al. / Atmospheric Environment 43 (2009) 5268–5350

*Figure 4 : Le cycle atmosphérique des Composés Organiques Volatils (COV)*

En France, environ 700 kilotonnes de COV par an sont émises par des sources anthropiques et à peu près autant, voire plus, de COV biogéniques sont émis par les plantes. Au niveau planétaire, plus de 90 % des COV seraient d'origine biogénique, notamment avec des espèces majoritaires que sont l'isoprène et les terpènes (Figure 5).

| Emissions de COV | Anthropiques | Biogéniques |
|---|---|---|
|  | Actuellement 700 kt/an *(CITEPA)* | Environ 800 kt/an émis par les massifs forestiers (Lucheta *et al.*, 2000) |
|  | 10 % | 90 % Isoprène et terpènes |

*Figure 5 : Les émissions de COV en France et dans le monde*

L'effet du changement climatique sur les COV atmosphériques constitue une problématique complexe, en raison du nombre important de processus potentiellement touchés. S'il est difficile de répondre directement à ce questionnement, on peut cependant prédire certains phénomènes, *via* une approche météorologique, puisque les liens entre le comportement des

COV et les grands paramètres météorologiques, que sont la température et les précipitations, sont connus (Xiang *et al.*, 2012). C'est donc à travers l'effet de la température et des précipitations que sera inféré, ci-après, l'impact du changement climatique sur la pollution par les COV.

Dans les territoires présentant une augmentation de température, on peut s'attendre à davantage de volatilisation des COV, émis par les différentes sources anthropiques ou naturelles, notamment biogéniques. De plus, si ces espèces davantage volatilisées s'avèrent être des COV précurseurs d'aérosols organiques secondaires (des COV susceptibles de réagir chimiquement dans l'atmosphère pour former des AOS, autrement dit des particules carbonées et oxydées), cela pourrait résulter en des effets de forçage, difficiles à prévoir.

En effet, un forçage correspond à une perturbation de l'équilibre radiatif de la Terre dans le sens d'une diminution d'énergie (forçage dit « négatif », ayant un effet refroidissant) ou d'une augmentation (forçage « positif », induisant un réchauffement). Or, les COV biogéniques (terpènes, isoprène) sont des précurseurs d'AOS, qui peuvent interagir avec le rayonnement solaire par diffusion et réflexion, affecter la formation des nuages et leur type et modifier la nature de la surface externe des autres aérosols (Lohmann and Feichter, 2005). Comme ces différents effets induisent des forçages opposés, l'évaluation du forçage total des AOS, lié à leurs effets cumulés directs et indirects, est au centre d'importants efforts de recherche par la communauté scientifique des domaines de l'atmosphère et du climat. D'un autre point de vue, celui de la qualité de l'air, il y aura probablement une augmentation de la pollution particulaire, liée au smog photochimique.

Dans les territoires où la température augmentera, on peut également prédire, d'après les lois de la thermochimie, une accélération des vitesses des réactions chimiques dans l'atmosphère. Davantage d'oxydants photochimiques pourront être formés, l'atmosphère deviendra plus oxydante et pourra conduire à former plus de gaz à effet de serre. Le dioxyde de carbone et la vapeur d'eau, qui sont deux puissants gaz à effet de serre, sont en effet les produits finaux des réactions totales d'oxydation des composés organiques volatils.

Une augmentation de la pluviosité, provoquera, quant à elle, une augmentation des dépôts de ce type de polluants sur les écosystèmes.

**Quels pourraient être les facteurs susceptibles d'impacter le plus les émissions de COV, notamment les COV biogéniques les plus abondants ?**

La température qui favorise l'évaporation par les plantes ?

L'insolation ? L'isoprène, par exemple, est un COV biogénique émis pendant la photosynthèse.

Le stress hydrique ? Car les plantes n'émettent pas les mêmes quantités de COV selon les conditions de sécheresse.

Afin d'étudier l'effet du changement climatique sur ces COV, notamment biogéniques, il faut d'une part quantifier leur émission par les végétaux (des investigations sont menées au-dessus de la canopée des forêts) mais aussi mesurer leurs concentrations dans l'air ambiant,

regarder les tendances pluriannuelles et modéliser ces évolutions pour prédire l'avenir. Le département SAGE de l'Ecole des Mines de Douai est engagé depuis plusieurs années dans ce type d'études statistiques. La Figure 6 présente la méthode d'analyse utilisée au département SAGE pour une étude de tendance pluriannuelle et de modélisation des COV en sites ruraux de fond, en France métropolitaine.

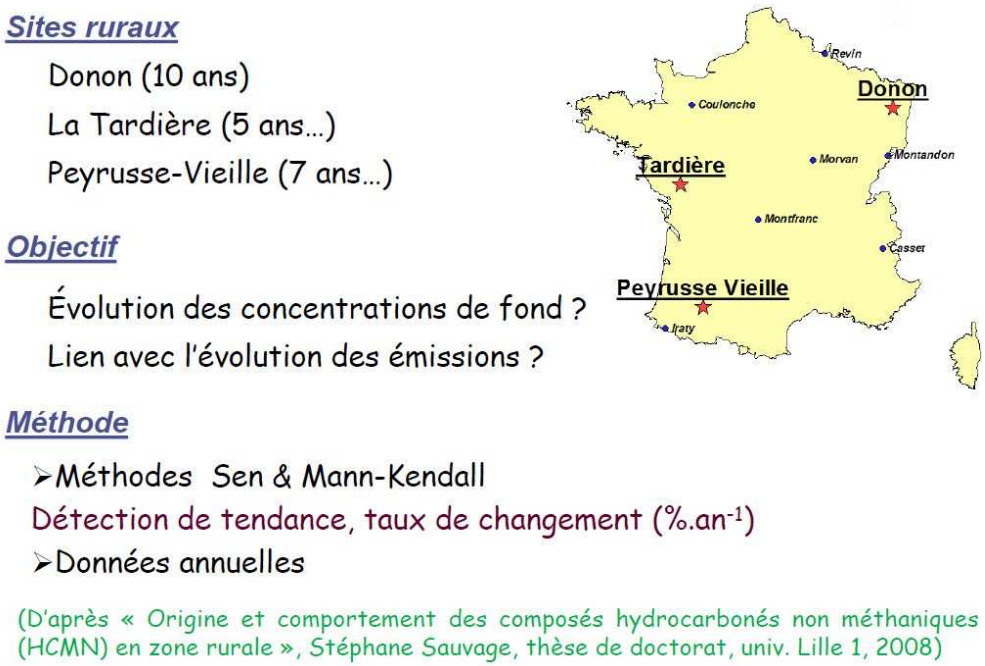



*Figure 6 : Méthodologie d'analyse des tendances 1997-2004 des concentrations en COV observées sur 3 sites de fond ruraux en France*

Le département SAGE gère, en effet, des sites de mesure de la pollution atmosphérique de fond en France, à travers l'observatoire des retombées atmosphériques MERA, soutenu par l'ADEME. Les tendances des concentrations en COV sur la période 1997 à 2004 ont été étudiées sur trois sites (loin de toute source locale impactante) : le Donon dans les Vosges, la Tardière en Vendée et Peyrusse-Vieille dans le Gers, ces trois sites étant répartis sur le territoire national.

La Figure 7 montre l'évolution des concentrations de trois COV émis plutôt par des sources anthropiques : le benzène, le toluène et l'isopentane. Les différents points correspondent aux différentes observations dans les trois sites et la droite correspond à la tendance calculée. Pour ces trois COV, les tendances sont à la baisse entre -3,5 % et -5,9 % par an. Cela pourrait s'expliquer par les réglementations, en terme de réduction des émissions, qui ont été décidées depuis la fin des années 90 et qui avaient pour objectif de réduire : le taux de benzène dans les essences, les émissions de solvants dans l'industrie et les émissions de COV lors de la distribution des carburants dans les stations-service. Les efforts faits à ce niveau semblent être concluants puisque des diminutions sur les composés ciblés sont visibles.

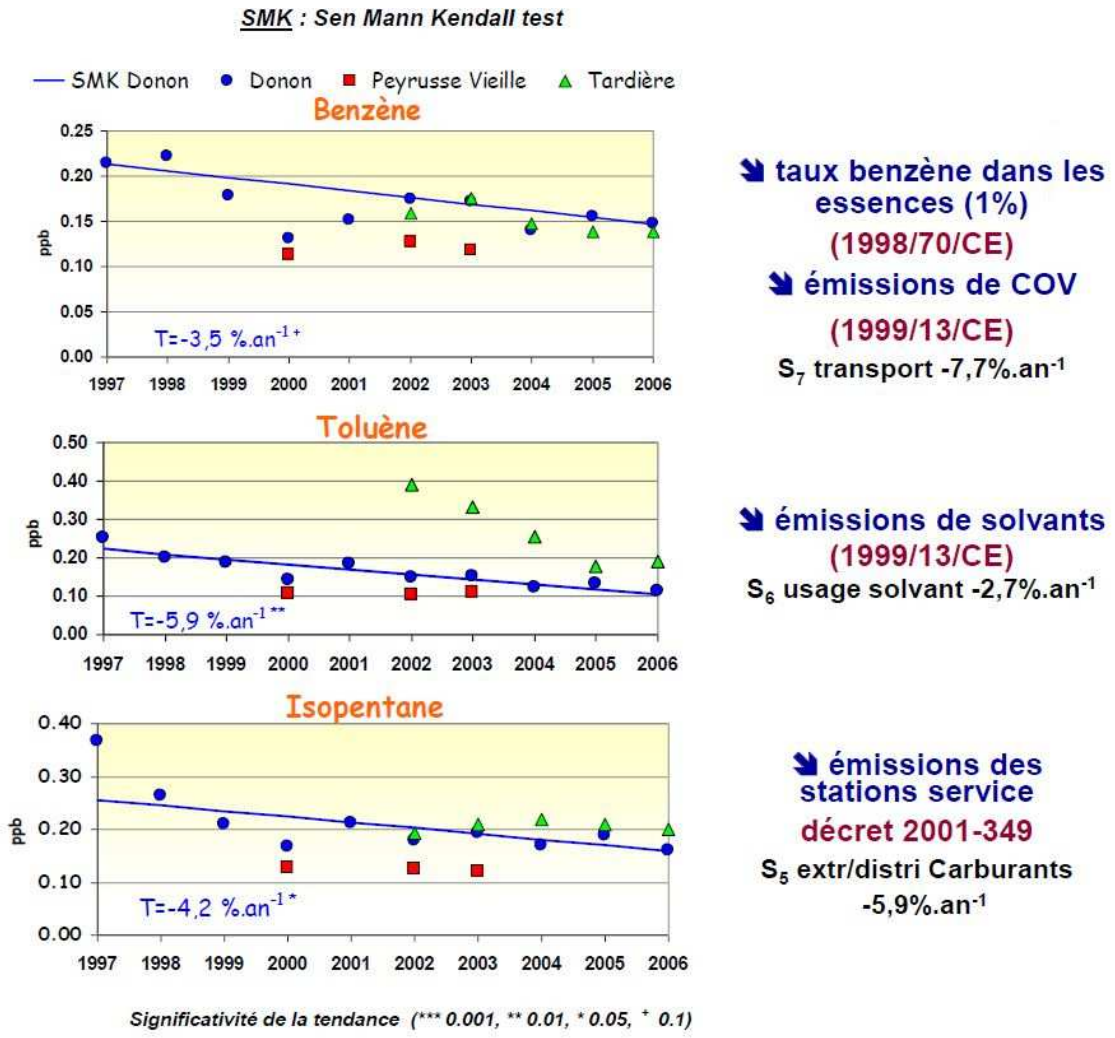



*Figure 7 : Evolution des concentrations en benzène, toluène et isopentane sur les sites MERA de Donon, Peyrusse-Vieille et La Tardière*

Pour d'autres types de COV qui ne sont pas directement anthropiques, par exemple l'éthane, une espèce peu réactive qui se transporte sur de longues distances, ou l'isoprène, une espèce biogénique, la tendance est plutôt à la hausse : + 0,4 % par an pour l'éthane et + 1,2 % par an pour l'isoprène (Figure 8). Un zoom sur l'année 2003, présentant une période de canicule estivale, montre une augmentation très nette de la concentration moyenne annuelle en isoprène due à cette hausse de température, simultanément sur les 3 sites. La courbe croissante, au bas de la Figure 8, montre les concentrations en isoprène mesurées en fonction de la température. L'augmentation quasi exponentielle laisse à penser que les émissions de COV biogéniques augmenteraient significativement avec une hausse des températures. Cette extrapolation des situations observées aux conditions futures est cependant très incertaine, puisqu'il est envisagé que le fonctionnement des végétaux soit altéré, en particulier par les conditions de sécheresse prolongée.

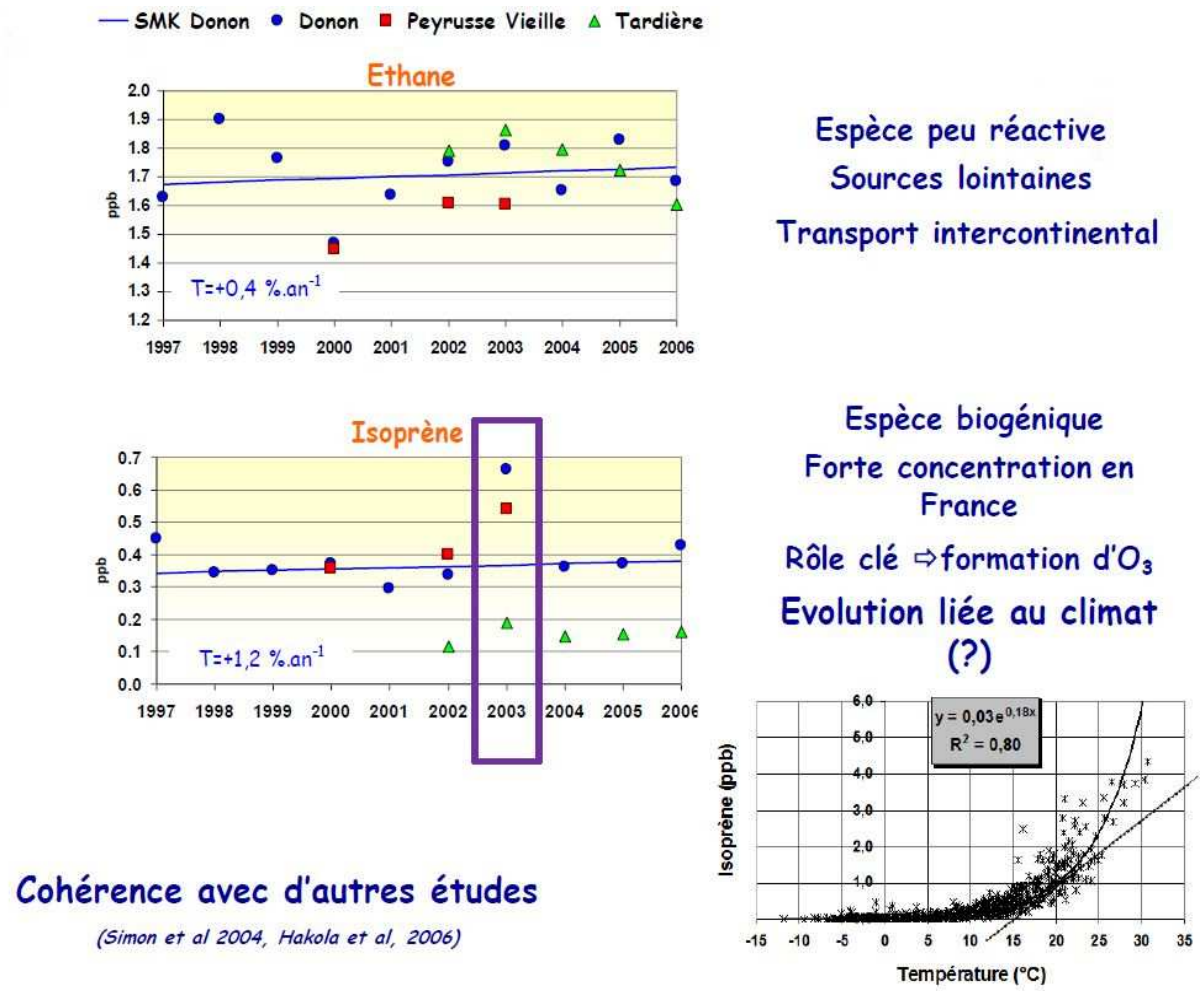



*Figure 8 : Evolution des concentrations de deux COV qui ne sont pas d'origine directement anthropique*

D'autres analyses de tendance sont actuellement en cours, à partir de mesures de COV réalisées en milieu urbain par des associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA). Dans le travail présenté ci-après, il s'agit en l'occurrence des AASQA Airparif pour l'Île-de-France et ASPA pour l'Alsace. Ces travaux sont effectués dans le cadre du laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air (LCSQA). La Figure 9 présente le cas du pentane, un COV d'origine anthropique observé entre 2003 et 2014. La variabilité temporelle du pentane suit les évolutions saisonnières de la température mais présente également des fluctuations, de fréquence plus élevée, suggérant que sa variabilité est liée en partie à des sources anthropiques locales.

Pour l'isoprène, COV biogénique, les variations sont beaucoup plus lisses et suivent bien les variations saisonnières (Figure 9). Cependant, à partir de 2011, on constate une différence nette entre les émissions mesurées sur les sites alsacien et francilien. Une analyse plus détaillée est en cours pour interpréter ces résultats. Des différences liées à la météorologie locale, à l'environnement végétal des sites (l'isoprène est principalement émis par les feuillus tandis que les conifères émettent des terpènes) ou encore dues à des difficultés métrologiques (les COV, à l'exception du méthane, sont des composés à l'état de traces dans l'atmosphère, donc relativement difficiles à mesurer), pourraient être impliquées.

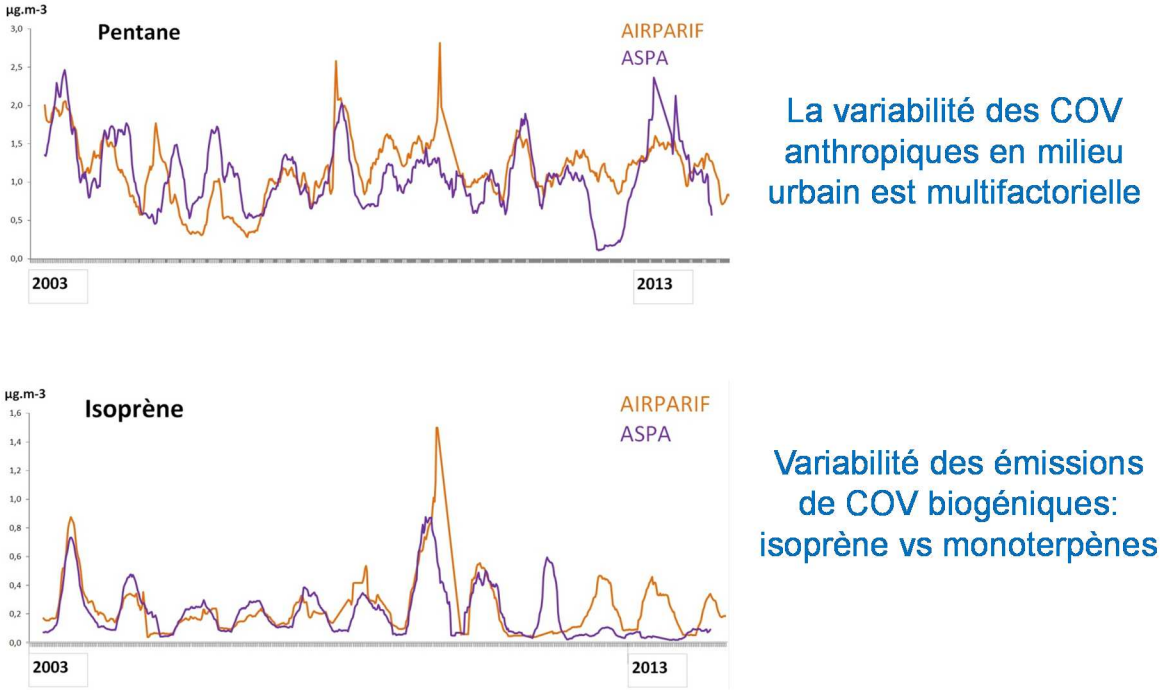



*Figure 9 : Analyse des COV observés en milieu urbain par ASPA et AIRPARIF (période 2003 – 2014)*

### Les retombées atmosphériques

Les retombées atmosphériques sont constituées des dépôts secs (gaz et poussières qui atteignent la surface terrestre en l'absence de précipitations) et des dépôts humides (gaz et poussières qui atteignent la surface terrestre sous l'effet des précipitations, incluant des espèces constitutives du nuage ou présentes dans la colonne d'air sous le nuage). Ces retombées peuvent plus ou moins contenir d'espèces polluantes qui, en se déposant sur les écosystèmes, perturbent la physico-chimie des milieux et le déroulement normal des processus biologiques. Parmi les polluants présents dans les retombées, on distingue les espèces sulfate (non marin) et nitrate, associées à des effets d'acidification des milieux, de l'espèce ammonium, ayant un effet basique au sein des retombées et un effet acidifiant et eutrophisant pour les écosystèmes. La Figure 10 montre un exemple de modélisation prospective des retombées, basée sur la mesure des dépôts sur la période 1990-2008 et la construction d'un modèle tenant compte des paramètres climatiques et des émissions. À partir de ce modèle statistique d'estimation des retombées, il est possible de calculer des projections à partir de scénarios climatiques. Pour le travail présenté à la Figure 10, la moyenne de 4 scénarios climatiques a été établie. Les projections des retombées de sulfate non marin, nitrate et ammonium ont été calculées sur la France métropolitaine pour les années 2020-2040. Concernant le sulfate non marin, elles indiquent que les dépôts seront en diminution sur l'ensemble du territoire investigué, en cohérence avec la diminution accrue des émissions soufrées anthropiques. Cependant, concernant le nitrate et l'ammonium, les projections sont contrastées, avec des diminutions ou des augmentations de dépôts selon les sites. Cette hétérogénéité spatiale importante reflète l'influence des sources locales, plus importantes pour les dépôts de nitrate et d'ammonium que pour ceux de sulfate. Elle suggère l'importance de la mise au point d'actions préventives à des échelles spatiales fines.

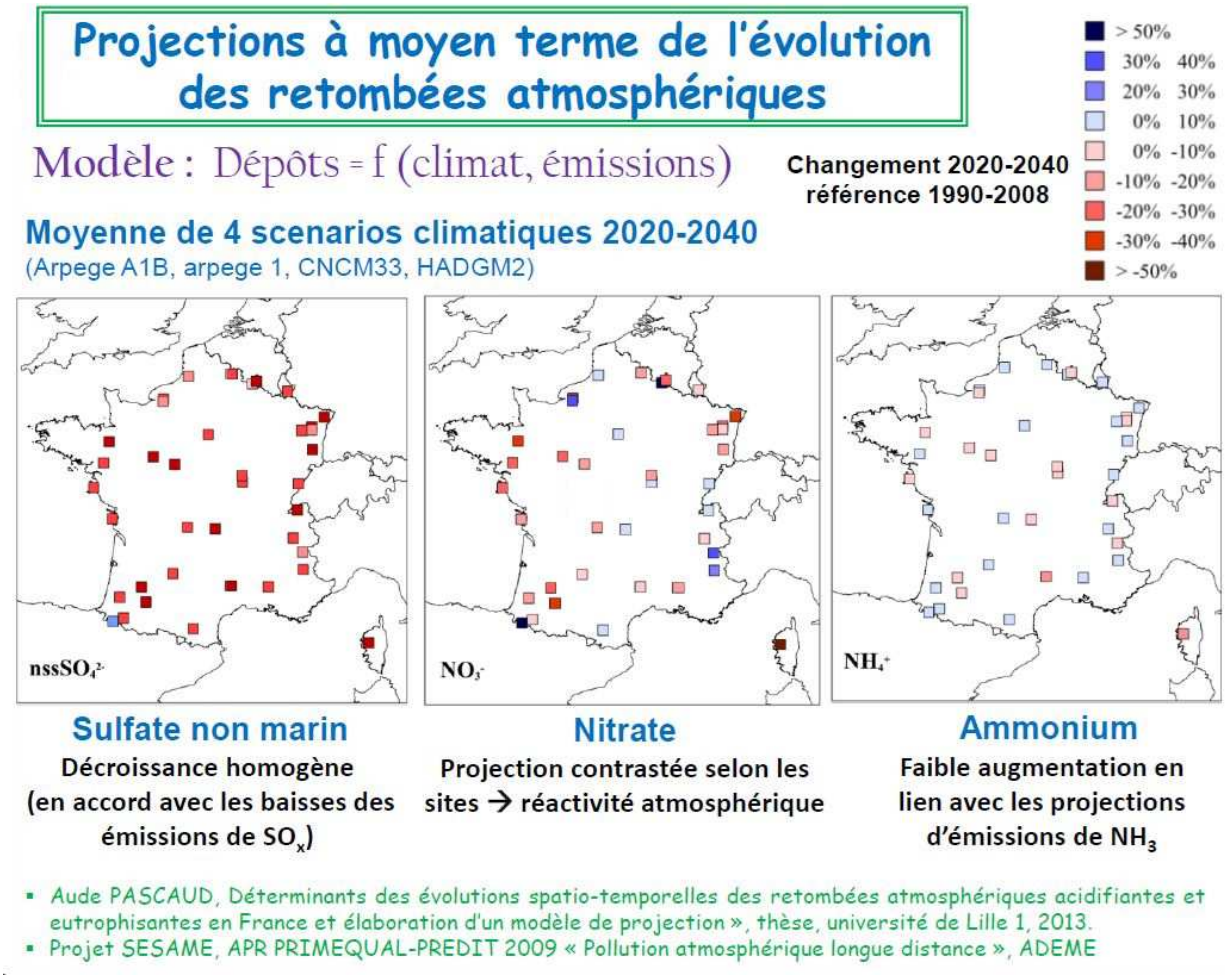



*Figure 10 : Exemple de résultat de modélisation prospective des retombées atmosphériques*

Les interactions entre polluants atmosphériques, météorologie et changement climatique sont complexes. En France, les émissions de COV anthropiques tendent à baisser mais celles des COV biogéniques augmentent. Il existe une incertitude importante sur ces dernières car elles dépendent des espèces végétales impliquées et du fonctionnement des végétaux. Or, des évolutions d'espèces végétales et des modifications de leur fonctionnement, dues notamment aux situations de stress hydrique, sont attendues. Concernant les retombées atmosphériques, les projections indiquent qu'il pourrait exister une différence d'évolution selon les espèces chimiques et une grande variabilité spatiale des dépôts.

L'ensemble de ces observations environnementales étant relativement récent, il apparait nécessaire de poursuivre les efforts de recherche pour disposer de périodes d'observation plus longues, requises pour inférer des modèles fiables. En région Nord-Pas de Calais, le programme de recherches interdisciplinaire CLIMIBIO devrait œuvrer utilement en ce sens.

### Références bibliographiques


Lohmann, U., Feichter, J., 2005. Global indirect aerosol effects: a review. *Atmos. Chem. Phys.*, 5, p. 715-737.

Pascaud, A., 2013. *Déterminants des évolutions spatio-temporelles des retombées atmosphériques acidifiantes et eutrophisantes en France et élaboration d'un modèle de projection*. Thèse de doctorat, Université Lille 1 Sciences et Technologies, Villeneuve d'Ascq.

Pascaud, A., Sauvage, S., Wroblewki, A., Coddeville, P., Probst, A., Mansat, A., Roustant, O., Croise, L., Nicolas, M., Mezdour, A., 2014. *20 ans de mesureS des retombEeS AtMosphériquEs en France (SESAME)*. Programme PRIMEQUAL 2 rapport de fin de contrat. 138 pp. http://www.rst.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Primequal_SESAME_cle1bda8e.pdf.

Sauvage, S., 2008. *Origine et comportement des composés hydrocarbonés non méthaniques (HCNM) en zone rurale*. Thèse de doctorat, Université Lille 1 Sciences et Technologies, Villeneuve d'Ascq.

Xiang, Y., Delbarre, H., Sauvage, S., Léonardis, T., Foumentin, M., Augustin, P., Locoge, N., 2012. Development of a methodology examining the behaviours of VOCs source apportionment with micro-meteorology analysis in an urban and industrial area. *Environmental Pollution*, 162, p. 15-28. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2011.10.012

# Analyse d'un événement « extrême » de pollution : mars 2014 du satellite … au microscope

Philippe GOLOUB, Laboratoire d'Optique Atmosphérique, UMR 8518 CNRS/ UMR 8522 CNRS/ Université de Lille - Sciences et Technologies, Marie CHOËL, LAboratoire de Spectroscopie Infrarouge et Raman, UMR 8516 CNRS/ Université de Lille - Sciences et Technologies, Véronique RIFFAULT, Département Sciences de l'Atmosphère et Génie de l'Environnement (SAGE), Ecole des Mines de Douai

Cette communication décrit un événement de pollution particulaire que l'on peut qualifier d'extrême par rapport aux normes habituelles. Cet événement s'est déroulé en mars 2014 mais il s'est reproduit en 2015 avec une intensité moindre. Il existe en région un ensemble de moyens d'observation qui permettent d'étudier ces phénomènes à plusieurs échelles, du microscope au satellite. La carte colorée de la Figure 1 indique l'opacité en particules vu à partir d'un satellite sur le nord de la France et les environs le 14 mars 2014 et montre que l'opacité en particules était assez importante sur notre région.

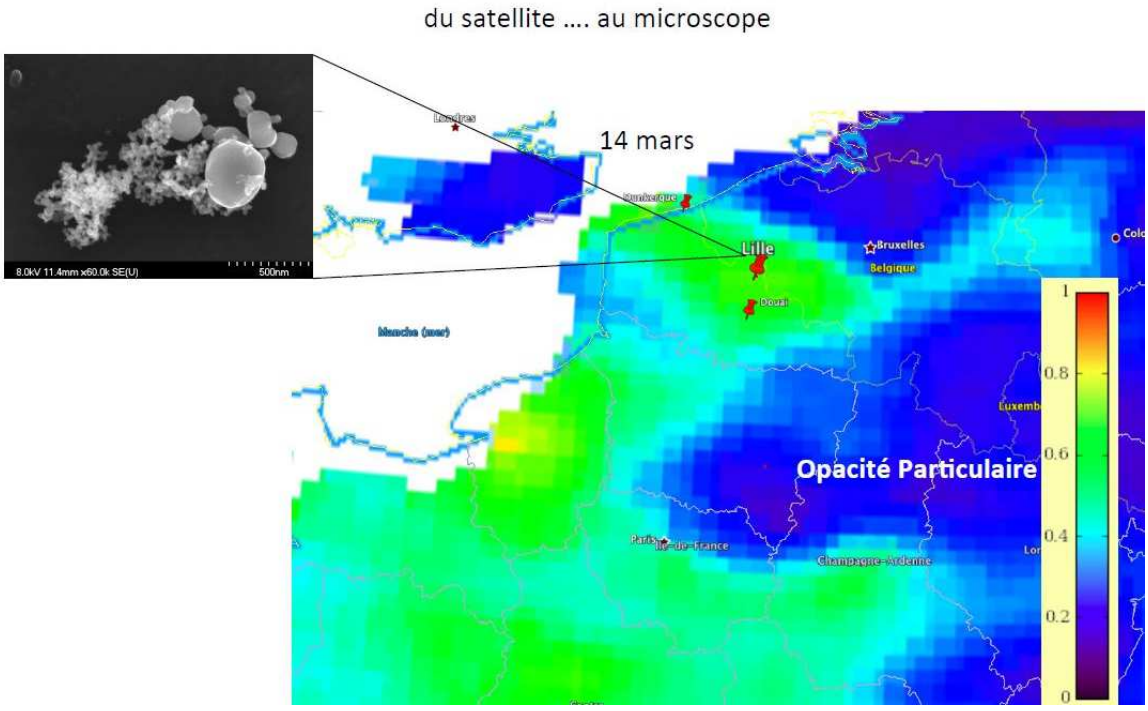



*Figure 1 : Epaisseur optique de l'atmosphère déterminée à partir de l'instrument MODIS embarqué sur les satellites météorologiques de la NASA. L'épaisseur optique est une mesure de l'opacité de l'atmosphère. Dans la région de Lille, la couleur verte qui correspond à une épaisseur optique de 0,6 signifie que l'atmosphère ne transmet qu'environ 55 % du rayonnement solaire (exp( -0,6) = 0,55)*

### Une base de comparaison : la situation d'avril 2015

La situation de mars 2014 peut être comparée à celle d'avril 2015. La Figure 2 présente une coupe verticale de l'atmosphère (l'axe vertical correspond à l'altitude) en fonction du temps du 1er au 3 avril, ce qui peut être vu comme une radiographie de l'atmosphère... Dans ce cas, l'échantillonnage est limité à 6 km, et l'échelle de couleur indique qualitativement la concentration en particules. Il est à noter que les zones très rouges à hautes altitudes sur la Figure 2 montrent la présence de nuages.

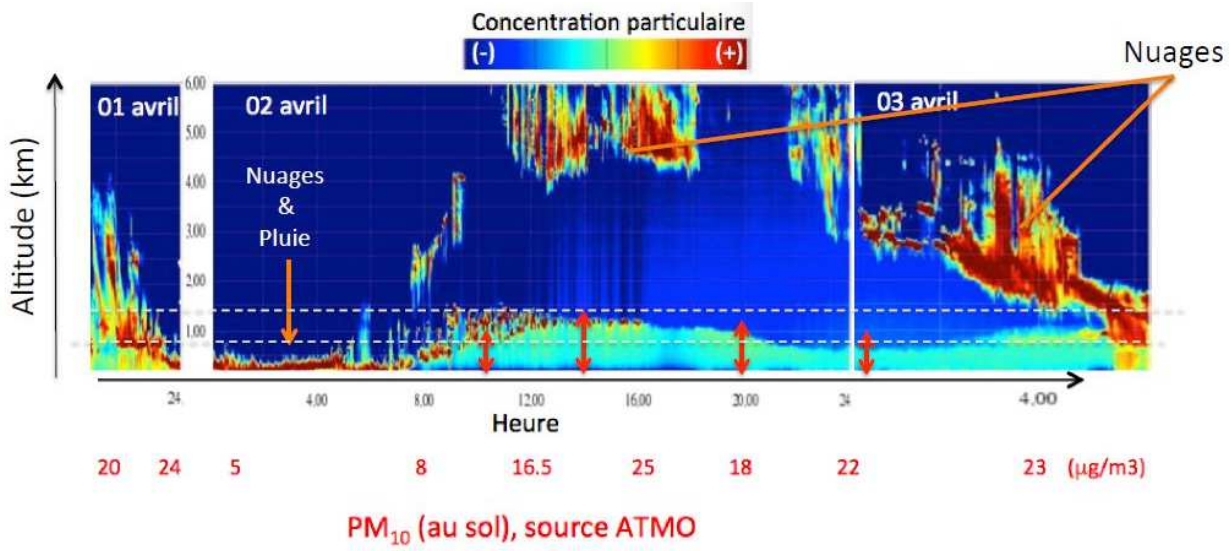



*Figure 2 : Profil vertical de la concentration de l'atmosphère en particules du 1er au 3 avril 2015, au moyen du LiDAR du LOA à Villeneuve d'Ascq.*

La « couche limite » dont l'épaisseur oscille dans notre région entre 1,5 (épaisseur habituelle au printemps) et 2 km selon les saisons, est très nettement visible. L'épaisseur varie aussi de façon cyclique au cours de la journée et au cours de la nuit, en relation avec la température du sol. Les polluants et les particules émises localement ou issues de sources parfois très lointaines sont en général localisés dans cette couche. Dans la troposphère libre, entre 2 et 10 km, il s'agit plutôt de particules provenant de sources lointaines.

Les mesures satellitaires, à mettre en parallèle des concentrations massiques en particules, notée PM, mesurées au sol par le réseau qualité de l'air de la région (axe en rouge sur la Figure 2) varient au cours du temps et notamment en fonction des précipitations qui nettoient l'atmosphère. C'est la raison pour laquelle la visibilité est bien meilleure après une grosse averse. Les concentrations mesurées sont de l'ordre de 20 microgrammes par mètre cube avant l'événement pluvieux, tombent à 5 ou 6 lors des précipitations puis augmentent pendant la journée qui suit.

## Une pièce en deux actes

### *Acte 1 : L'événement extrême de mars 2014*

La situation de mars 2014 est assez semblable à celle d'avril 2015 mais l'amplitude est plus importante. L'acte 1 se déroule du 11 au 14 mars. La Figure 3 montre une concentration extrêmement importante sur une épaisseur réduite, entre 0 et 600 m. Cette situation, qui a perduré pendant plusieurs jours, est liée à la fois aux émissions et aux conditions météorologiques. Cet épisode s'est terminé vers les 15 et 16 mars avec l'arrivée de la pluie qui a nettoyé l'atmosphère pour quelques jours (Figure 6). La Figure 4 résume l'évolution de la couche du 11 au 14 mars. La concentration en particules reste très élevée et très concentrée dans les premiers 500 ou 600 m d'altitude. Les concentrations massiques, qui sont notées pour les deux premiers jours atteignent jusqu'à 100 microgrammes par $m^3$, niveaux bien supérieurs aux 20 microgrammes par $m^3$ de début avril 2015.

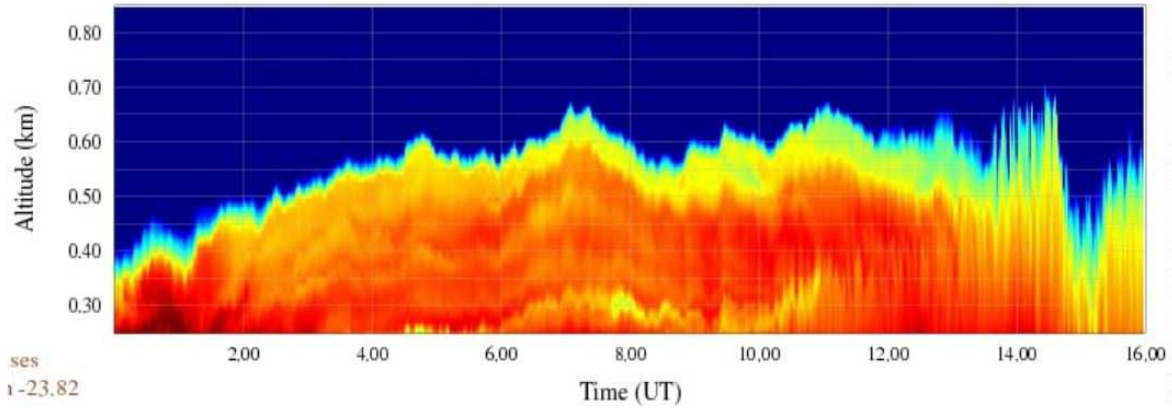



*Figure 3 : Profil vertical de la concentration de l'atmosphère en particules le 11 mars 2014, au moyen du LiDAR du LOA à Villeneuve d'Ascq*

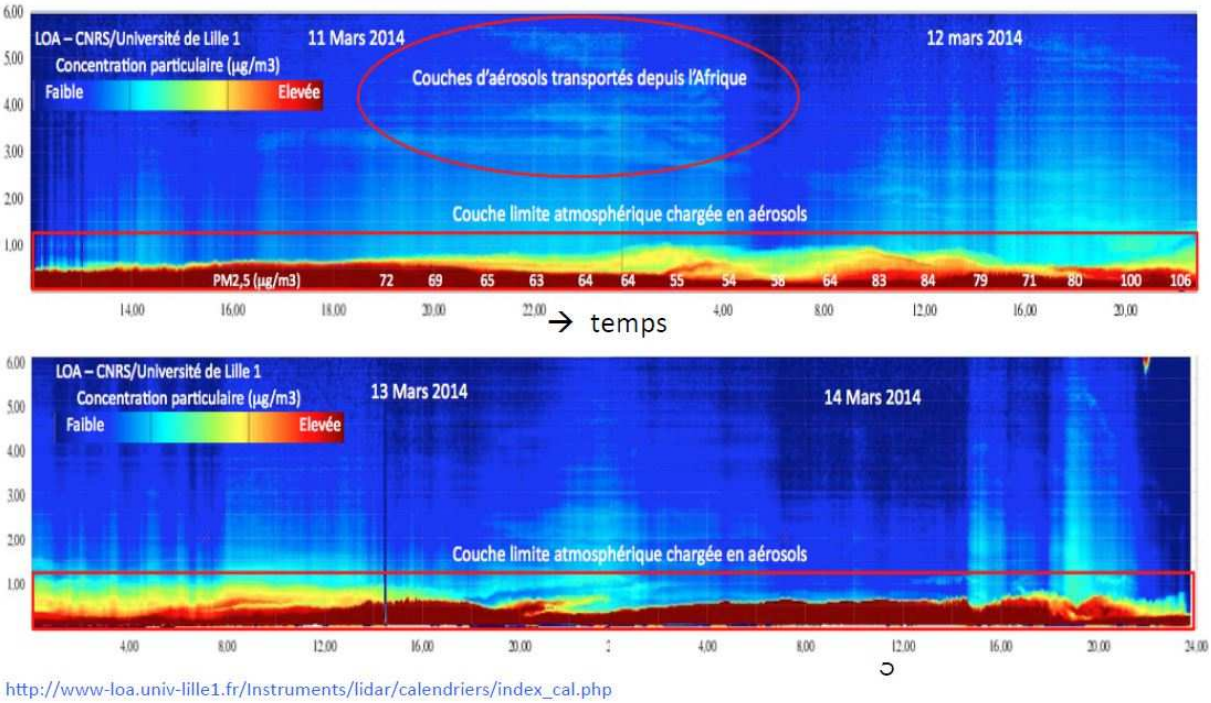



*Figure 4 : Profil vertical de la concentration de l'atmosphère en particules entre le 11 mars et le 14 mars 2014. Attention : l'épaisseur sondée est cette fois de 6 km au lieu de 600 m pour la Figure 3.*

Il est aussi à noter qu'à cette pollution intense des basses couches se superposaient, vers 3 à 5 km d'altitude, des apports de particules d'origine très lointaine, ici des aérosols en provenance des régions arides ou désertiques comme le Sahara. Mais cela restait un phénomène mineur par rapport à ce qui se passait à cette période dans les basses couches.

### Identification des sources (événement de mars 2014)

A l'aide de modèles météorologiques dits de "rétro-trajectoire", il est possible de déterminer la provenance des masses d'air qui ont apporté cette pollution. La circulation automobile, l'agriculture et les industries de la région ne sont pas les seules en cause. Les trajectoires des masses d'air qui ont survolé la région à différentes altitudes (Figure 5) montrent que d'autres origines sont présentes avec des sources jusqu'en Pologne.

D'autres modèles sont aussi utilisés pour prédire les concentrations à venir (Figure 5, gauche). On notera que la concentration prévue, de l'ordre de 100 microgrammes par m³ (couleur jaune foncée) est en très bon accord avec les observations.

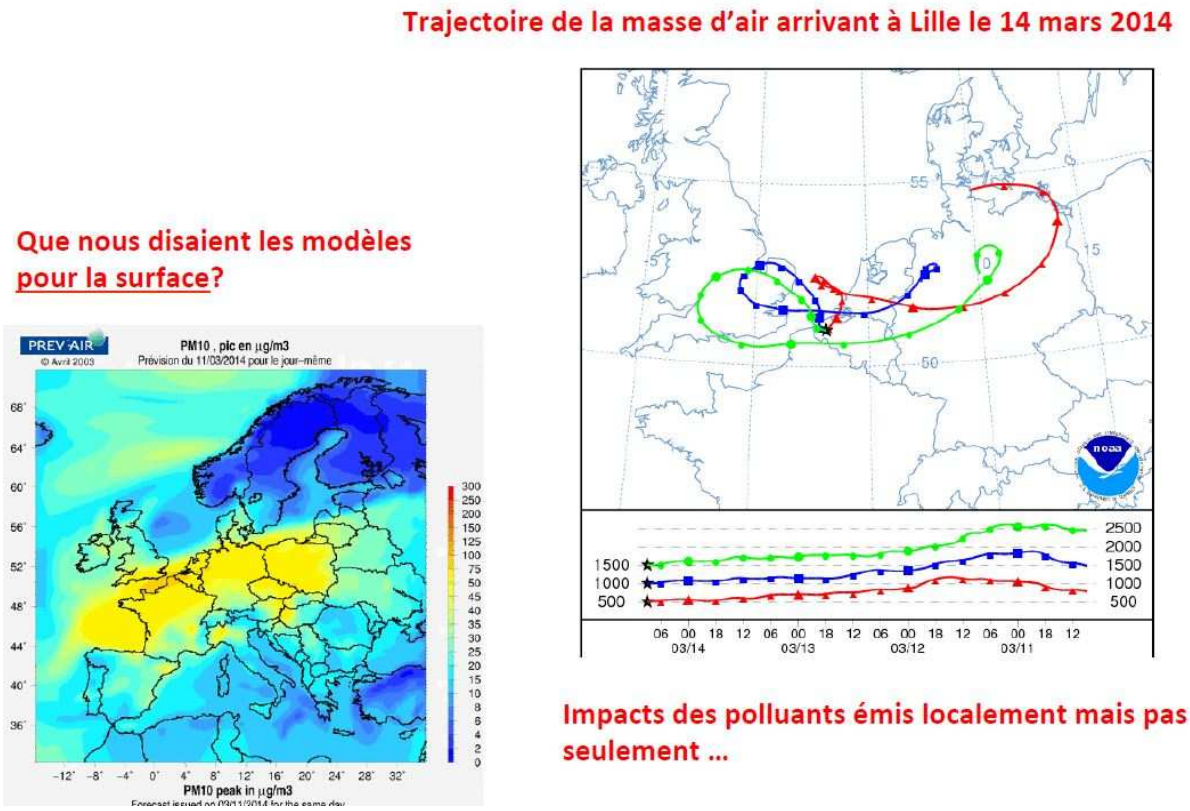



*Figure 5 : Analyse météorologique et rétro - trajectoires des masses d'air à droite, Prévision des concentrations en masse à la surface à gauche.*

### Evolution des basses couches en mars 2014

On peut suivre l'évolution des niveaux en particules tout au long du mois de mars.

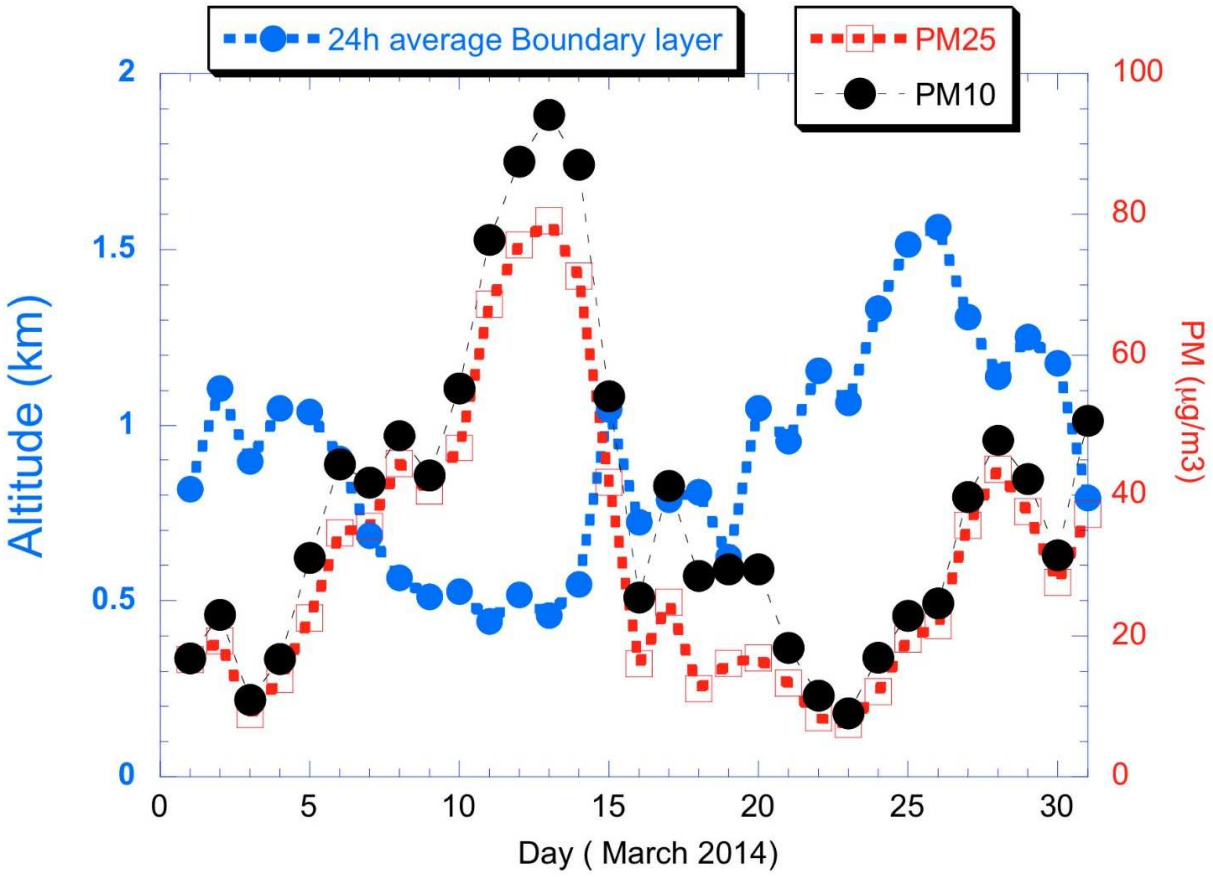



*Figure 6 : Evolution de l'épaisseur de la couche limite obtenue à partir des données LiDAR (en bleu) et évolution de la concentration massique en particules à la surface (en rouge)*

La Figure 6 montre les évolutions simultanées de la couche limite atmosphérique (en bleu, zone où se situe la très grande partie des polluants particulaires) et de la concentration massique en particules à la surface (en rouge). L'épaisseur de la couche diminue fortement au tout début de l'épisode, passant de 1000 m à moins de 500 m, elle augmente en fin de période avec différents accidents. On constate que lors de l'affaissement de la couche limite, la concentration en particule est maximale

Seuls les LiDARs[1] permettent de préciser (avec une incertitude lié à l'instrument) la répartition verticale de ces particules depuis la surface ou presque et son évolution dans le temps (Figure 7, en haut à gauche). Ces mesures de qualité de l'air sont les plus précises à proximité des surfaces mais, dès que l'on s'élève un peu en altitude, il faut avoir recours à d'autres techniques qui permettent de compléter l'analyse. La figure en haut à droite de la

[1] **LiDAR**, « Light Detection And Ranging » est un instrument incontournable de télédétection active basée sur l'analyse des propriétés d'un faisceau laser renvoyé vers son émetteur. Il permet le sondage vertical des couches de l'atmosphère.

Figure 7 montre le spectre de taille de ces particules. Au cours de cet événement, les particules sont surtout de taille bien inférieure à un micromètre. Du fait de leur faible volume, ce ne sont cependant pas nécessairement ces petites particules qui contribuent le plus à la masse en particules. Dans le même temps, des prélèvements d'air permettent d'étudier les particules en laboratoire avec différentes techniques de microscopie dont un exemple est fourni sur la Figure 7 (en bas, à droite).

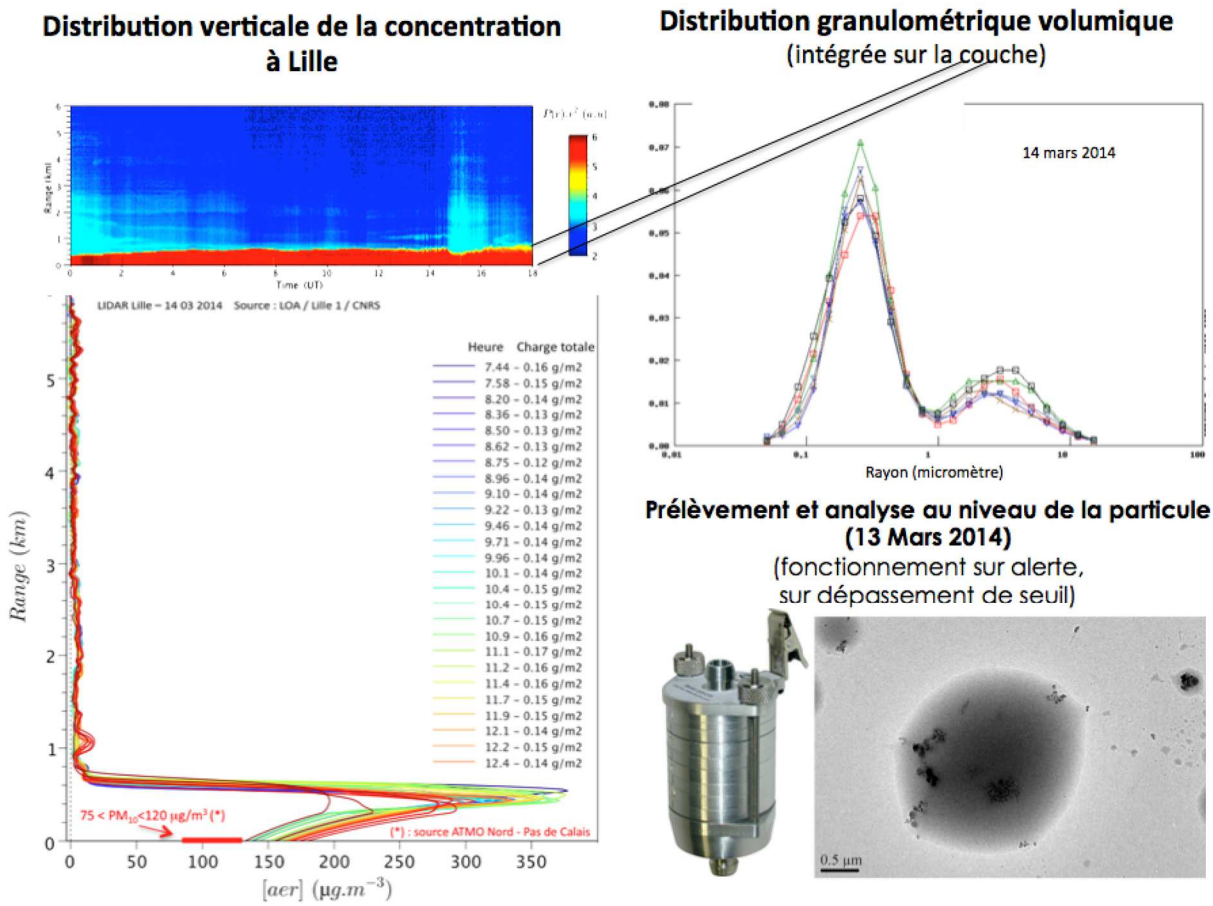



*Figure 7 : Evolution temporelle du profil vertical de la concentration en particules (en haut à gauche, les couleurs correspondent aux heures indiquées dans la figure), Répartition granulométrique des particules pour différentes heures déduite de mesures photométrique (en haut à droite) et Analyse microscopique individuelle (en bas à droite)*

L'analyse des prélèvements (Figure 8) permet de préciser la composition des particules prélevées. C'est un processus long qui ne peut pas être accompli en temps réel. En l'occurrence, l'analyse a révélé une prédominance d'aérosols carbonés de multiples origines, du soufre, du potassium, beaucoup de particules entourées ou logées au sein d'une gouttelette. Ces particules restent assez longtemps dans l'atmosphère et peuvent donc interagir avec les gaz présents et en particulier avec la vapeur d'eau, ce qui affecte leurs propriétés.

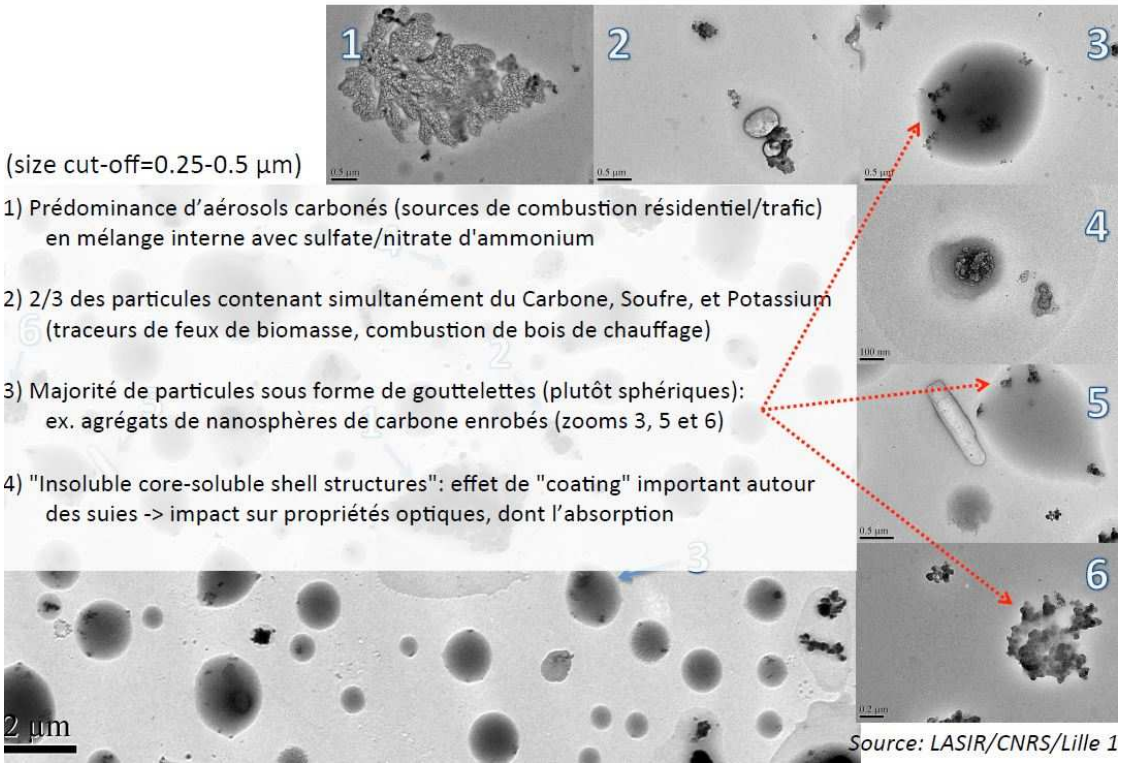



*Figure 8 : Analyse individuelle de particule par microscopie (MET/EDX)*

D'autres techniques (disponibles au LPCA ou aux Mines de Douai) permettent le suivi de la composition chimique particulaire non pas d'une particule mais d'un ensemble de particules prélevées également au niveau du sol. Ce suivi se fait au moyen de spectromètres de masse. Sur la série temporelle présentée sur la Figure 9 entre le 13 et le 14 mars de la même année, les codes de couleur permettent d'identifier la présence d'aérosols organiques primaires ou issus de transformations chimiques, de nitrates et de mesurer leurs concentrations massiques.

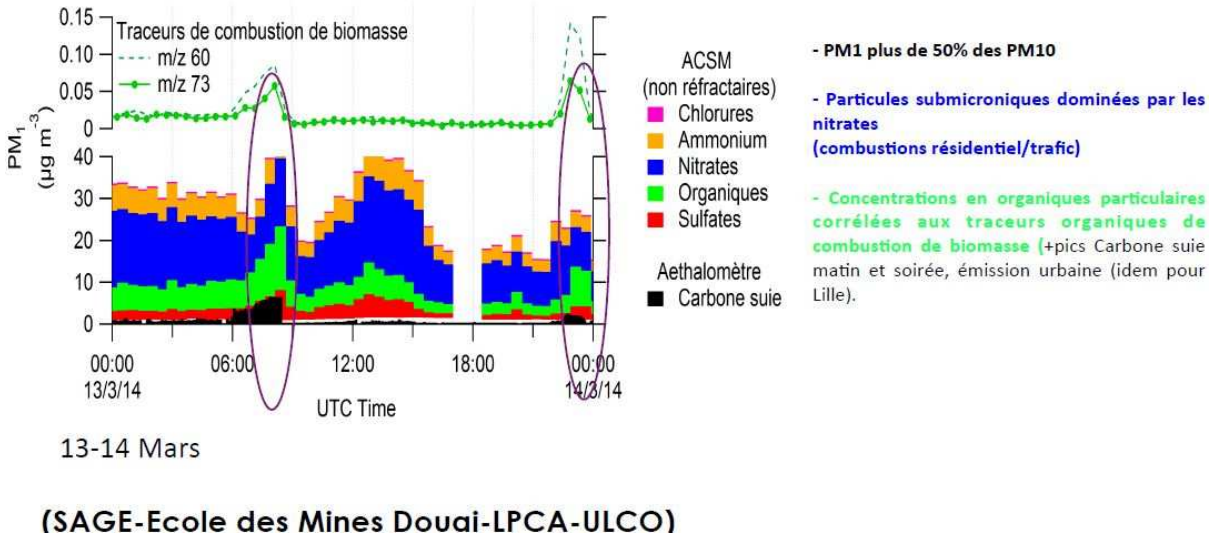



*Figure 9 : Mesure de la composition chimique des particules en surface de diamètre inférieur à 1 micromètre.*

### *Acte 2 : Un passage d'aérosols désertiques*

Après l'épisode pluvieux qui a nettoyé l'atmosphère vers le 16 mars, un autre événement a eu lieu à la fin du mois. Celui-ci n'était pas du tout d'origine locale. La Figure 10 montre la trajectoire des masses d'air qui ont survolé Lille le 27 mars 2014. L'origine est clairement une région du Sahara, qui était très active quelques jours auparavant (en bas, à droite). Il s'agit d'une situation assez fréquente mais son intensité était exceptionnelle: dans ce cas, les particules d'origine désertique occupaient une couche de 5 ou 6 km d'épaisseur.

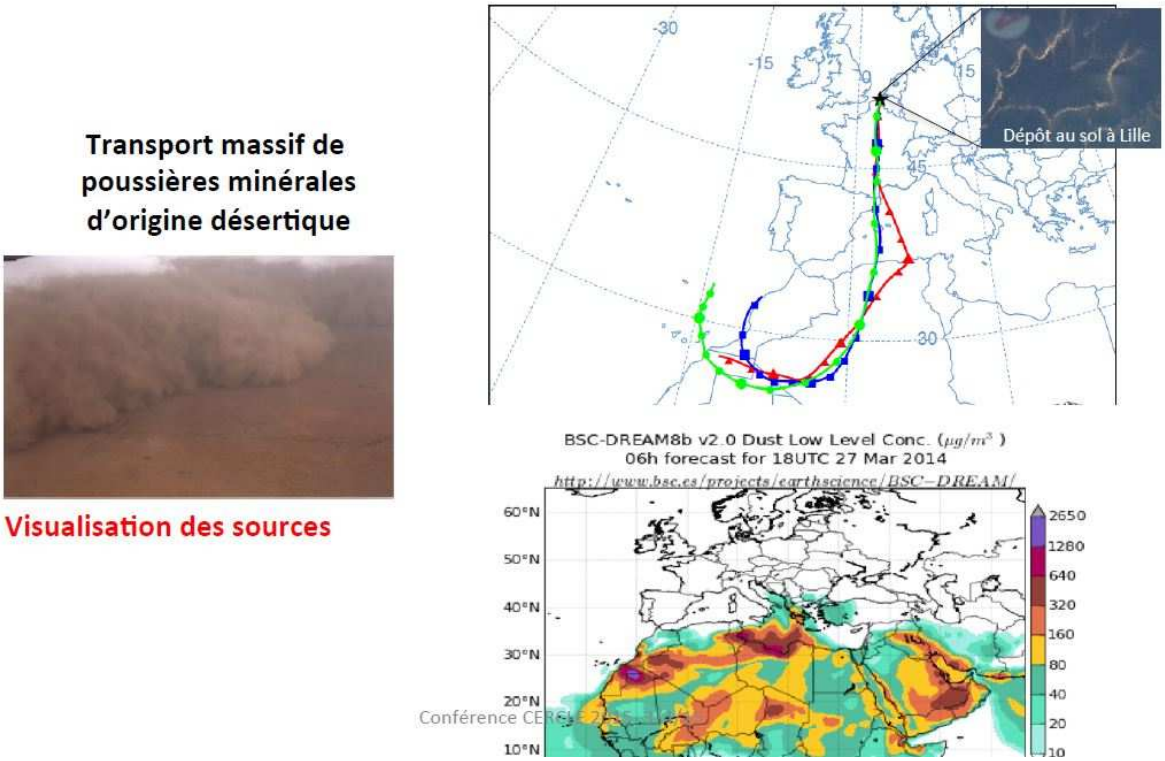



*Figure 10 : Rétro-trajectoires des masses d'air qui ont concerné la région lilloise fin mars 2014 et régions sources*

La Figure 11 compare les deux événements qui se situent à une dizaine de jours d'intervalle. La partie supérieure concerne l'épisode d'aérosols sahariens. Cet épisode a concerné l'ensemble du pays. La couche de poussières est très épaisse, elle fait plus de 6000 m. Au contraire, dans le cas du premier épisode du 14 mars, les particules sont concentrées dans une couche dix fois moins épaisse. Dans le cas des aérosols désertiques, le transport à longue distance se fait dans la troposphère libre, au-dessus de la couche limite atmosphérique au contraire du cas de pollution de début mars où l'essentiel des particules est transporté dans la couche limite ou généré à proximité. Dans les deux cas, une partie des particules se dépose en surface, particulièrement par l'intermédiaire des précipitations mais pas uniquement.

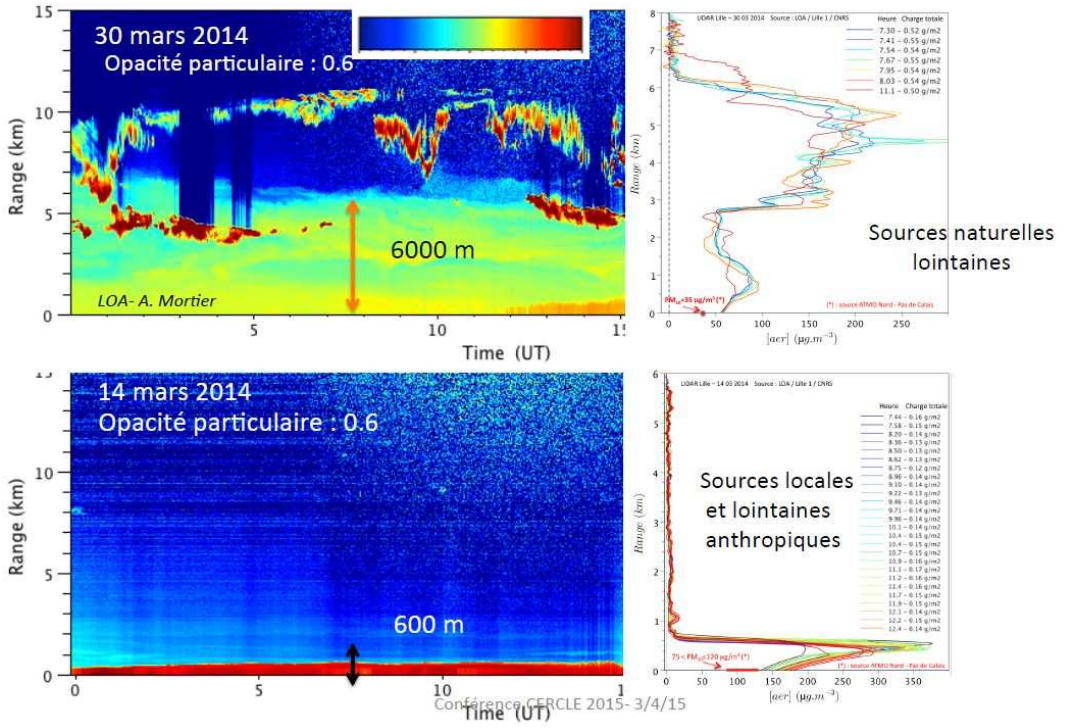



*Figure 11 : Comparaison des deux événements de mars 2014*

La figure 12 compare les distributions granulométriques des 14 et 30 mars (à gauche). La différence est très nette : les particules désertiques sont plus grosses avec un rayon de plusieurs micromètres. Elles sont aussi très différentes des particules de pollution de la mi-mars quant à leur forme et leur composition (à droite).

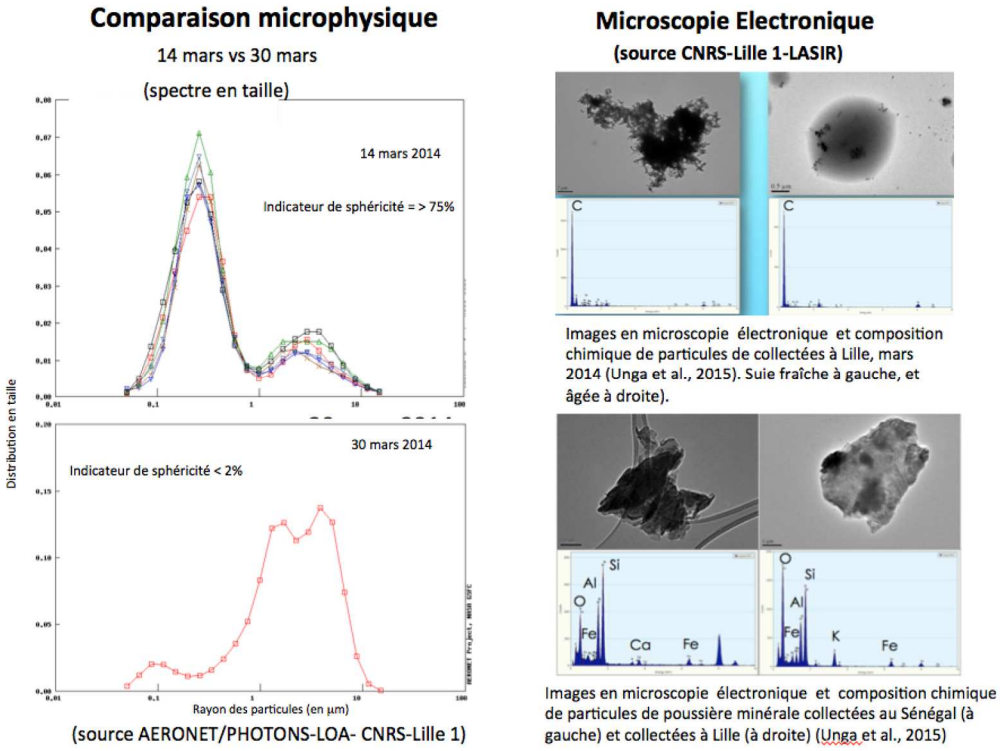



*Figure 12 : Distributions granulométriques et analyses microscopiques de la morphologie et de la composition chimique des particules : événement de pollution du 14 mars en haut, aérosols désertiques de fin mars en bas*

La Figure 13 présente un résumé des observations LiDAR faites au LOA de 2008 à 2013. En mars avril, les épisodes de pollution (teintes rouges sur la figure) sont assez récurrents. Ils correspondent aux un ou deux mois généralement beaux dans notre région, propices à l'accumulation de polluants.

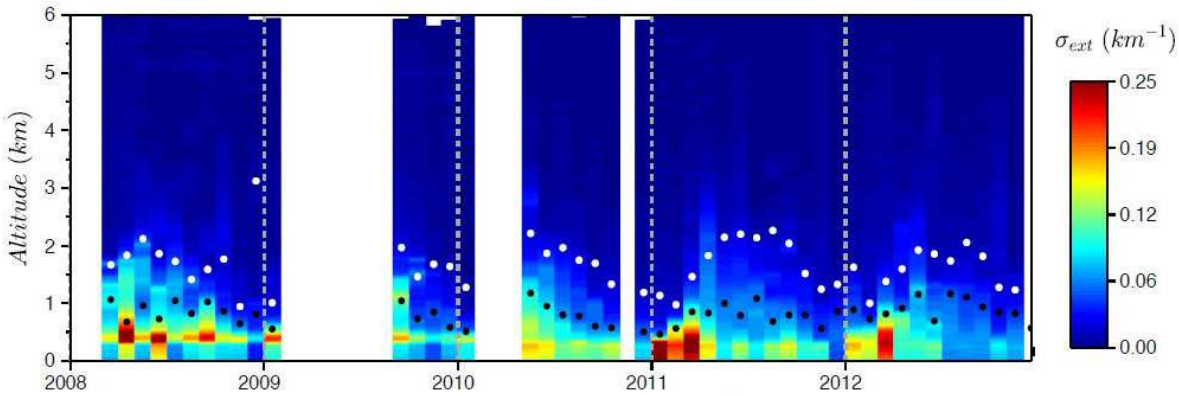



*Figure 13 : Résumé historique des observations LiDAR à Lille (source LOA) de 2008 à 2013*

### De l'importance des observations

La présentation de résultats issus des différents moyens disponibles dans la région montrent qu'ils sont complémentaires et permettent une analyse fine des particules en suspension dans l'atmosphère. Pour une grande part, cette analyse est possible en temps réel et permet de déceler d'éventuelles tendances. Avec le changement climatique, on peut s'attendre à des modifications des conditions météorologiques susceptibles d'influencer les épisodes de pollution aussi bien quantitativement que qualitativement. Il est donc essentiel de maintenir et développer ces observations de la pollution atmosphérique au sol et également plus haut dans l'atmosphère. Cela fait plusieurs dizaines d'années que les laboratoires régionaux mettent en place de nouveaux instruments, qui sont améliorés, et qui enrichissent cet ensemble d'instrumentation. Maintenir cet effort dans la durée est absolument essentiel, cela signifie maintenir et développer l'instrumentation mais aussi les équipes capables de la mettre en œuvre et d'en analyser les résultats. Un certain nombre de projets ces dernières années permettent, au niveau régional, d'aller dans la bonne direction.

La liste ci-dessous présente les **projets en cours** et leurs objectifs

Au niveau régional IRENI et le Labex CAPPA permettent de structurer les observations : moyens performants de mesures et de surveillance en région, structuration des moyens d'observation atmosphérique multi-échelles. Relation avec ATMO-NPdC (partage de données et d'expériences)

CLIMIBIO vient de commencer, une partie de l'activité sera dédiée à l'organisation de campagne en région pour aider à améliorer les modèles qui s'appuient toujours sur des observations multiparamètres au service d'un outil prédictif et de la communauté : dimensionner, coordonner, réaliser et exploiter des observations ciblées, concertées et multidisciplinaires en région Nord - Pas de Calais et dans les zones limitrophes

Développement de l'Observatoire des Sciences de l'Univers (OSU-Nord)

Au niveau national, l'ensemble des dispositifs d'observation de l'atmosphère est en cours de structuration. Les laboratoires de la région y sont très impliqués : LOA, SAGE (Ecole des Mines de Douai, ICARE* (centre de données spatiales mis en place avec l'appui très actif de la Région). IR-ATMO /SOERE-ATMO : orchestrer le fonctionnement d'équipements de télédétection et de mesures au sol.

Au niveau Européen H2020/IR-ACTRIS : Aerosols Clouds and Trace gas Research Infrastructure. La dimension européenne du sujet est bien évidente quand on examine l'étendue des épisodes de pollution et leurs sources. La coopération se traduit par des projets européens (Ecocert, H2020) qui sont en cours ou vont commencer tel que le projet ACTIRIS, qui est consacré à l'étude des aérosols, des gaz ou des nuages, ayant un rôle important dans les processus atmosphériques. Ce projet va fédérer un grand nombre de laboratoires français et européens.

### Références bibliographiques


Communiqués de presse

Boichu, M. *Le panache du volcan islandais Bardarbunga pollue l'air du Nord - Pas de Calais,* LOA. http://www.insu.cnrs.fr/node/5030

Goloub, P. *Des polluants entassés sur 600m et des poussières désertiques au dessus du Nord-Pas de Calais,* LOA. http://www-loa.univ-lille1.fr/Accueil/documents/14-03-17-CP-Pollution.pdf

Journées et comités scientifiques CaPPA (posters et présentations)

(disponibles à http://www.labex-cappa.fr/actualites/JSC2015) :

Bovchaliuk, V., 2015. *Aerosol Optical and microphysical properties retrieved from the combination of LILAS multiwavelength-Raman LIDAR and sun/sky photometer*, poster (2eme Journée scientifique CaPPA).

Rivellini, L., Riffault, V., Chiapello, I., Tison, E., Crumeyrolle, S., Goloub, P., 2015. *Preliminary analysis of in situ and optical measurements of particulate pollution during winter 2014/2015 at Lille,* poster (2eme Journée scientifique CaPPA).

Boichu , M., Goloub, P., Chiapello, I., Péré, J.-C., Podvin, T., Blarel, L., Brogniez, C., Thieuleux, F., Deroo, C., Sohne N., Tanré, D. 2015. *Volcanogenic air pollution In France induced by the ongoing Holuhraun/Bardarbunga icelandic eruption*, poster (2eme Journée scientifique CaPPA).

Unga, F., 2015. *Tracking of aerosols by remote sensing and in-situ measurements during particulate pollution events in Lille*, poster (2eme Journée scientifique CaPPA).

Goloub, P., Delbarre, H., Descloitres, J., 2014. *Aerosol observations. Instrumentation and intensive Field Campaigns. Monitoring from Networks and Satellites. Focus on pollution events in Lille and Dunkerque in 2014*. Conseil Scientifiques CaPPA, juillet 2014, Université de Lille– Sciences et Technologies

Thèses

Mortier, 2013. *Tendances et variabilités de l'aérosol atmosphérique à l'aide du couplage LiDAR/Photomètre sur les sites de Lille*, LOA, Université de Lille – Sciences et Technologies

Présentations et posters, 1ere Journée Scientifique CLIMIBIO, janvier 2015

Locoge, N., Goloub.P. Des observations au service d'un outil prédictif et de la communauté. LOA, Université de Lille – Sciences et Technologies

Allemand, L. Aérosols et précurseurs gazeux : passé, présent et avenir, SAGE, Mines Douai.

Minvielle, F. Caractérisation des sources et de la dynamique régionale et locale. LOA, Université de Lille – Sciences et Technologies

Dauchet, L. Projet Elisabet (Enquête Littoral Souffle Air Biologie Environnement). INSERM 744 /IMPECS Université de Lille / CHRU Lille.

Delbarre, H. Apport de la plateforme IRENE aux objectifs de CLIMIBIO. LPCA, Université de Lille – sciences et technologies

Goloub, P. Ground-Based Aerosols Detection and Characterization. A Remote Sensing and in situ Regional Platform. LOA, Université de Lille – Sciences et Technologies.

Choel, M., Superville, P.J. et al. Développement d'outils adaptés pour le suivi sur site d'évènements exceptionnels. LASIR, Université de Lille – Sciences et Technologies

# Pollution de l'air : des échelles météorologique et climatique

Hervé DELBARRE

Laboratoire Physico-chimie de l'Atmosphère,
Université du Littoral Côte d'Opale

L'objectif de cette communication est de mettre en exergue l'importance des échelles spatiales et temporelles des phénomènes relatifs à la météorologie et la qualité de l'air dans un contexte de changement climatique. L'enjeu est de prévoir à très long terme (à une échelle séculaire) comment pourront évoluer les phénomènes météorologiques de courte durée et d'en prévoir les conséquences sur la qualité de l'air et la santé. Une étude européenne[1], menée il y a une dizaine d'années, a montré une diminution de l'espérance de vie attribuable aux particules fines de type PM2.5, c'est à dire des particules de taille inférieure à 2,5 microns (Figure 1). En région Nord - Pas de Calais et plus largement en Europe du Nord, ce déficit atteint 36 mois, ce qui montre l'importance de la question de la qualité de l'air au regard de la santé et conduit à s'interroger sur les perspectives dans un contexte d'évolution du climat.

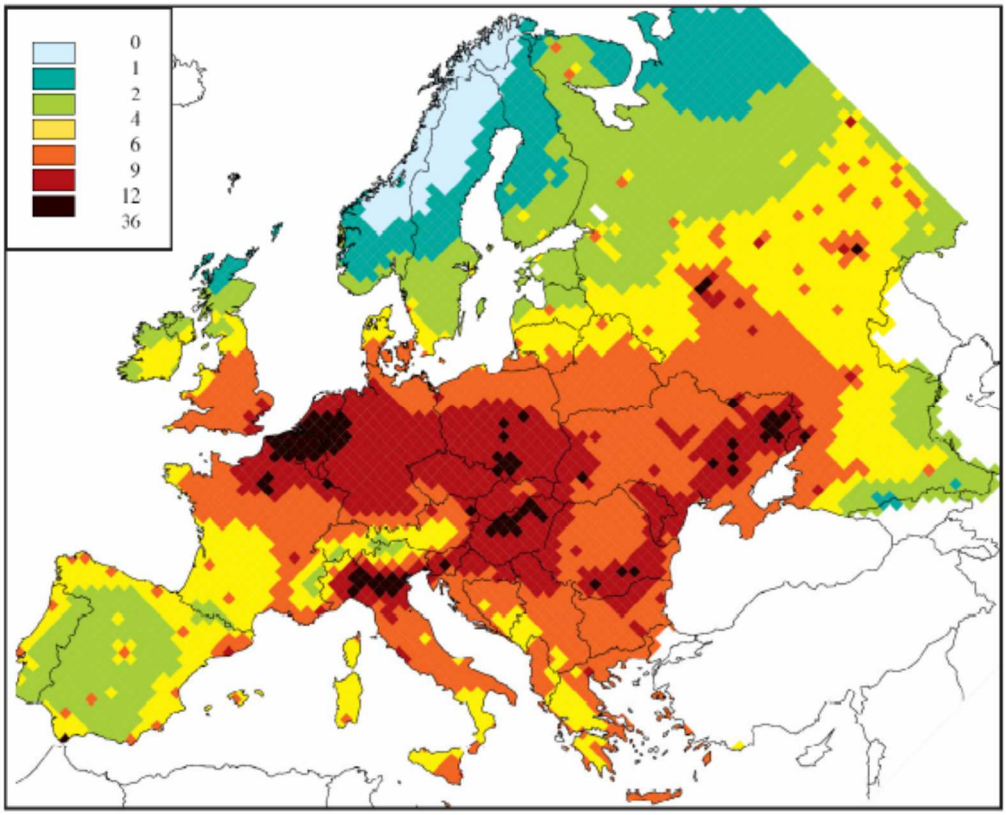



*Figure 1 : Estimation de la diminution de l'espérance de vie (en mois) attribuée à la fraction fine de l'aérosol anthropique (estimation de 2000 sur des données météorologiques de 1997), source CAFE*

[1] Programme Clean Air for Europe (CAFE) : http://ec.europa.eu/environment/archives/cafe/activities/pdf/cafe_scenario_report_6.pdf

Ces questions sont étudiées depuis plusieurs années en région à travers plusieurs programmes de recherche qui se sont succédés avec l'appui du Contrat de Plan Etat-Région (CPER) : un programme sur la qualité de l'air (CPER 2000-2006), la création de l'Institut de Recherche en Environnement Industriel (CPER 2007-2013). Actuellement, le programme d'investissements d'avenir finance un laboratoire d'excellence (LABEX CaPPA 2012-2020), sur la question majeure des aérosols.

Grâce à une approche pluridisciplinaire, de nombreux progrès ont été faits dans l'observation et la compréhension des phénomènes de pollution de l'air par les composés gazeux et aérosols (Figure 2) au cours de cette période. Ils passent, entre autres, par l'établissement d'inventaires des émissions, le développement de capteurs, l'étude du transport et de la dispersion des polluants, la modélisation, l'étude des transformations physico-chimiques, l'impact des polluants sur la santé et les écosystèmes, la perception des nuisances... Cependant, ces travaux, menés sur une période d'à peine plus d'une dizaine d'années, ne donnent qu'une représentation instantanée de l'état de l'atmosphère à l'échelle de temps considérée pour l'évolution du climat, c'est à dire au moins 30 ans. Il s'agit maintenant de mener une étude beaucoup plus large, à la croisée des travaux en météorologie et en climatologie.

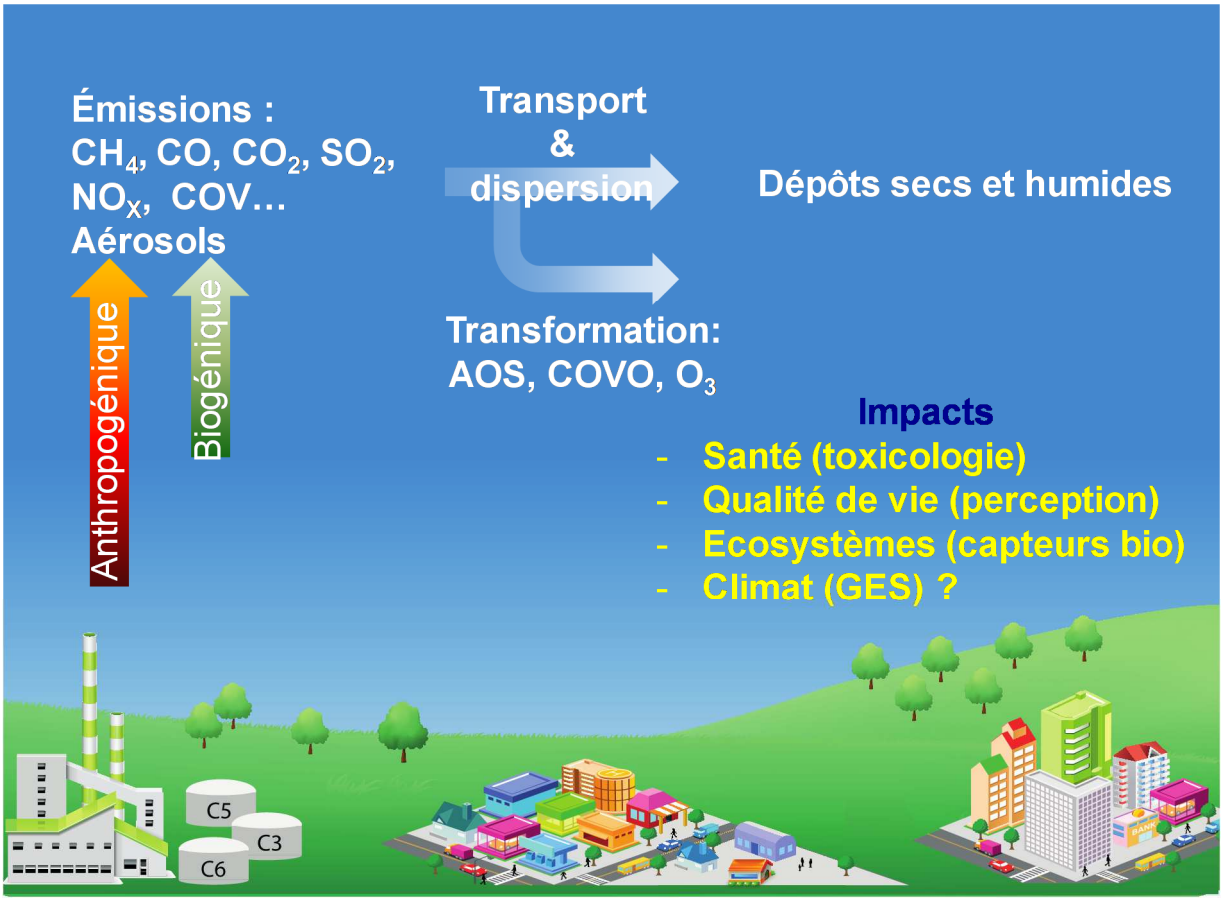



*Figure 2 : Schéma des principaux phénomènes de pollution de l'air et leur impact, source : LPCA*

### Quid de la pollution à l'échelle météorologique ?

Les études menées au cours des différents programmes ont montré que la question de la pollution de l'air était vraiment très complexe (Figure 3). Cette complexité provient d'abord de la variété des émissions et des modes d'émissions (Sportisse, 2008). La distribution spatiale des polluants en situation urbaine est, par exemple, relativement homogène, contrairement à la distribution sur la côte dunkerquoise où les pollutions industrielles et urbaines se côtoient. Mais la région « bénéficie » également des apports des régions adjacentes et du transport à échelle continentale. Les points chauds urbains (Paris, Bruxelles, Londres) et industriels (Rotterdam, Anvers…) sont nombreux à l'échelle eurorégionale (dans un rayon de 300 kilomètres). La qualité de l'air est donc altérée par des sources de pollution assez importantes dans la région, à l'échelle eurorégionale, mais également d'apports encore plus lointains.




*Figure 3 : Description des mécanismes complexes de pollution de l'air, source : LPCA*

Grâce aux travaux menés sur les mécanismes de transport, à l'aide de campagnes de mesures et de modèles numériques, il est possible de caractériser les polluants (Badol et al., 2008, Alleman et al., 2010), leurs transformations (Marris et al., 2012) et de définir l'origine de la pollution et son évolution (Sokolov et al., 2013). Mais là aussi, la région, de topographie pourtant simple, s'est avérée paradoxalement très compliquée à appréhender, du fait du rôle majeur de la mer, à la fois sur la structure de l'atmosphère et son évolution. Enfin, les transformations des composés gazeux et des aérosols dépendent de la composition chimique des masses d'air, mais aussi de l'ensoleillement et de la nébulosité, ce qui ajoute un degré de complexité supplémentaire (Xiang et al., 2012).

A titre d'exemple, le phénomène de brise de mer, issu du chauffage différentiel entre la terre et la mer, se traduit par la mise en place d'une cellule de brise, favorisant le transport des polluants vers l'intérieur des terres sur une distance de plusieurs dizaines de kilomètres. C'est un phénomène météorologique majeur impactant la dispersion des émissions d'activités industrielles en bord de mer. Les observations à distance par télédétection (LIDAR[2]) permettent aujourd'hui de bien observer à la fois la météorologie d'un tel phénomène et l'évolution correspondante des polluants dans l'atmosphère (Boyouk et al., 2011). Grâce à ces études, les modèles sont maintenant très performants pour en donner une représentation spatiale et prévoir la pollution de demain (Talbot et al., 2007). Cet exemple illustre l'importance des phénomènes météorologiques de petite échelle pour la prévision de la pollution de l'air.

Cependant, la survenance d'une brise, comme de nombreux autres phénomènes météorologiques locaux (effet de pente, ilot de chaleur urbain, etc.) est corrélée à une situation générale anticyclonique, sans laquelle ce phénomène n'apparaît pas. Par conséquent, la prévision d'un phénomène de pollution nécessite de prendre en compte toutes les échelles météorologiques de l'anticyclone jusqu'à la turbulence. Spatialement, on considère une gamme allant d'échelles millimétriques jusqu'à une échelle continentale, et temporellement, d'une échelle allant de la seconde à quelques semaines (Figure 4). Nous sommes donc très loin d'une prévision à l'échelle de 30 ans quand on parle de pollution de l'air.

[2] Le LiDAR, acronyme de LIght Detection And Ranging est un instrument optique de télédétection permettant d'observer, dans le cas présent, les diverses couches atmosphériques et leur charge en aérosols.

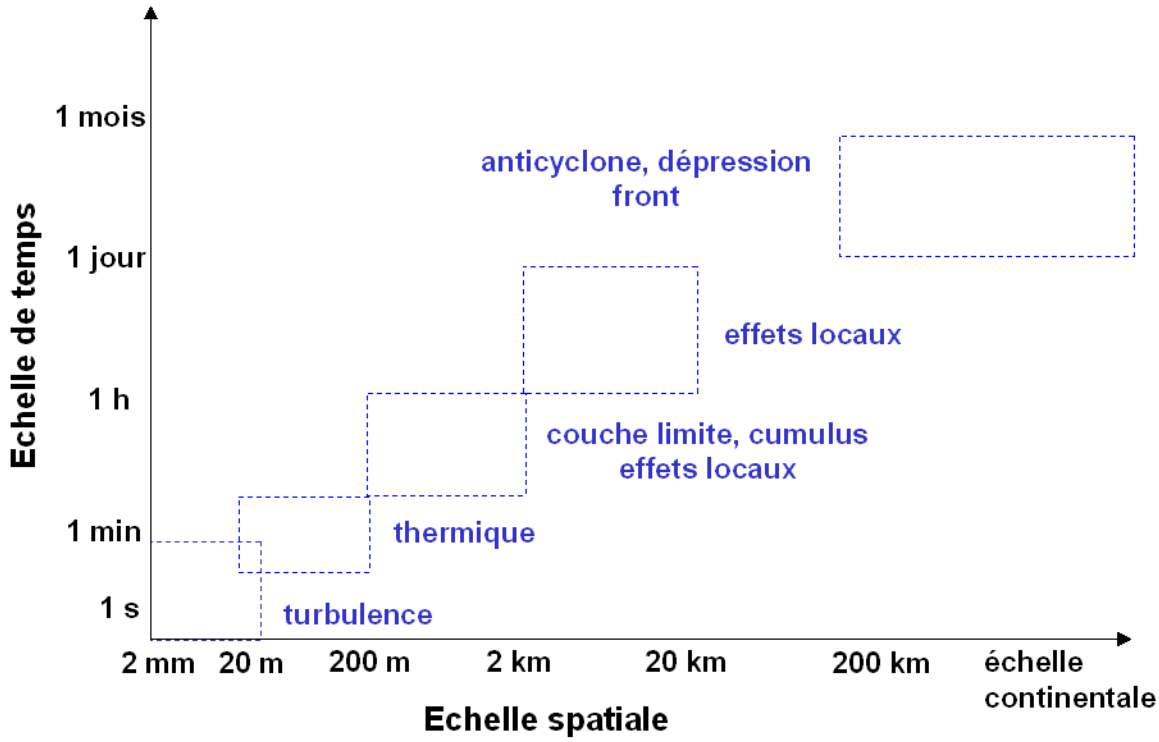



*Figure 4 : Echelle temporelle et échelle spatiale des phénomènes météorologiques, d'après (Stull,1988), source : LPCA*

### A l'échelle climatique

La Figure 5 montre l'évolution de la température entre deux périodes de 25 ans, de 1980 à 2004 et de 2050 à 2074. Il ne s'agit plus ici de travailler à l'échelle de la journée mais bien sur des périodes de 25 ans ! La résolution spatiale est typiquement de la centaine de kilomètres. Il existe plusieurs techniques (downscaling statistique et dynamique) qui permettent de descendre à de plus petites échelles jusqu'à une dizaine de kilomètres. Mais les modèles employés fournissent des prévisions moyennées temporellement et spatialement qui ne reposent pas sur des conditions initiales réelles aux petites échelles et les prévisions aux échelles climatiques elles-mêmes restent très imprécises, particulièrement sur un paramètre clé comme celui des précipitations (Figure 6).

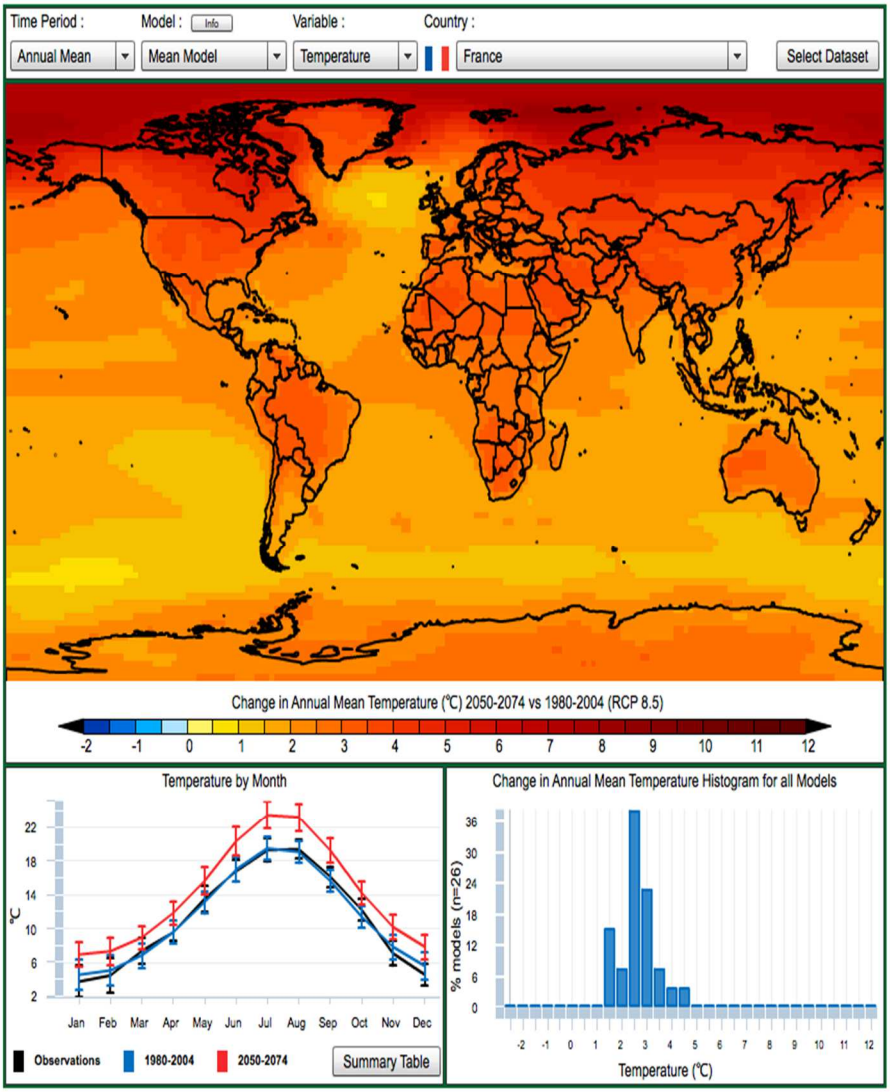



*Figure 5 : Evolution de la température entre deux périodes : de 1980 à 2004 et de 2050 à 2074. US geological survey [http://regclim.coas.oregonstate.edu](http://regclim.coas.oregonstate.edu)*

### Le passage de l'échelle météorologique à l'échelle climatique

Le passage de l'échelle météorologique à l'échelle climatique revient à faire le grand écart. D'un côté, les modèles climatiques donnent des évolutions moyennes de la température et des précipitations en lien avec l'évolution de la fréquence des événements. D'un autre côté, les modèles météorologiques font une prédiction déterministe à quelques jours ou quelques semaines, à partir de conditions initiales bien claires. Un nouveau challenge s'ouvre donc aux chercheurs : convertir cette tendance climatique en phénomènes météorologiques et en voir les conséquences sur la pollution de l'air.

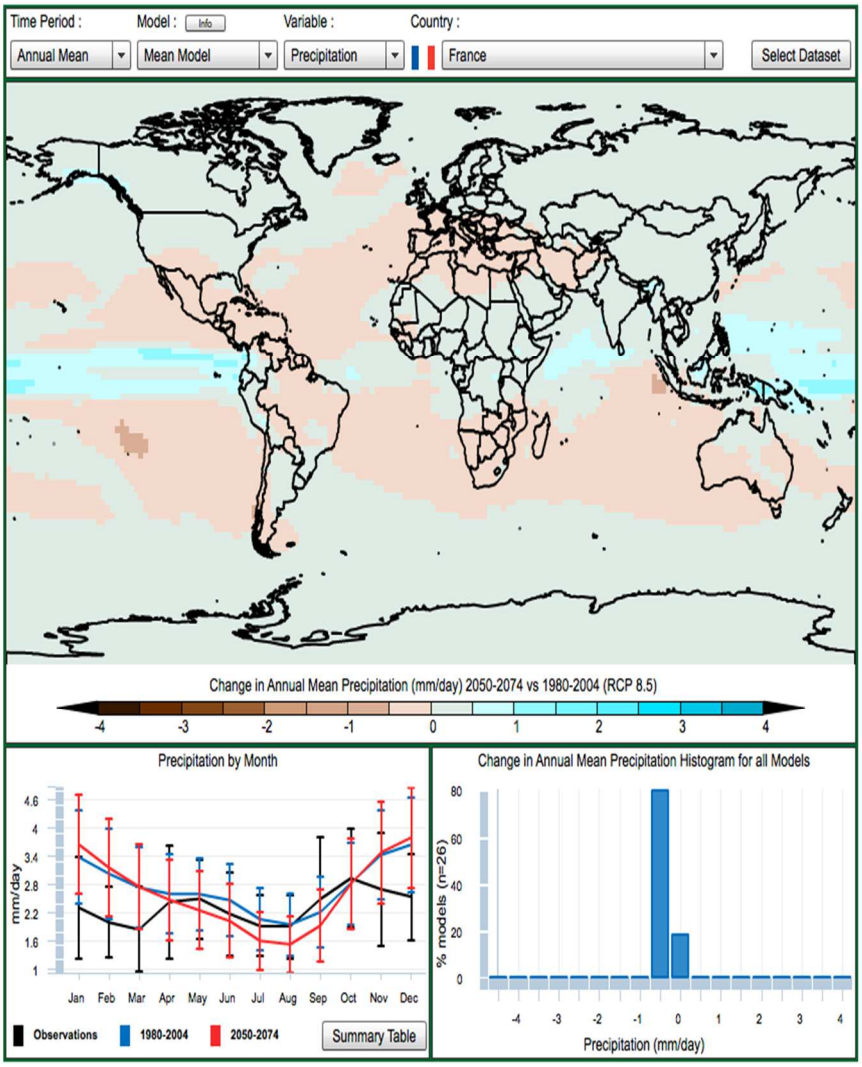



*Figure 6 : Evolution des précipitations entre deux périodes, de 1980 à 2004 et de 2050. US geological survey - [http://regclim.coas.oregonstate.edu](http://regclim.coas.oregonstate.edu)*

Pour conclure, des outils dans l'analyse des situations météorologiques et de l'impact sur la pollution sont d'ores et déjà disponibles en région. Notre expertise devrait permettre d'inférer les conséquences du changement climatique sur la qualité de l'air, mais n'oublions pas qu'il demeure des incertitudes majeures sur l'évolution du climat (plusieurs scénarios d'émissions anthropiques sont envisagés) et sur l'évolution des émissions des polluants.

## Références bibliographiques


Alleman, L., Lamaison, L., Perdrix, E., Robache, A., Galloo, J.-C., 2010. PM10 metal concentrations and source identification using positive matrix factorization and wind sectoring in a French industrial zone. *Journal of Aerosol Science*, 35(7), p.909-922.

Badol, C., Locoge, N., Galloo, J.-C., 2008. a. Using a source-receptor approach to characterise VOC behaviour in a French urban area influenced by industrial emissions: Part II: Source contribution assessment using the Chemical Mass Balance (CMB) model. *Science of The Total Environment*, 389, p. 429-440.

Boyouk, N., Léon, J.-F., Delbarre, H., Augustin, P., Fourmentin, M., 2011. Impact of sea-breeze on vertical structure of aerosol properties in Dunkerque, France. *Atmospheric Research* 101(4), p. 902-910.

Marris, H., Deboudt, K., Augustin, P., Flament, P., Blond, F., Fiani, E., Fourmentin, M., Delbarre, H., 2012. Fast changes in particle composition and size during the near-field transport of industrial plume. *Science of the Total Environment*, 427-428, p.126-138.

Sokolov, A., Augustin, P., Dmitriev, E., Delbarre, H., Talbot, C., Fourmentin, M., 2013. Simulation of local atmospheric dynamics in the coastal region of Dunkerque, *Russian Meteorology and Hydrology*, 38, 100-105.

Sportisse, B., 2008. Pollution atmosphérique des processus à la modélisation. *Springer Verlag.*

Stull, R. B., 1988. An introduction to boundary layer, *Kluwer Academic Publisher*

Talbot, C., Augustin, P., Leroy, C., Willart, V., Delbarre, H., Khomenko, G., 2007. Impact of a sea breeze on the boundary-layer dynamics and the atmospheric stratification in a coastal area of the North Sea, *Boundary-Layer Meteorology* 125, p.133-154.

Xiang, Y., Delbarre, H. , Sauvage, S., Léonardis, T., Fourmentin, M., Augustin, P., Locoge, N., 2012. Development of a methodology examining the behaviours of VOCs source apportionment with micro-meteorology analysis in an urban and industrial area. *Environmental Pollution* 162, p. 15-28

# Changement climatique : quelles conséquences sur la diffusion de la pollution atmosphérique en région en 2100 ?

Valérie FEVRE-NOLLET et Patrick LEBEGUE, Laboratoire de Physico-chimie des Processus de Combustion et de l'Atmosphère, UMR 8522 CNRS/ Université de Lille - Sciences et Technologies, Caroline NORRANT, Laboratoire Territoires, Villes, Environnement et Société, Université de Lille - Sciences et Technologies

L'objectif de cette communication est de présenter le potentiel des travaux de modélisation atmosphérique pour répondre aux questions de qualité de l'air dans le contexte du changement climatique. Cette étude nécessite que le climat de la région ainsi que l'impact des différents régimes de temps actuels sur la diffusion de la pollution soient bien connus. Il est alors possible d'examiner les modifications à attendre concernant l'évolution climatique.

## Analyse climatique et impact sur la qualité de l'air

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet pluridisciplinaire IRENI. Il a consisté dans un premier temps, à préciser l'influence du forçage qui résulte de l'augmentation de la concentration en gaz à effet de serre sur la variabilité de la circulation atmosphérique[1] dans la région. La variabilité spatiale et temporelle du climat de la région et les régimes de temps sont déterminés à l'aide d'une analyse statistique. Le domaine considéré a une taille largement supérieure à celle du Nord - Pas de Calais afin de prendre en compte l'échelle climatique[2] (Figure 1).

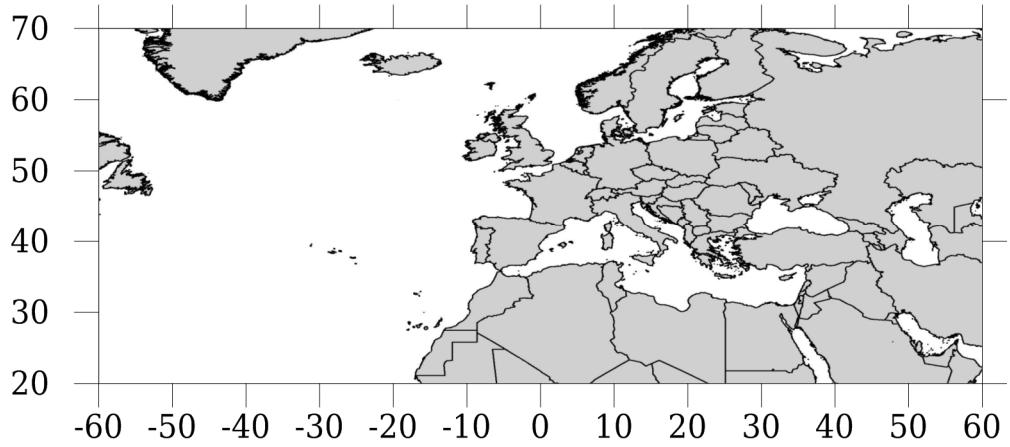



*Figure 1 : Domaine choisi pour l'analyse climatique. Source: Norrant C.*

[1] La circulation atmosphérique est la circulation de l'air dans l'atmosphère qui entraîne les variations des phénomènes météorologiques. Sa variabilité est sa modification d'un jour sur l'autre ou d'un mois sur l'autre, en fonction du pas de temps analysé.

[2] Dans le cadre de cette étude, l'échelle climatique (échelle spatiale sur laquelle les variations du climat sont étudiées) est plus grande que la région administrative concernée (plusieurs milliers de kilomètres).

Deux types d'analyses climatiques ont été effectués : l'une sur les mesures réelles de Météo France (mesures au sol de températures, pluviométrie, etc.), l'autre sur des réanalyses[3] de données de Météo France pour l'époque actuelle auxquelles ont été comparées des modélisations du GIEC pour le futur. Par la suite, l'impact des variabilités de la circulation climatique sur le transport des polluants et leur réactivité a été calculé à l'aide d'un modèle de chimie transport (WRF Chem).

### Analyse climatique des mesures Météo France 1950-2012

L'étude a concerné les mesures réelles de 15 stations françaises correspondant à un grand Nord de France (Figure 2). L'analyse statistique permet de calculer l'évolution temporelle, c'est-à-dire la fréquence et l'intensité des circulations atmosphériques.

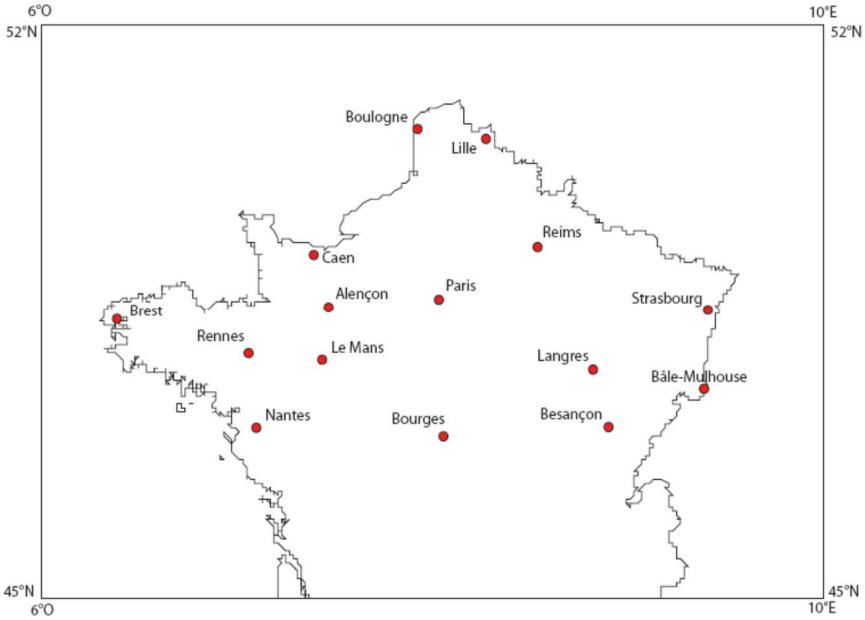



*Figure 2 : Localisation des 15 stations choisies pour l'étude. Source: Norrant C.*

Les études climatiques nécessitent au minimum 30 ans de données. Dans le cas présent, la période est de 63 ans : de 1950 à 2012. Les paramètres étudiés sont les précipitations ainsi que les températures minimales et maximales. Les pas de temps étudiés sont mensuels et saisonniers pour l'ensemble les paramètres.

Des Analyses en Composantes Principales avec Rotation (ACPR[4]) permettent de déterminer

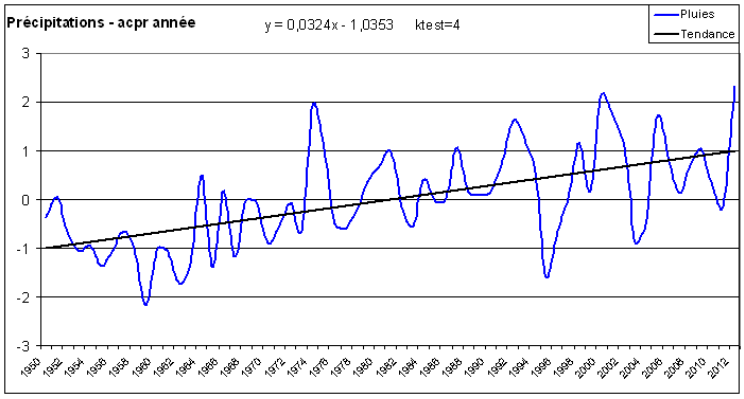
3 La réanalyse est une méthode utilisée pour obtenir un portrait exhaustif de l'état du système terrestre. Cette méthode consiste à combiner un modèle de prévision météorologique et des observations pour produire, généralement pour l'ensemble du globe, des archives d'un grand nombre de variables atmosphériques et océaniques sur des grilles à une résolution temporelle de quelques heures pour plusieurs décennies. (voir, par exemple http://www.ouranos.ca/fr/faq/fiche6Fr.php)

4 Dans une ACP , on essaie, par une méthode quantitative (analyse multivariée), d'expliquer la portion la plus grande de la variance totale par de nouvelles variables (créées de toute pièce par l'analyse) que l'on appelle "composantes", "facteurs" ou "axes factoriels"; ces variables dites "latentes" ne sont donc pas mesurées mais plutôt générées. Ces composantes ou facteurs regroupent, dans une certaine mesure, des éléments (variables) ou plutôt des variables corrélées dans le but d'expliquer un

des régions pour lesquelles les précipitations et les températures varient de manière homogène. Les évolutions sur la période d'étude (appelées tendances) des précipitations et températures sont ensuite calculées pour chacune de ces régions.

### Evolution de la pluviométrie entre 1950 et 2012

La tendance générale est celle d'une faible augmentation de la pluviosité.




L'analyse statistique de type ACPR permet de préciser la répartition régionale de cette tendance. Si l'on considère l'évolution des moyennes annuelles, quatre grandes régions apparaissent : une région Grand Ouest, une région Grand Est, le Nord de la France et le Bassin parisien. Les isocontours de la Figure 3 représentent la part de la variabilité locale qui est expliquée par celle de la région associée

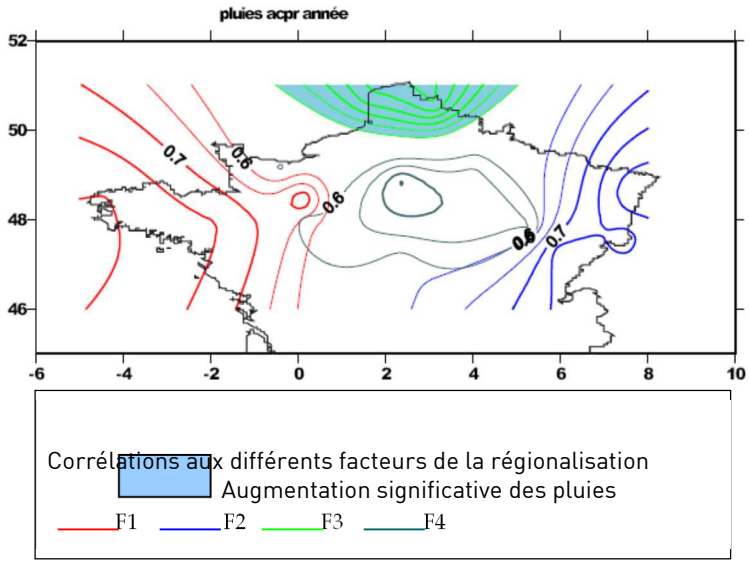



*Figure 3 : Tendance de la pluviométrie entre 1950 et 2012 sur l'ensemble des 15 stations de la Figure 2 (en haut) et régionalisation (en bas). Source: Norrant C*

phénomène par une quantité plus restreinte d'éléments. La variance est une mesure servant à caractériser la dispersion d'un échantillon ou d'une distribution. Elle indique de quelle manière la série statistique ou la variable aléatoire se disperse autour de sa moyenne.

Par exemple, dans la région de Cherbourg 60% de la variabilité interannuelle des pluies s'explique par celle de la Région Bretagne. Au total, il y a une faible augmentation des précipitations dans toutes les régions considérées mais elle n'est réellement significative statistiquement que dans la région Nord.

### Evolution de la température entre 1950 et 2012

Pour ce qui concerne les températures (Figure 4), la hausse est significative sur l'ensemble des régions depuis les années 1950. Elle est de 1,2 à 1,5 degré pour les températures minimales (à gauche) et de 0,6 à 2,5 pour les températures maximales (à droite).

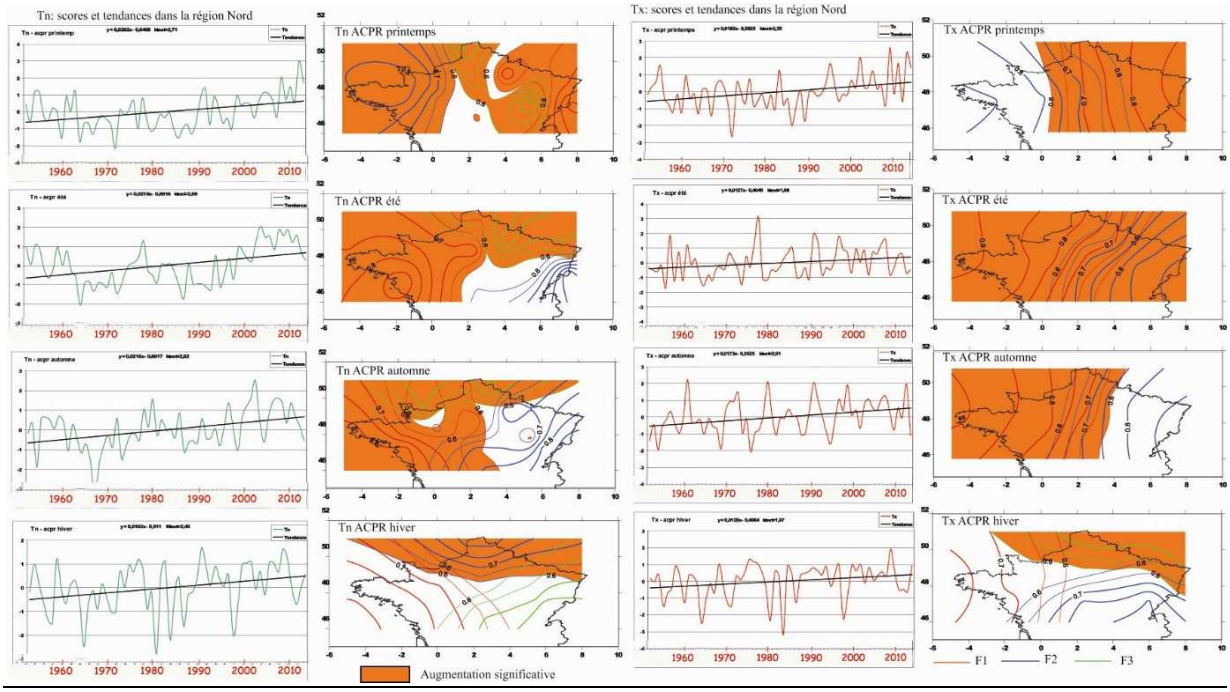



*Figure 4 : Evolution des températures régionales saisonnières et tendances des températures dans le Nord entre 1950 et 2012. Tn : températures minimales (à gauche) ; Tx : températures maximales (à droite). Source: Norrant C*

### Analyse climatique période actuelle 1960-1990, période future 2070- 2100

Cette première approche montre une évolution significative du climat dans la région ces dernières décennies. Cependant la diffusion des polluants dépend essentiellement de conditions météorologiques que la température et les précipitations ne suffisent pas à définir. Afin de préciser les différents régimes de temps météorologiques, les réanalyses effectuées par les grands centres météorologiques (ici le CNRM de Météo France pour la période 1960-1990) et les modélisations des scénarios d'émission du GIEC pour la période 2070-2100 ont été utilisées.

*Modes de variabilités de la circulation atmosphérique*

La variabilité de la circulation atmosphérique s'illustre à partir de schémas spatiaux récurrents. Ces schémas spatiaux sont de différents types : l'Oscillation Atlantique Nord (ONA ou NAO : North Atlantic Oscillation[5]) l'Est Atlantique (EA[6]) en sont les configurations les plus fréquentes. L'analyse statistique ACPR permet de préciser les modes de variabilité et d'isoler les configurations les plus intenses qui donnent lieu aux phénomènes d'inondations ou de canicule. Dans le cas présent, la variable étudiée est le géopotentiel 500 hPa, c'est à dire, l'altitude à laquelle la pression est de 500 hPa[7]. La figure 5 met en évidence des régions dont les géopotentiels varient de façon homogène ; on notera en particulier sur l'Atlantique la formation dipolaire classique associée à l'oscillation Nord Atlantique.

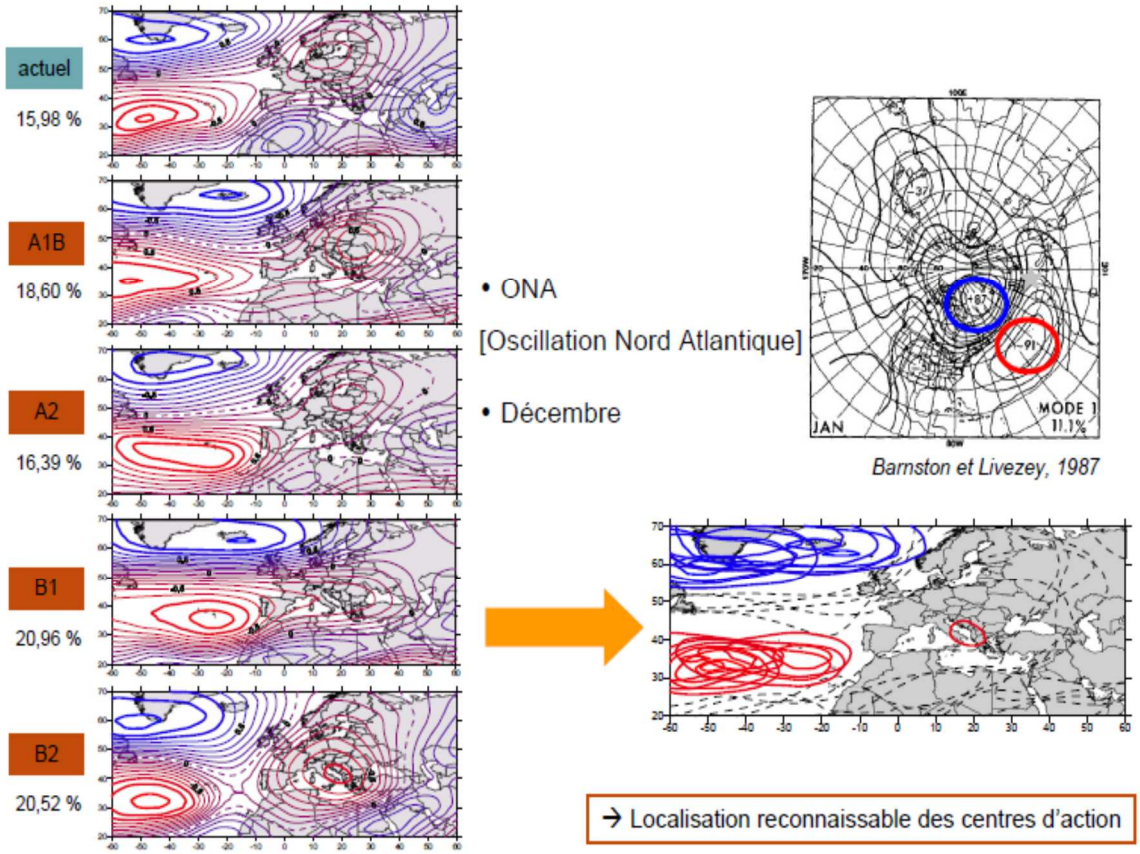



*Figure 5 : Analyse climatique réalisée à partir des scénarios du GIEC pour le mois de décembre. A gauche : les différentes régions au comportement homogène telles que précisées par l'ACPR en décembre au niveau du géopotentiel 500hPa, à droite : superposition du mode ONA des différents scénarios (en bas), Thèse Louise Declerck, et schéma de référence (en haut) d'après Barnston et Livezey, 1987)*

[5] voir http://www.ifremer.fr/lpo/thuck/nao/nao.html et la communication de Yves Fouquart dans ce même ouvrage

6 l'EA est le deuxième mode dominant la variabilité de l'Atlantique Nord. Voir: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/ea.shtml

7 Le géopotentiel est une mesure de la pression en altitude, le niveau 500hPa correspondant à l'altitude à laquelle la pression est à 500hPa. L'altitude moyenne du niveau 500hPa est de 5560mgp. La pression diminuant quand on monte en altitude, les altitudes inférieures à 5560mgp représentent des basses pressions, alors que celles supérieures à 5560mgp représentent des hautes pressions.

Ce dipôle subsiste quel que soit le scénario d'émissions étudié. Son importance semble même augmenter avec le réchauffement puisque la variance expliquée augmente pour les scénarios d'émissions les plus élevés et donc les réchauffements les plus forts. En revanche, dans certains cas, comme celui présenté sur la Figure 6, il peut y avoir des dissociations avec de nouveaux modes de variabilité qui apparaissent tel que le système Europe centrale-Groenland et un Centre Atlantique. Dans ce cas, les deux modes sont totalement indépendants et même si leur superposition est proche de la configuration ONA, leur influence sur le climat est différente. Si la modélisation permet de prédire ce type de comportement, il est cependant très difficile d'en connaître les répercussions au niveau météorologique.

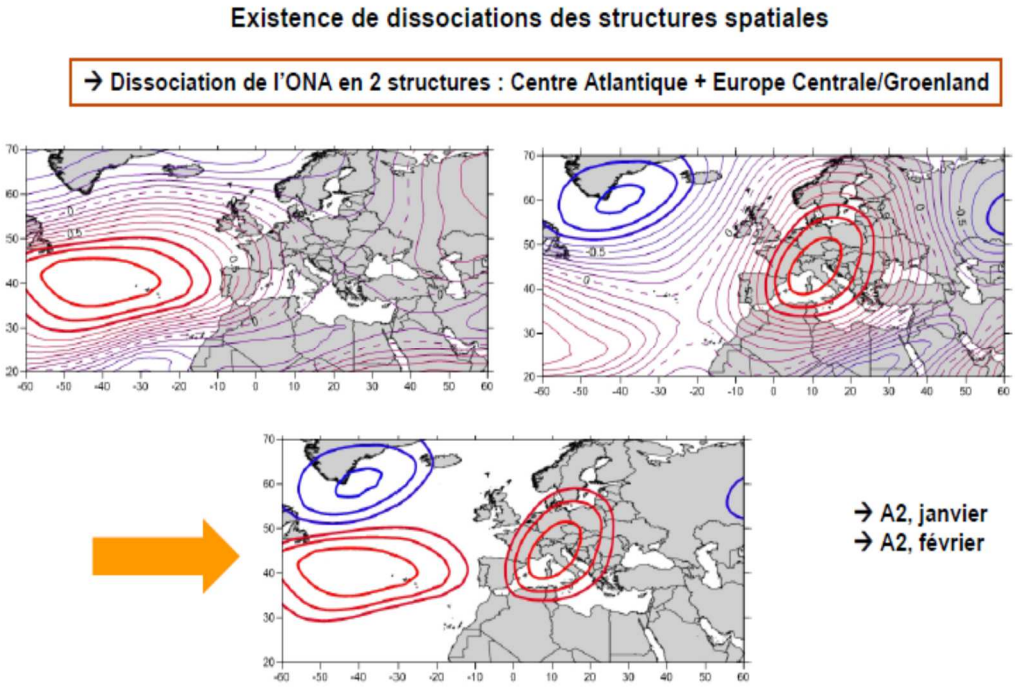



*Figure 6 : Dissociation obtenue avec le scénario A2 du GIEC pour des facteurs issus d'ACPR en janvier et février au niveau du géopotentiel 500hPa (en bleu les corrélations négatives au facteur, en rouge les corrélations positives, Thèse Louise Declerck).*

### Régimes de circulation

On distingue en Nord - Pas de Calais (Figure 7) quatre grands types de circulation : la circulation zonale, la méridienne de nord-ouest (toutes deux associées principalement à l'ONA, en phase positive pour la zonale-ONA+, phase négative pour la méridienne-ONA-[8]), la méridienne de sud-ouest et le marais barométrique (associées plutôt aux variations de l'EA, respectivement en phases négative-EA- et positive-EA+[9]).

[8] ONA+ (positif) correspond à une configuration où l'anticyclone des Açores est renforcé et la dépression d'Islande creusée. Au contraire, ONA- (négatif) correspond à un affaiblissement des deux individus barométriques, ralentissant la circulation atmosphérique sur l'Atlantique et l'Europe.

[9] EA est la configuration Est Atlantique composée d'un dipôle de pressions qui varient en opposition: un

Les deux premiers régimes sont associés à l'Oscillation Nord Atlantique dont il a été montré précédemment qu'elle restait une caractéristique marquante du climat de l'Europe de l'Ouest quel que soit le scénario d'émission. Les modèles climatiques prévoient, pour la fin du siècle, une augmentation de la circulation zonale (ONA +). Cela entraînera une influence de l'océan Atlantique beaucoup plus importante. La circulation méridienne de nord-ouest, par contre, diminue. Ce type de circulation amène généralement des émissions du Royaume-Uni.

Le marais barométrique est un cas de stagnation. Dans ces conditions, la région n'est confrontée qu'à ses circulations locales, par exemple un îlot de chaleur sur une ville ou une brise de mer. En cas de stagnation, on peut s'attendre à une augmentation de la pollution sur la ville puisqu'il n'y aura pas de vents pour pousser les polluants vers l'extérieur. La dernière configuration, la méridienne de sud-ouest, assez classique pour le Nord - Pas de Calais, augmente dans le futur. Cela représente une influence plus importante de la Bretagne à courte échelle et de l'Espagne à une échelle beaucoup plus longue et donc des apports de polluants qui proviendraient préférentiellement de ces zones.

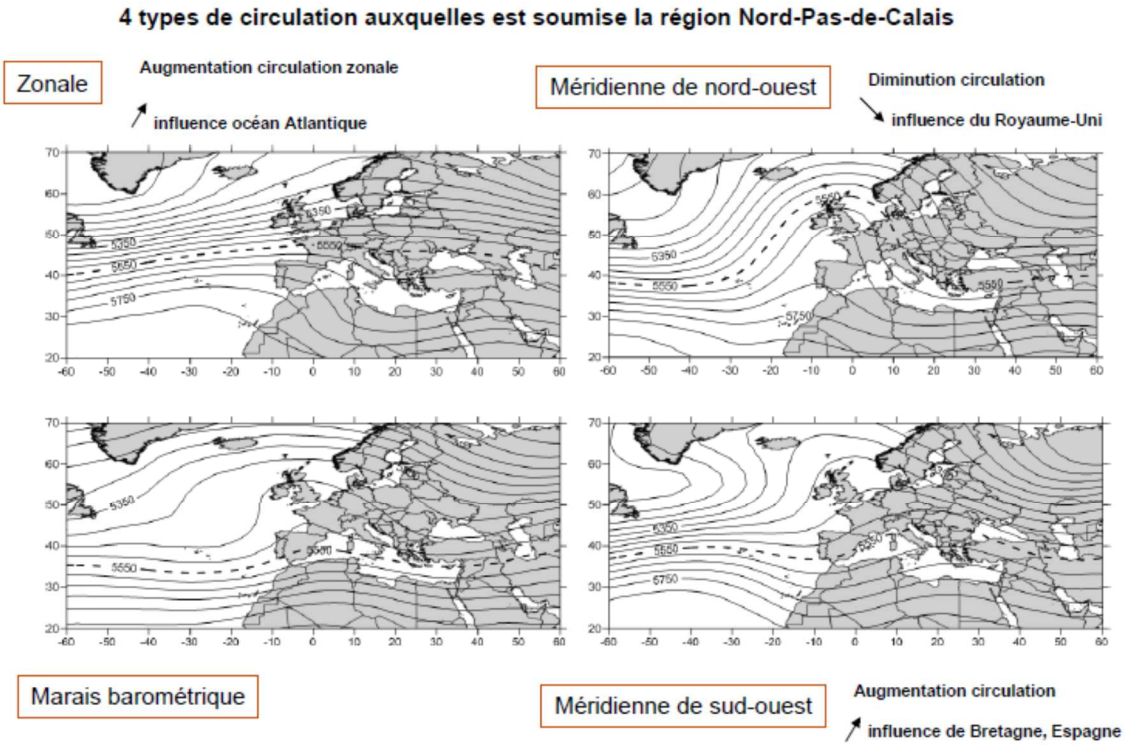



*Figure 7 : Principaux régimes de circulation de la région Nord-Pas de Calais en période hivernale. Isocontours : niveau du géopotentiel 500hPa. Source: Thèse Louise Declerck.*

pôle à l'est de l'Atlantique nord, le second à l'est de l'Atlantique subtropical. La phase positive (EA+) correspond à une baisse des pressions dans le pôle septentrional et une augmentation des pressions dans le pôle méridional, et l'inverse dans la phase négative (EA-).

### Modélisation de l'impact du changement climatique sur la qualité de l'air

Coupler des données climatiques à un modèle de qualité de l'air n'est pas chose facile. Les pas de temps et les échelles spatiales sont très différents. En ce qui concerne la qualité de l'air, on utilise une méthode de modèles emboîtés ("nesting", Figure 8) en traitant tout d'abord un domaine qui est à peu près équivalent au domaine climatique, ici une résolution est de 120 kilomètres, puis en affinant le calcul jusqu'au niveau régional. Pour le domaine régional, une résolution de 7,5 kilomètres est utilisée dans le cas de cette étude mais il est possible de descendre jusqu'à 1 km.

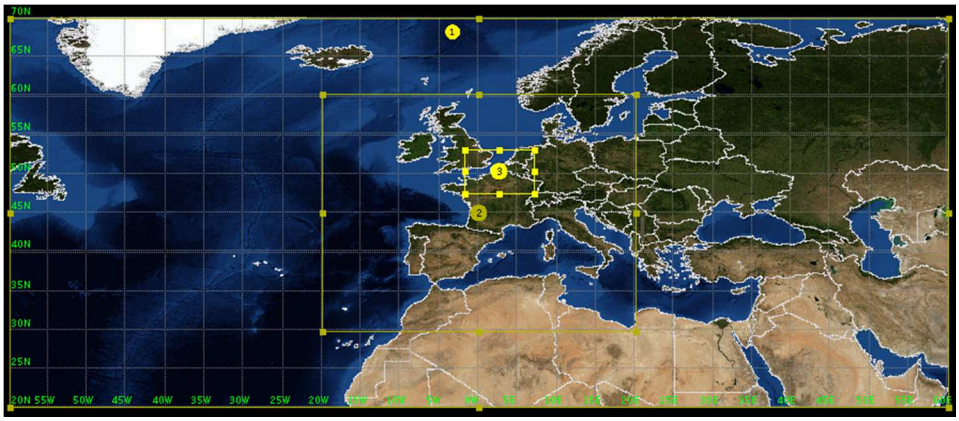



*Figure 8 : Domaines choisis pour la qualité de l'air Source: Thèse Louise Declerck.*

### La modélisation de la qualité de l'air : bases de données

Généralement, les modèles de qualité de l'air sont des modèles en trois dimensions. Le domaine étudié est représenté par une grille dans laquelle sont modélisés la chimie et le transport des polluants. Les bases de données principales sont d'une part les émissions de polluants, d'autre part la météorologie.

Concernant les émissions, les données régionales proviennent de l'AASQA[10] ATMO-NPdC. Elles sont à l'échelle communale et sont complétées avec les données européennes EMEP[11]. Ces données sont traitées à l'aide d'un système traitement de base de données développé au PC2A qui géolocalise les données puis les met en forme pour les utiliser dans le mécanisme chimique intégré au modèle.

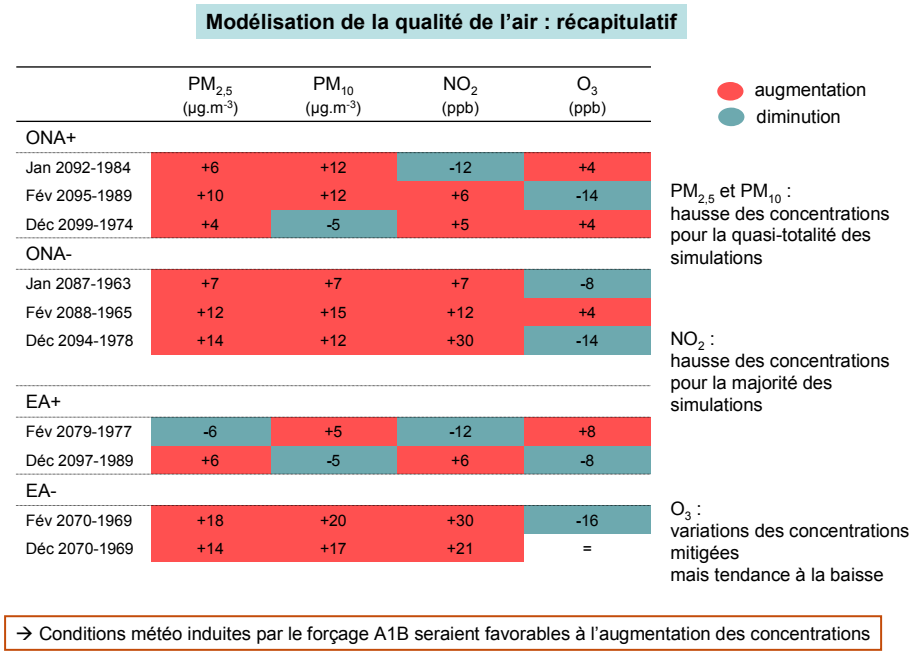
Du point de vue de la météorologie, il est nécessaire de passer de l'échelle climatologique à l'échelle météorologique. Pour cela, les données climatiques calculées avec de multiples variables sur différents niveaux sont incluses dans le modèle qui les transforme et les ramène à l'échelle appropriée. Ainsi pour l'étude de la période actuelle, des données de réanalyse NCEP (National Centers for Environmental Prediction) ont été exploitées. Dans le cas du climat futur, des données météorologiques du Centre National de Recherches Météorologiques ont été utilisées avec un pas de temps passé de 6 heures à une heure.

[10] Association Agréée de Surveillance de la Qualité de l'Air

[11] European Monitoring and Evaluation Programme, l'EMEP fournit une base de données d'émission à l'échelle européenne

### Les résultats

Les résultats pour le scénario A1B[12], qui apparaît comme une option assez vraisemblable et peut être plutôt optimiste sont présentés en Figure 9. La comparaison des concentrations d'azote ($NO_2$) et des particules en suspensions (PM) pour les phénomènes intenses entre les différentes périodes, montre une augmentation générale des concentrations de pollutions.




| | $PM_{2,5}$ ($\mu g.m^{-3}$) | $PM_{10}$ ($\mu g.m^{-3}$) | $NO_2$ (ppb) | $O_3$ (ppb) |
|---|---|---|---|---|
| ONA+ | | | | |
| Jan 2092-1984 | +6 | +12 | -12 | +4 |
| Fév 2095-1989 | +10 | +12 | +6 | -14 |
| Déc 2099-1974 | +4 | -5 | +5 | +4 |
| ONA- | | | | |
| Jan 2087-1963 | +7 | +7 | +7 | -8 |
| Fév 2088-1965 | +12 | +15 | +12 | +4 |
| Déc 2094-1978 | +14 | +12 | +30 | -14 |
| EA+ | | | | |
| Fév 2079-1977 | -6 | +5 | -12 | +8 |
| Déc 2097-1989 | +6 | -5 | +6 | -8 |
| EA- | | | | |
| Fév 2070-1969 | +18 | +20 | +30 | -16 |
| Déc 2070-1969 | +14 | +17 | +21 | = |

*Figure 9 : Modélisation des concentrations de polluants en fonction du scénario A1B (Thèse Louise Declerck)*

Lors des mois d'hiver, pendant lesquels la circulation atmosphérique est la plus dynamique, les concentrations en $PM_{2,5}$ et $PM_{10}$ augmentent entre la fin des 20ème et 21ème siècles pour les types de temps associés aux variations des configurations ONA et EA (Est Atlantique)[13]. Le mois de février représente une exception, pour les types de circulation associés à EA+ pour les $PM_{2,5}$ et le mois de décembre pour les types de circulation associés à ONA+ et EA+ concernant les $PM_{10}$, mais ces diminutions restent plus faibles que les augmentations modélisées dans les autres types de circulation. De même, dans le cas du $NO_2$, les augmentations dominent, sauf en janvier en ONA+ et février en EA+ où les concentrations diminuent, mais pas au point de compenser les hausses des autres mois. Enfin, les évolutions des concentrations d'ozone ($O_3$) sont variables selon les mois et les types de circulation associés aux configurations, allant plutôt dans le sens d'une diminution générale. Cependant, l'analyse de l'évolution des concentrations d'ozone est plus pertinente lors des mois d'été (pendant lesquels sa formation est la plus importante) et l'analyse doit être réalisée.

[12] Le scénario A1B est un ancien scénario du GIEC, qui se base sur une évolution technologique où les sources d'énergie fossiles et non fossiles seraient combinées. Il est proche du nouveau scénario RCP6.

[13] Lorsque l'EA est en phase positive, le géopotentiel 500hPa sur l'Atlantique Nord est renforcé.

En conclusion, cette étude montre que les niveaux de pollution de l'air dans la région sont dépendants des conditions météorologiques locales. C'est donc, notamment au travers de l'évolution possible de ces conditions météorologiques que le réchauffement peut impacter la qualité de l'air. Cependant, d'autres effets, tels que les modifications des émissions biogéniques ou des processus chimiques prenant place dans l'atmosphère peuvent également jouer un rôle non négligeable et cela doit être pris en compte dans les modèles.

Ces modifications sont en lien avec les variations des conditions météorologiques. L'analyse climatique des mesures des stations météorologiques de la région met en évidence une augmentation des températures au cours de la seconde moitié du 20ème siècle jusqu'à 2012, avec des valeurs qui correspondent aux résultats de l'évaluation du GIEC. On constate aussi une faible augmentation des précipitations en Nord - Pas de Calais.

L'étude des projections climatiques pour la région permet également d'affirmer qu'à la fin du 21ème siècle les configurations atmosphériques actuelles et les régimes de circulation associés seront toujours présents. En revanche, il pourrait y avoir apparition de dissociations de certaines de ces configurations atmosphériques.

Cependant, la fréquence de certains types de circulation atmosphérique sera modifiée, le régime de circulation zonale par exemple, sera, à priori plus fréquent. La région verrait donc une augmentation des temps humides et doux en hiver, puisqu'une augmentation de la fréquence et/ou de l'intensité de la circulation zonale implique que les masses d'air en provenance de l'océan atlantique seront plus fréquentes. On peut aussi s'attendre à des stagnations des masses d'air impliquant de l'air en provenance du sud-ouest. Ces modifications de la circulation atmosphérique auront évidemment des effets sur les concentrations des polluants, tout particulièrement sur les particules en suspension dont les concentrations risquent d'augmenter lors des mois d'hiver.

## Références bibliographiques


Barnston, A.G., Livezey, R.E. 1987. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns*. Monthly Weather Review*, 115, p. 1083–1126.

Louise Declerck, 2012. *Influence de forçages anthropiques sur la circulation atmosphérique du niveau géopotentiel 500 hPa et sur la diffusion et les concentrations de polluants sur la région Nord-Pas-de-Calais au XXIème siècle* ; thèse de doctorat, Université Lille 1 Sciences et Technologies.



Photo RNSA, Réseau National de Surveillance Aérobiologique



Damien Cuny est Professeur à l'Université Lille 2 et coordonne le groupe de Biosurveillance Environnementale au sein de l'équipe EA 4483 IMPECS : Impacts de la Pollution Chimique sur la Santé Humaine. Il travaille principalement sur les effets de la pollution atmosphérique (intérieure et extérieure) sur l'environnement et la santé. Il est également administrateur de l'Association pour la Prévention de la Pollution Atmosphérique et d'ATMO Nord-Pas de Calais.

# Impacts du changement climatique sur la santé

Partie coordonnée par Damien Cuny
Groupe Biosurveillance Environnementale
Impacts de l'Environnement Chimique sur la Santé Humaine, E.A. 4483,
Université de Lille

Cette partie propose d'illustrer les répercussions du changement climatique sur la santé humaine en ouvrant le regard au–delà des seules frontières régionales. Sont ainsi abordées les conséquences sanitaires des modifications de la répartition de certaines espèces, de leur cycle de vie, comme par exemple les périodes de pollinisation ; celles des phénomènes climatiques aigus, tels que les vagues de chaleur ; celles de la pollution atmosphérique, que ce soit à l'occasion de "pics de pollution" ou avec une pollution de fond. De manière plus prospective, cette session s'interrogera sur les enjeux sanitaires de demain liés aux modifications des milieux par le changement climatique, de la répartition des agents pathogènes et donc sur l'émergence de pathologies.

Cette partie présente les interventions suivantes :

- Changement climatique et risques allergo polliniques
  *Michel Thibaudon, Réseau National de Surveillance Aérobiologique, et Laëtitia Davranche Association pour la Prévention de la Pollution Atmosphérique*
  Conférence CERCLE du 3 avril 2015

- Impacts des épisodes de températures extrêmes
  *Luc Dauchet, Facteurs de risques et déterminants moléculaires des maladies liées au vieillissement UR 1167 INSERM*
  Conférence CERCLE du 3 avril 2015

- Impacts du changement climatique sur la santé via la pollution atmosphérique
  *Lydia Nikasinovic, Impacts de l'Environnement Chimique sur la Santé Humaine, EA 4483, Université de Lille Droit et Santé*
  Conférence CERCLE du 3 avril 2015

- Risques sanitaires émergents
  *Régis Matran, Impacts de l'Environnement Chimique sur la Santé Humaine, EA 4483, Université de Lille Droit et Santé*
  Conférence CERCLE du 3 avril 2015

# Changement climatique et risques allergo-polliniques

Laëtitia DAVRANCHE Association pour la Prévention de la Pollution Atmosphérique

Michel THIBAUDON, Réseau National de Surveillance Aérobiologique

## Les pollinoses : aspects épidémiologiques

Les études épidémiologiques ont montré que nous étions en phase d'augmentation des allergies. Les allergies respiratoires ont doublé en une vingtaine d'années dans les pays industrialisés. Les allergies aux pollens (ou pollinoses) ont, quant à elles, triplé en France depuis 25 ans. Ainsi, plus de 10 % de la population française est allergique aux pollens. La prévalence est plus élevée chez les jeunes adultes (avec plus de 30 % chez les adultes par rapport aux enfants, ainsi que les personnes âgées) ; elle est également différente d'une région à l'autre.

Quand les pollens sont inhalés par une personne allergique, celle-ci va manifester des symptômes aux niveaux des appareils respiratoire et oculaire. Au niveau clinique, cela va donc se traduire essentiellement par une rhinite, de la conjonctivite, des démangeaisons, des quintes d'éternuement et de toux, voire dans certains cas aggraver les symptômes de l'asthme. D'autres effets secondaires comme la fatigue, par exemple, sont également liés à la pollinose. Pour pouvoir remédier à chacun de ces symptômes, des traitements antihistaminiques sont proposés aux personnes allergiques et pour pouvoir être les plus efficaces possible, il faut qu'ils soient anticipés avant l'arrivée massive des pollens dans l'atmosphère. En outre, des conseils de prévention (tels que rouler les fenêtres fermées, ne pas faire sécher son linge à l'extérieur ou ne pas sortir avec les cheveux mouillés) peuvent améliorer le quotidien de ces personnes allergiques.

La Figure 1 présente les 3 périodes de la saison pollinique. Elle débute, de janvier à mai, par la saison des arbres notamment avec le pollen de bouleau, le plus problématique en région Nord - Pas de Calais, suivi, de mai à juillet, par la saison des graminées présentant également un potentiel allergisant fort, pour finir de juillet à octobre avec la saison des herbacées.

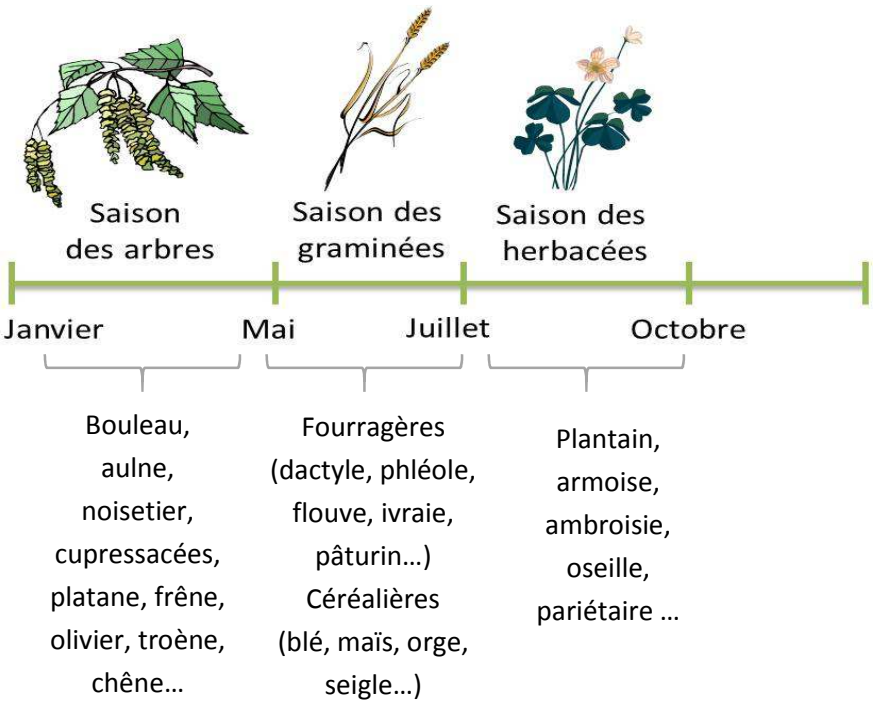



*Figure 1 : La saison pollinique et ses trois principales périodes (Source A.P.P.A.- RNSA).*

Les facteurs de risques amenant la rhinite allergique sont présentés sur la Figure 2. Tout d'abord, une personne peut être prédisposée génétiquement à être allergique ou peut le devenir en étant exposée de façon intense et prolongée aux allergènes, ici les pollens.

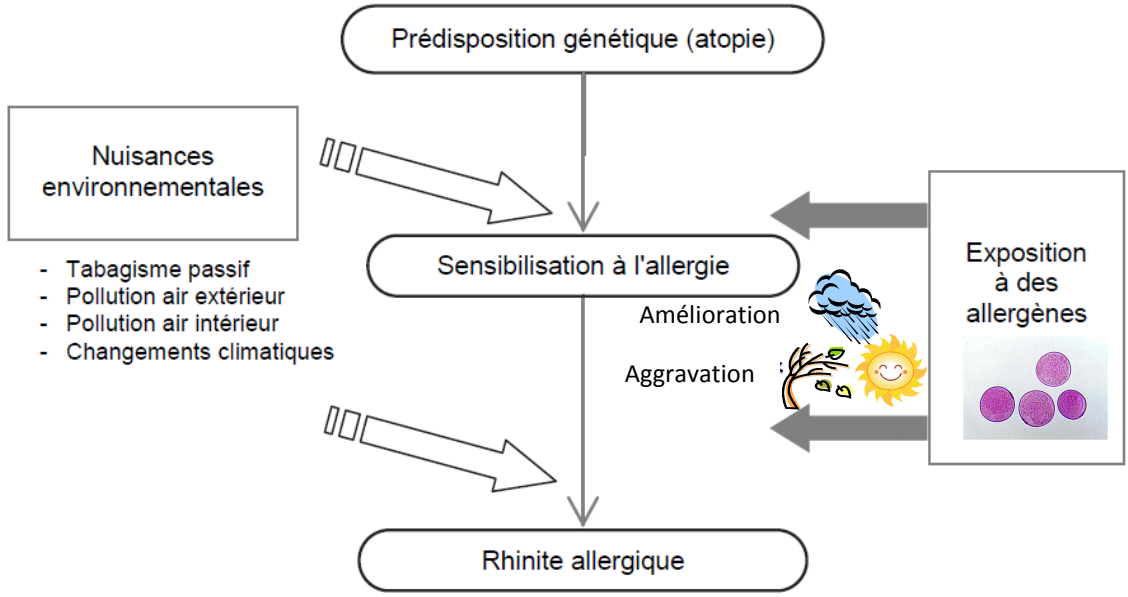



*Figure 2 : Les facteurs de risque vis-à-vis de la rhinite allergique (source : Institut National de Santé Publique du Québec, 2013).*

Les symptômes allergiques sont réduits quand les conditions météorologiques sont pluvieuses par diminution des pollens dans l'air (dépôt humide) et sont aggravés par vent fort et temps sec. À cela s'ajoutent des nuisances environnementales comme la pollution atmosphérique ou les changements climatiques avec des effets synergiques. Elles ont une influence directe sur les différents symptômes allergiques.

Tout ceci constitue une réelle préoccupation de santé publique qui nécessite une surveillance de cette "pollution verte", en référence à son origine végétale. C'est pour cela que le Réseau National de Surveillance Aérobiologique (RNSA) a été créé en 1996. Il permet l'étude du contenu de l'air en pollens et en moisissures et de croiser ces données avec des données cliniques, par exemple. En région Nord - Pas de Calais, l'Association Pour la Protection Atmosphérique (APPA) a intégré le RNSA depuis 2005.

### La surveillance des pollens

Trois méthodes de surveillance des pollens sont utilisées dans la région et apportent des données complémentaires (Figure 3) : le capteur volumétrique de pollen, le pollinier sentinelle intitulé « le Jardin des Pollens® » et un observatoire de sciences participatives intitulé « Vigie-Pollens ». Ces trois techniques permettent d'alimenter la campagne de prévention des allergies aux pollens en région Nord - Pas de Calais.



Capteur pollinique



Le pollinier sentinelle :
Le Jardin des Pollens®



Vigie-Pollens

Campagne de prévention des allergies aux pollens

*Figure 3 : Techniques de surveillance des pollens en Nord - Pas de Calais : des apports complémentaires (Sources : A.P.P.A. et RNSA).*

Le capteur de pollens est situé sur le toit de l'hôpital Calmette du Centre hospitalier régional universitaire (CHRU) de Lille. Il fait partie des 80 capteurs gérés par le RNSA dans les plus grandes villes françaises. Leur implantation est définie selon trois critères : la densité de population, l'implantation des espèces végétales et le climat. Une analyse microscopique du support exposé au niveau du capteur est réalisée pour déterminer la quantité et le type de

pollen qui s'y est fixé. Cela permet de déterminer l'indice allergo-pollinique défini sur une échelle de 0 à 5 : 0 correspond à un risque allergique nul et 5 à un risque très élevé. Le capteur fournit des données correspondant au flux de fond pollinique. Pour la personne allergique, ces données permettront d'adapter son traitement au cours de la période pollinique.

La deuxième méthodologie, le Jardin des Pollens, est un pollinier sentinelle. C'est un espace d'observation privilégié des plantes et des arbres allergisants typiques de la région (Figure 4).



*Figure 4 : Le Jardin des Pollens® à la Ferme du Héron - Villeneuve d'Ascq.*
*La photo de droite montre l'observation des pollens (Source A.P.P.A).*

Ce pollinier a un double intérêt, scientifique et pédagogique. En effet, il permet à partir de données d'observation de la végétation, de détecter la première et la dernière émission de ces pollens allergisants. Les relevés se font de façon journalière entre février et octobre. Le pollinier a également un intérêt pédagogique puisque, sur un parcours court, ces différentes espèces allergisantes permettent d'être reconnues par les personnes allergiques. Plus d'une trentaine d'espèces y sont implantées (19 herbacées, dont 12 graminées et 16 arbres). L'intérêt de ce pollinier est qu'il vient compléter les données du capteur et permet, pour certaines espèces, de signaler précocement l'arrivée des pollens, ce qui permettra à la personne allergique de pouvoir anticiper ses traitements pour plus d'efficacité.

La dernière méthode est un observatoire citoyen des pollens allergisants intitulé « Vigie-Pollens ». Il est en phase de mise en œuvre cette année pour pouvoir être opérationnel dès 2016. Sur la base de sciences participatives, le but est d'organiser un réseau d'éco-volontaires pour pouvoir faire le suivi de l'émission des pollens d'arbres allergisants en multipliant les lieux d'observation en région puisque, même au niveau régional, nous sommes soumis à une influence climatique sur le développement de la végétation (îlots de chaleur urbains, climat littoral) jouant sur les dates d'émission des pollens. Ce projet est tout à fait novateur puisque à partir de données environnementales, l'objectif est de pouvoir agir sur les impacts sur la santé. En parallèle, il permettra également d'informer le public sur la reconnaissance des différentes espèces allergisantes, le risque allergique et les moyens de prévention. L'idée est de pouvoir alerter le plus précocement possible sur la présence des pollens et, pourquoi pas, de pouvoir amener un changement de comportement.

Toutes ces données sont compilées dans des bulletins allergo-polliniques diffusés au niveau national mais également en Nord - Pas de Calais (le bulletin est intitulé *La Météo pollinique* - Figure 5). Il existe également des cartes de vigilance émises en cas de risque. Ces vecteurs de communication concernent directement la santé des populations. De plus des données ou des sites Internet, comme celui de végétation-en-ville (www.vegetation-en-ville.org), permettent d'agir directement au niveau de la source. En effet, l'objectif de ce site est de conseiller sur le type de végétaux que l'on peut utiliser le plus idéalement possible pour ne pas avoir d'espèces allergisantes à proximité de chez soi.




*Figure. 5 : Les vecteurs d'information : les bulletins aéropolliniques de l'APPA (pour la Région Nord - Pas de Calais) à gauche, et du RNSA (pour la France) au centre. A droite, une carte de vigilance pollens éditée par le RNSA (Source A.P.P.A - RNSA).*

### Les impacts du changement climatique sur les pollens

L'observation des variations des températures montre, qu'au cours des 3 dernières décennies, les années avec des écarts de températures positifs par rapport à la moyenne sont de plus en plus fréquentes et qu'à chaque décennie, les records de températures augmentent (Figure 6).

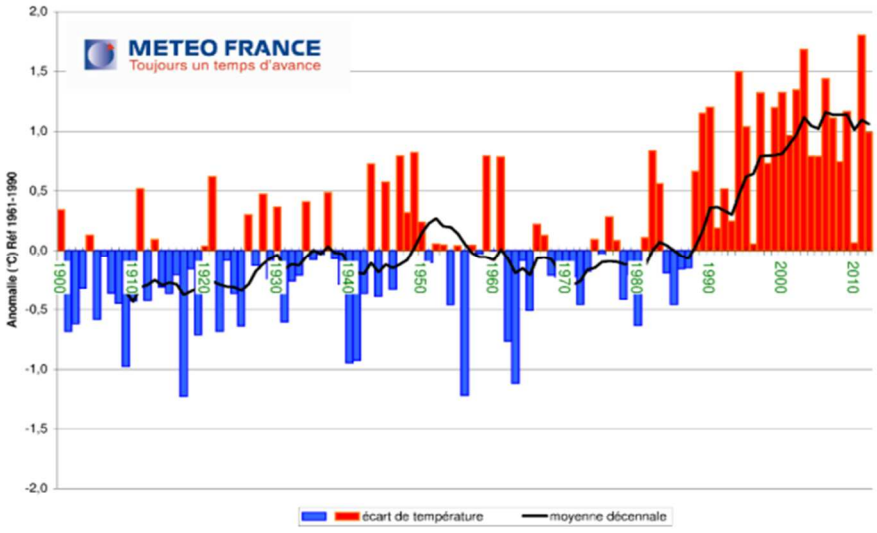



*Figure 6 : Evolution de la température moyenne en France métropolitaine de 1900 à 2014 (source : Météo France).*

La Figure 7 présente l'évolution des températures en France. La carte de droite montre quelle serait l'évolution probable des températures au XXI$^{ème}$ siècle en considérant le scénario A2 du GIEC. Tout un quart sud-est de la France présenterait + 4 degrés, ce qui influerait sur la végétation.

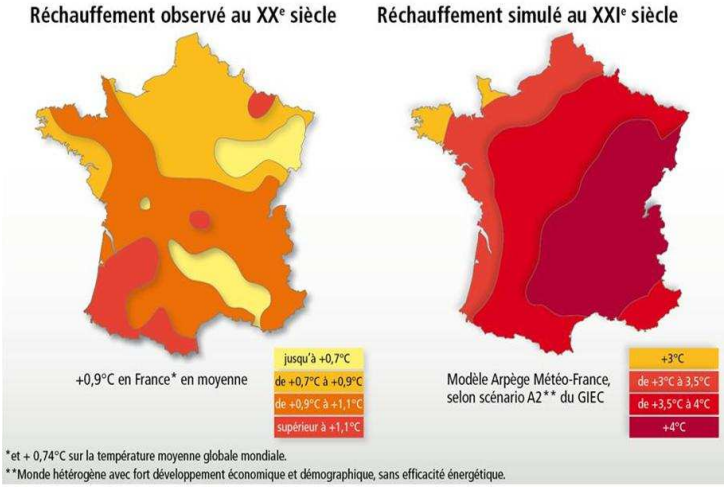



*Figure 7 : Effet simulé du réchauffement climatique en France (Source : Météo France).*

Au niveau des plantes, et surtout des espèces anémophiles (celles qui dispersent leurs pollens par le vent), le démarrage de la pollinisation et le débourrement pour les feuilles sont liés à deux phénomènes qui se succèdent et se complètent : le *chilling* (exposition à des températures froides) puis le *forcing*, (exposition à des températures chaudes). Or, il est clair que plus les températures hivernales seront douces, plus le nombre de jours pour atteindre ce *chilling* risque d'augmenter. Depuis 2003 environ, se produit un décalage vers le mois de février de la période froide qui initialement se produisait en novembre-décembre. Nous observons une modification des périodes de végétation et de pollinisation avec, depuis 2003, une phase d'inversion de la précocité, illustrée par la Figure 8 qui présente la période d'apparition des premières feuilles des marronniers de Genève.

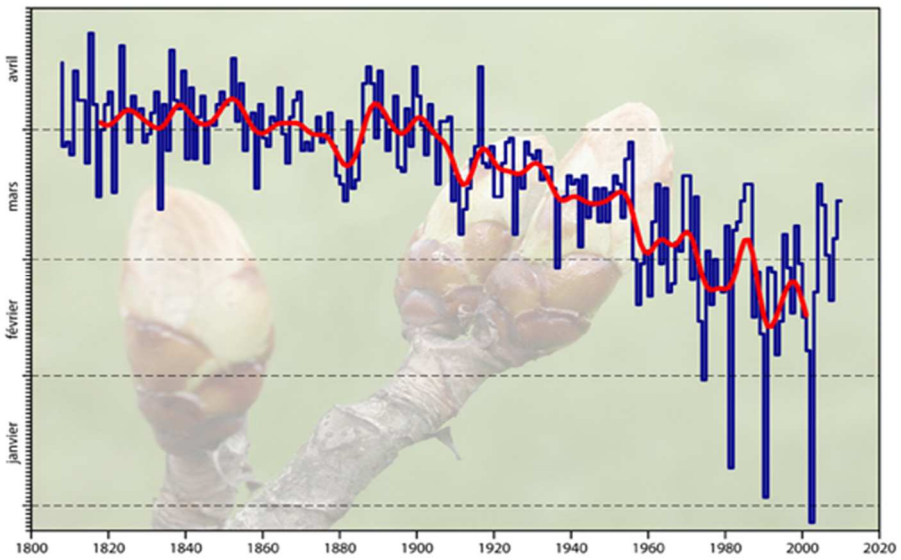



*Figure. 8 : Dates d'apparition de la première feuille du marronnier de Genève depuis 1808 (Source : Météo Suisse).*

Nous observons sur cette courbe une évolution de la date d'apparition de la première feuille allant de fin mars - début avril en 1808 pour arriver en 2002 fin décembre. Depuis 2003, nous observons une remontée qui s'explique par ce phénomène du décalage vers le mois de février-mars des périodes de froid. Ce phénomène s'observe également pour la pollinisation du bouleau à Strasbourg. Il y avait une tendance à une précocité de la pollinisation jusque 2003 - 2004 et ensuite, malgré des variations interannuelles, une perte de cette précocité.

Les modifications des températures auraient également des conséquences sur la répartition des espèces végétales. Ainsi, d'après des travaux de l'INRA, la hausse de 1 degré de la température moyenne annuelle équivaudrait à une translation des espèces végétales de 200 km vers le nord ou une remontée d'environ 150 m d'altitude. La Figure 9 illustre ce phénomène pour le chêne vert qui pourrait dépasser dès 2050 la ligne de Bordeaux Saint-Étienne et franchir la Loire avant 2100. De la même manière, le hêtre pourrait disparaître de nos forêts à cause, entre autre, de la sécheresse. Enfin, en théorie, avec un réchauffement de 3,5 degrés d'ici à 2050, l'olivier pourrait remonter jusqu'aux portes du Luxembourg.

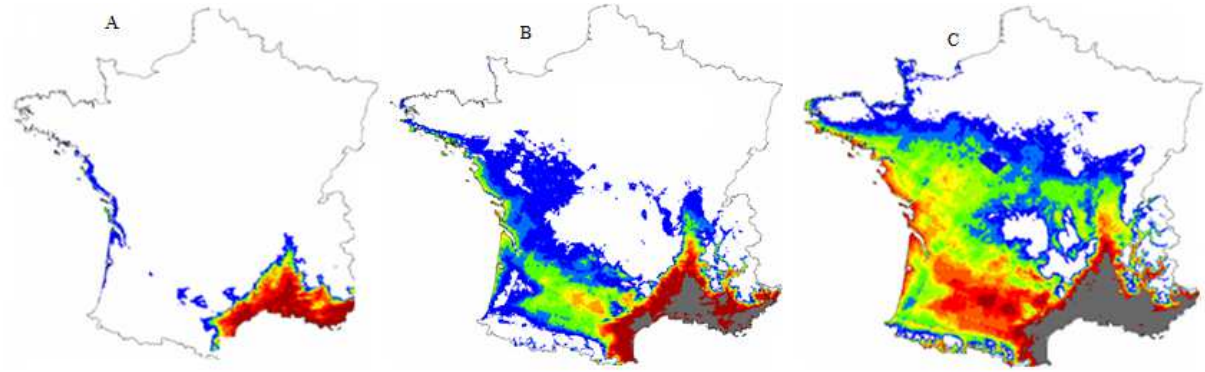



*Figure 9 : Répartition du chêne vert (Quercu ilex) en France, A : en 2000 ; B : en 2050 et C : en 2100, en fonction du réchauffement climatique, selon le scénario le plus pessimiste du GIEC (Source : INRA de Nancy).*

Ces différentes modélisations restent théoriques et ne tiennent pas compte d'un phénomène essentiel, la photopériode, cette alternance jour-nuit, durée du jour et durée de la nuit. Les espèces végétales ont une inertie beaucoup plus grande que les changements de température. Au lieu de le faire en quelques années, elles le feront en quelques décennies. Cela signifie que la modification des conditions climatiques va pouvoir influer sur la répartition des espèces mais en tenant compte d'une inertie extrêmement importante liée à la photopériode.

Concernant la problématique des pollens, nous avons évoqué précédemment le bouleau mais d'autres plantes telles que les graminées, l'ambroisie sont aussi concernées. L'augmentation, que ce soit de la température ou de la concentration en $CO_2$ atmosphérique, provoque une modification de la durée de la saison pollinique, une modification de l'allergénicité du pollen (qui peut être augmentée ou diminuée), des quantités de pollen, etc. Finalement, ces modifications aboutissent à une **augmentation de l'exposition aux allergènes** et de ce fait à une sensibilisation plus grande de la population. Plus nous sommes exposés, plus le nombre de personnes sensibilisées sera important tout comme la probabilité qu'elles deviennent un jour allergique. De plus, si certaines espèces progressent vers le nord, elles provoqueront l'apparition de nouvelles allergies. Ces différents effets sont résumés Figure 10.

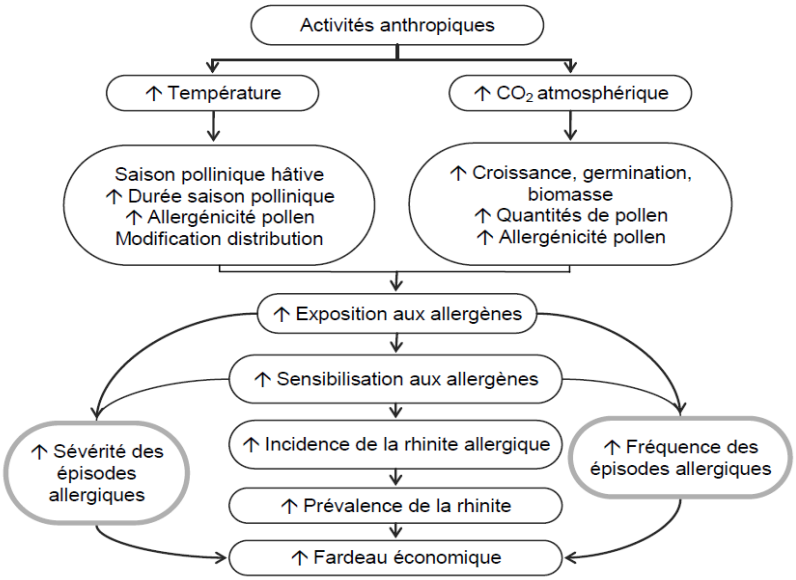



*Figure 10 : Impacts du changement climatique sur les allergies aux pollens (Source : Institut National de Santé Publique du Québec, 2013).*

C'est pourquoi, il y a quatre ans, l'ONERC (Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique), via le MEDDE (Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie), a commandité le RNSA pour réaliser une étude visant à établir un indicateur santé sur le changement climatique. Dans ce travail, le bouleau a été choisi car c'est un des arbres les plus représentatifs du risque allergisant sur une grande surface de la France. Cinq villes avec une présence importante du bouleau ont été choisies (Amiens, Paris, Strasbourg, Lyon et Montluçon) ainsi que Toulouse comme ville témoin. Enfin, la période choisie allait du 1er juillet au 30 juin afin de respecter la phénologie des bouleaux.

La Figure 11 présente les résultats moyennés sur les 6 villes. Nous observons une évolution moyenne quasi parallèle de la quantité de pollens produite et de l'évolution des températures.

Enfin, la Figure 12 présente les résultats obtenus pour la ville d'Amiens, la plus proche des villes incluses dans l'étude, de la région Nord-Pas de Calais.

Pour en savoir plus, un certain nombre d'actions sont entreprises en partenariat avec l'APPA et le RNSA sur le domaine de la pollinisation dans de but principal de la prévention de l'asthme et des maladies respiratoires. Ces actions passent obligatoirement par de l'information.

www.appanpc.fr et www.pollens.fr

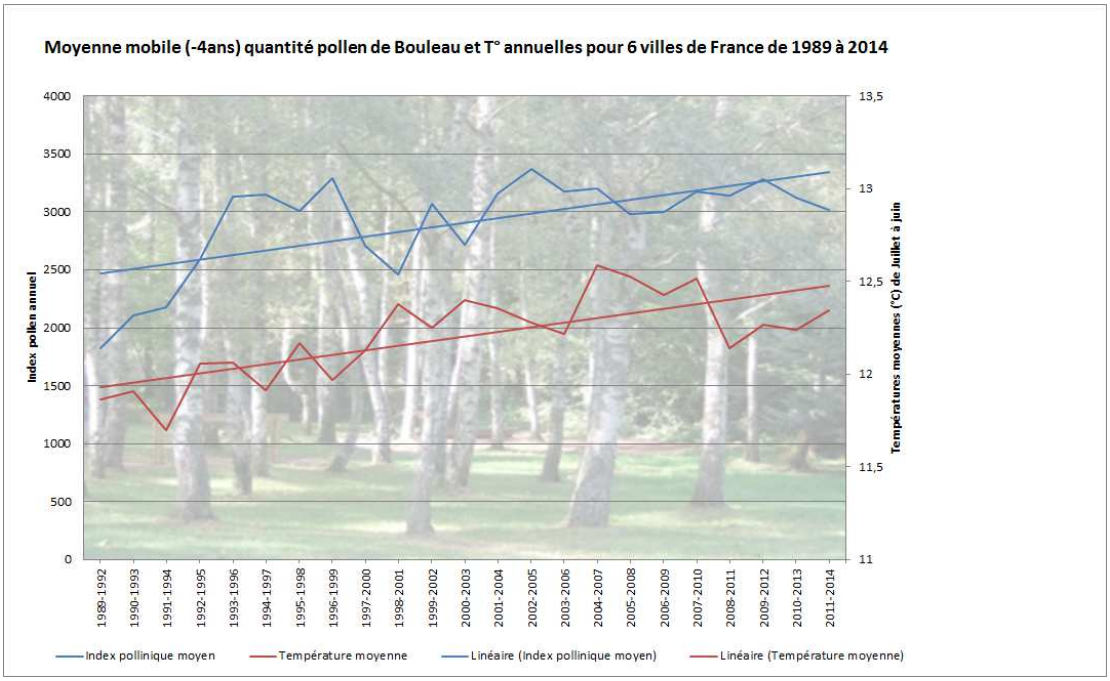



*Figure 11 : Evolution de la moyenne mobile (sur 4 ans) de la quantité de pollen de bouleau produite et de la température annuelle (entre le 1er juillet et le 30 juin) pour 6 villes de France de 1989 à 2014 (Source RNSA).*

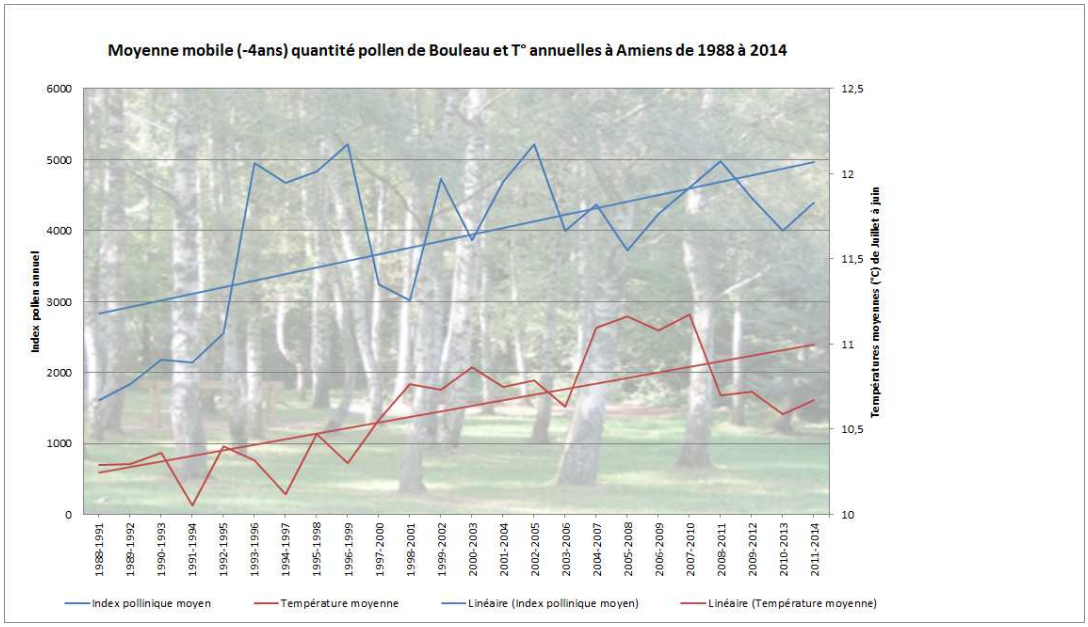



*Figure 12 : Moyenne mobile (-4ans) quantité de pollens de bouleau et T° annuelles à Amiens de 1988 à 2014 (Source RNSA).*

### Références bibliographiques


Air Pur Environnements et santé, 2013. *Développement d'un indicateur du changement climatique sur la biodiversité : exemple des pollens*. Dossier, 28p. , p. 4-13

ANSES, 2014. *Etat des connaissances dur l'impact sanitaire lié à l'exposition de la population générale aux pollens présents dans l'air ambiant*. Rapport d'expertise collective, 217 p.

Besancenot J.-P., Thibaudon M., 2012. Changement climatique et pollinisation. *Revue des Maladies Respiratoires,* Vol. 29, N°10, p. 1238-1253

Cuny M.A., Cuny D., Davranche L., Thibaudon M., Oliver G., Devoisins J.-M., 2015. Importance de la communication sur les enjeux santé-environnement liée à la végétation en ville. *Revue française d'allergologie* 3 (2015) 234–236, 235.

Davranche L., Sauvage-Delebarre C., Schadkowski C., Redlich Y., Delattre C., Gibert J., Thibaudon M., 2012. Anticipation du risque allergo-pollinique : implantation d'un « jardin des pollens » en Nord – Pas de Calais. *Revue française d'allergologie* 52 (2012) 267–272, 270

Institut National de Santé Publique du Québec, 2013. *État des connaissances sur le pollen et les allergies. Les assises pour une gestion efficace*. Rapport, 91 p.

Laffitte P., Saunier C., 2007. *Les apports de la science et de la technologie au développement durable, Tome II : La biodiversité : l'autre choc ? L'autre chance ?* Rapport Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, 192 p.

Météo France, 2015. *Rapport climat 2014*. Rapport, 29 p.

Ouzeau G., Déqué M., Jouini M., Planton S., Vautard R., Jouzel J., 2014. *Le climat de la France au XXI*ème *siècle, Volume 4 - Scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer.* Rapport du GIEC, 62 p.

RNSA, *Végétation en ville*. Guide d'information, 68 p., disponible http://www.vegetation-en-ville.org/

Thibaudon M., Monnier S., 2015. Les pollens de bouleau : indicateur santé du changement climatique. *Revue française d'allergologie* 3 (2015) 221–230, p. 228

# Impact des températures extrêmes sur la mortalité

Luc DAUCHET,

Facteurs de risques et déterminants moléculaires des maladies liées au vieillissement, INSERM

Parmi les conséquences du changement climatique figurent les épisodes climatiques extrêmes dont les périodes de températures extrèmes. La définition de la température extrême dépend de la région dans laquelle on se situe. Selon Météo France, pour le froid, il existe trois niveaux d'alerte qui vont de 0 à - 10°degrés et, pour la canicule, l'alerte est déclenchée à partir de trois jours d'observations de températures élevées. Ainsi, pour le Nord-Pas de Calais, cela correspond à trois jours de température minimale supérieure à 18 degrés et maximale supérieure à 33 degrés. D'un point de vue sanitaire, il faut une durée minimum de température élevée pour commencer à avoir un impact. Ainsi, l'impact des épisodes de températures extrèmes sera présenté dans cette communication au travers notamment de la canicule de 2003 dont les effets sanitaires sont restés dans toutes les mémoires.

**Qu'est-ce qui va provoquer le décès en cas de température extrême, qu'elle soit très élevée ou très basse ?** Les causes directes (hyperthermie, déshydratation ou hypothermie) vont toucher une population relativement restreinte essentiellement des sans domiciles fixes ou des populations très fragilisées. Bien que dramatiques, ces effets directs vont engendrer un nombre de décès relativement faible, quelques dizaines. Les causes indirectes sont les incendies, les accidents. Dans le Nord - Pas de Calais, nous sommes particulièrement concernés par les intoxications au monoxyde de carbone en hiver mais, ces causes indirectes provoquent un nombre de décès également relativement réduit. Ce qui va fortement augmenter la mortalité en cas d'épisodes de températures extrêmes, et en particulier de canicule, c'est qu'ils vont favoriser les complications de pathologies préexistantes ou le déclenchement d'un événement de santé comme un infarctus du myocarde, un événement respiratoire ou compliquer d'autres pathologies comme les pathologies mentales.

## Les impacts des températures extrêmes

Avant de passer aux épisodes de température extrême, il est important de rappeler que l'hiver est un épisode climatique annuel qui provoque beaucoup de morts. Comme le montre la Figure 1, il existe un effet saisonnier sur la mortalité avec un nombre de décès de 15 à 20 % supérieur en hiver qu'en été. Cette différence n'est pas uniquement liée aux températures mais aussi à d'autres phénomènes comme les infections, la grippe, etc.

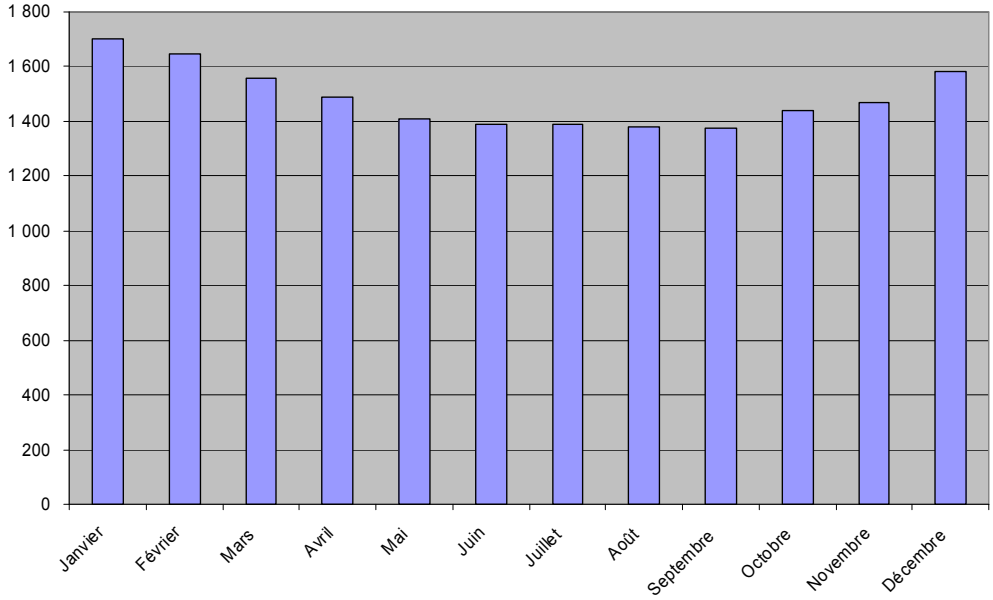



*Figure 1 : Nombre moyen de décès en France par mois selon le mois moyenne 1994-2012. (source : d'après les données de l'INSEE)*

En 2003 (Figure 2), l'impact de la canicule sur la mortalité était à peu près du même ordre de grandeur que l'impact de l'hiver. En revanche, celle-ci a eu lieu sur une durée extrêmement courte d'une quinzaine de jours.

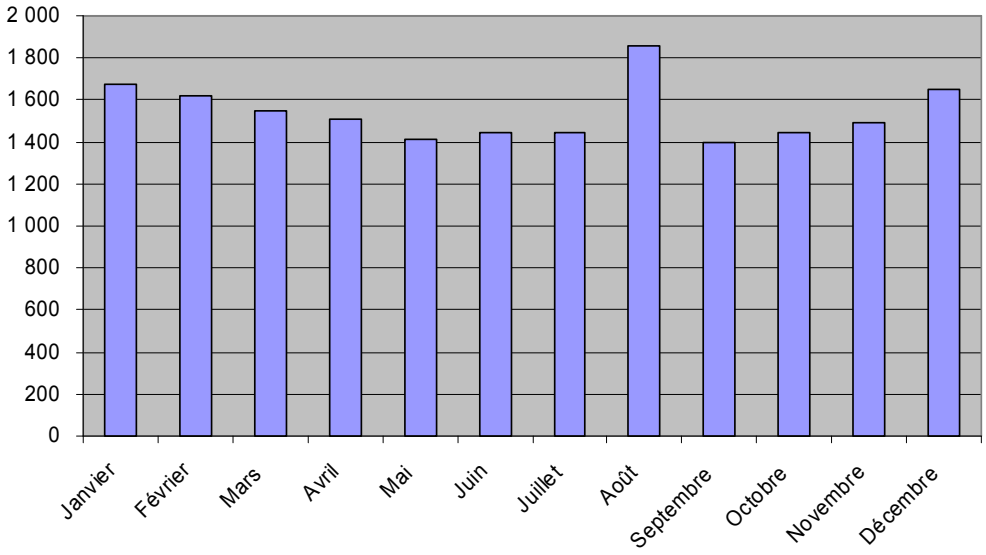



*Figure 2 : Nombre de décès mensuels en France au cours de l'année 2003 (source : d'après les données de l'INSEE).*

Les températures (maximales et minimales) sont restées très élevées durant une douzaine de jours. C'est la conjonction de ces températures élevées et de la durée de la canicule qui a induit une mortalité importante, avec par exemple, un pic de 2 000 morts supplémentaires par rapport à un 12 août habituel.

Une des caractéristiques de cette mortalité est qu'elle n'est pas immédiatement très visible. Comme le montre la Figure 3, alors que les statiques réalisées dans les semaines qui ont suivi l'épisode de canicule ont permis d'estimer le nombre de victimes à environ 15 000 morts, lors de l'épisode de canicule, peu d'acteurs s'étaient aperçus de la gravité de l'évènement. Pourquoi était-ce assez peu visible ? Les victimes directement liées à la canicule (hyperthermie, déshydratation…) étaient rares et dans les cas où la canicule avait contribué au décès en aggravant une pathologie préexistante (ou comme facteur de risque de survenu d'un événement) il était difficile d'identifier individuellement ces décès comme étant causés par la canicule.

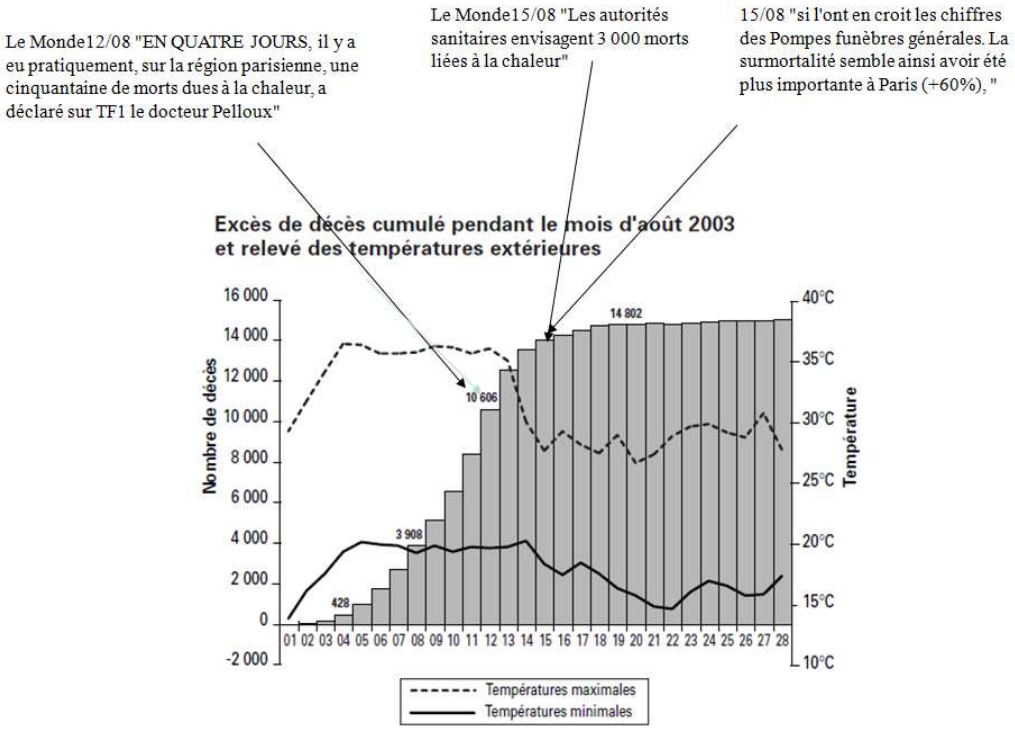



*Figure 3 : Evolution des décès lors de l'épisode de canicule de 2003 et difficultés d'évaluation de l'ampleur du phénomène (d'après BEH n° 45-46/2003).*

Seule est constatée une augmentation de la mortalité moyenne globale dans la population au moment des épisodes de canicule. En 2003, il y a eu un pic de mortalité avec environ 2,6 fois plus de décès le 12 août. Cela a diminué progressivement avec la diminution des températures. Après la fin de la canicule, il y a eu un retour à la normale (Figure 4).

Une des hypothèses avancée pour expliquer cette surmortalité est que cette canicule n'a fait qu'avancer de quelques jours ou semaines le décès de personnes extrêmement fragilisées ou qui étaient en fin de vie. Dans cette hypothèse, une diminution de mortalité aurait dû intervenir dans les mois ou semaines qui ont suivi, ce qui n'a pas été le cas. Il est probable que, parmi les gens qui sont décédés de la canicule, ceux qui ont eu un événement cardiovasculaire ou une maladie respiratoire ne seraient pas décédés aussi rapidement en temps normal.

**Quelles sont les populations les plus vulnérables et les plus touchées par cette canicule** en particulier ? Sur l'épisode de 2003, sur les moins de 35 ans, il n'y a eu aucune augmentation de mortalité. Chez les 35 à 74 ans, l'augmentation a été modérée, et elle a été très élevée chez les personnes de plus de 74 ans. Ce sont donc les personnes les plus âgées qui étaient les plus vulnérables. Les personnes avec le plus de pathologies et de facteurs de risque étaient également les plus vulnérables. Une étude menée à Paris en 2013 a montré que les femmes étaient plus vulnérables et que le fait de ne pas être marié induisait plus de risques de mortalité liée à la canicule. L'isolement était un facteur de risque de mortalité associé à la canicule. A côté de ces facteurs individuels, il existe également des facteurs collectifs. Ainsi, le fait de vivre une zone géographique où les températures sont habituellement élevées est, comme nous l'avons vu précédemment, un facteur protecteur.

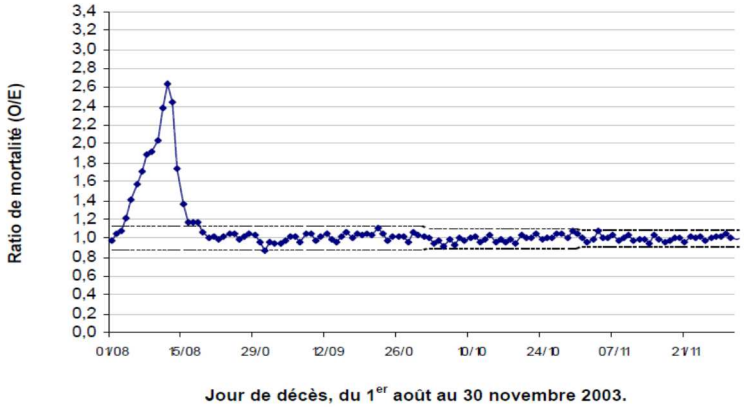



*Figure 4 : Evolution du ratio de mortalité (nombre de décès observés (O)/nombre de décès attendus (E)) du 1er août au 30 novembre 2003 en France métropolitaine. Les décès attendus sont estimés par rapport à l'âge moyen de la population et au rythme saisonnier de la mortalité*
*(Source : rapport Hémon Jougla octobre 2004)*

L'effet des températures extrêmes dépend de la zone géographique. Les populations s'y adaptent différemment fonction de l'endroit où elles se situent. A Athènes, par exemple, quand la température commence à descendre en dessous de 15 degrés, on observe une augmentation de mortalité (Figure 5). Par contre, en Finlande, une diminution des températures jusqu'à - 20 degrés provoquera une petite augmentation mais relativement modérée, de la mortalité. Cette population s'est adaptée à des climats froids et supporte des températures très basses.

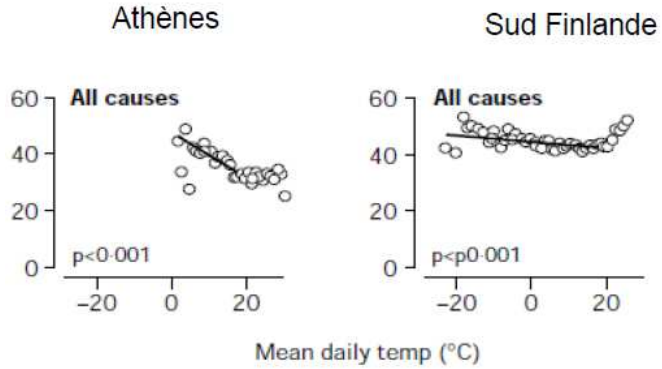



*Figure 5 : Evolution de la mortalité (nombre de décès pour un million d'habitants) en fonction des températures moyennes journalières en Grèce (Athènes) et en Finlande.*
*(Source : Eurowinter group Lancet 1997)*

Il existe donc des adaptations possibles des populations : adaptation physiologique, comportementale (porter des vêtements adaptés, chauffer ou refroidir son logement…), mais aussi de l'architecture et des infrastructures.

Pour ce qui est des températures élevées, le même phénomène existe. Pour chaque population, il existe un seuil en dessous duquel il n'y a pas d'augmentation de mortalité et à partir duquel, la mortalité augmente avec la température. Lorsque l'on se situe dans des climats chauds, comme à Athènes, il n'y a pas d'augmentation de mortalité jusqu'à un peu moins de 35 degrés car les populations sont habituées et les infrastructures sont adaptées. Au-delà, il y a une augmentation très forte de la mortalité (Figure 6).

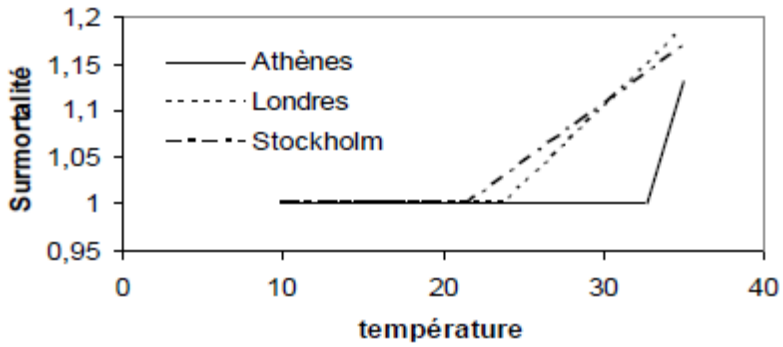



*Figure 6 : Effet de l'augmentation des températures sur la mortalité en fonction des zones géographiques. (d'après Hajat j epidemiol community health 2010)*

Dans les zones plus tempérées, plus froides, comme à Londres ou à Stockholm, on observe une augmentation de mortalité à des températures moyennes entre 20 et 25 degrés. Au final, dans chaque zone géographique, il existe une adaptation à la température moyenne, donc la zone de confort thermique va différer d'une zone géographique à l'autre.

Les zones urbaines sont également plus à risque (on y observe une augmentation plus importante de la mortalité) du fait de la présence d'îlots de chaleur urbains. En revanche, les zones où le PIB est le plus élevé sont moins touchées par les épisodes climatiques extrêmes et la canicule. Une partie est probablement liée à la climatisation.

**Où se situe le Nord - Pas de Calais en termes de risque ?** Lors de la canicule de 2003, l'Île-de-France a été la plus touchée avec un pic de mortalité jusqu'à 9 fois plus important que la mortalité habituelle le 12 août. En comparaison, le Nord - Pas de Calais a été relativement peu touché par la canicule, probablement du fait des températures plus faibles grâce à la façade maritime. Nous avons eu un profil assez proche de celui qui a été observé dans le sud de la France, dans la région Provence Alpes Côte d'Azur (Figure 7). Celle-ci a eu des températures élevées mais la mortalité a été plus faible du fait du caractère habituel de ces températures élevées et de l'adaptation de l'architecture, des habitudes comportementales et du système de santé

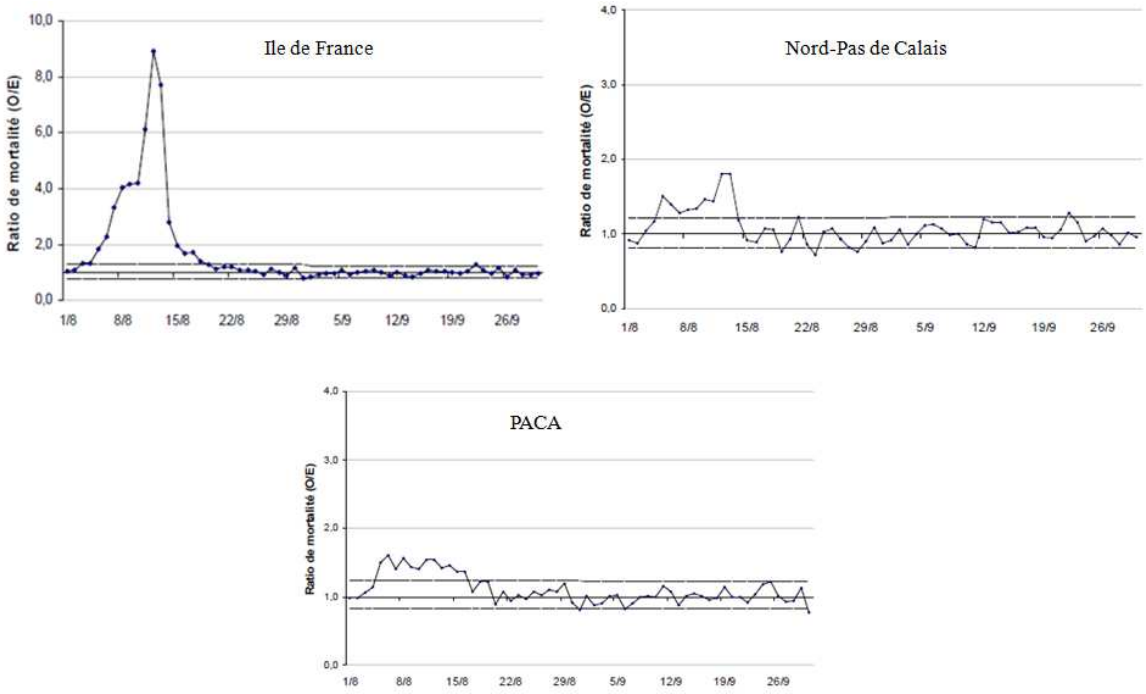



*Figure 7 : Evolution du ratio de mortalité*
*(nombre de décès observés (O)/nombre de décès attendus (E))*
*du 1er août au 30 septembre 2003 en France métropolitaine.*
*(Source : rapport Hémon Jougla octobre 2004)*

Aujourd'hui, dans le Nord - Pas de Calais, le froid est un enjeu plus important que la chaleur en termes de mortalité. Les travaux réalisés par l'équipe de recherche RID Age sur l'incidence de l'infarctus du myocarde en fonction de la température, montrent que plus la température est élevée, plus l'incidence de l'infarctus du myocarde diminue (Figure 8).

Dans d'autres régions, là où les températures sont plus élevées, nous observons une remontée du risque d'infarctus du myocarde lorsque les températures augmentent. Actuellement, en dehors des épisodes extrêmes de 2003, les températures suffisamment élevées pour observer cette augmentation de mortalité liée à la température sont rarement atteintes.

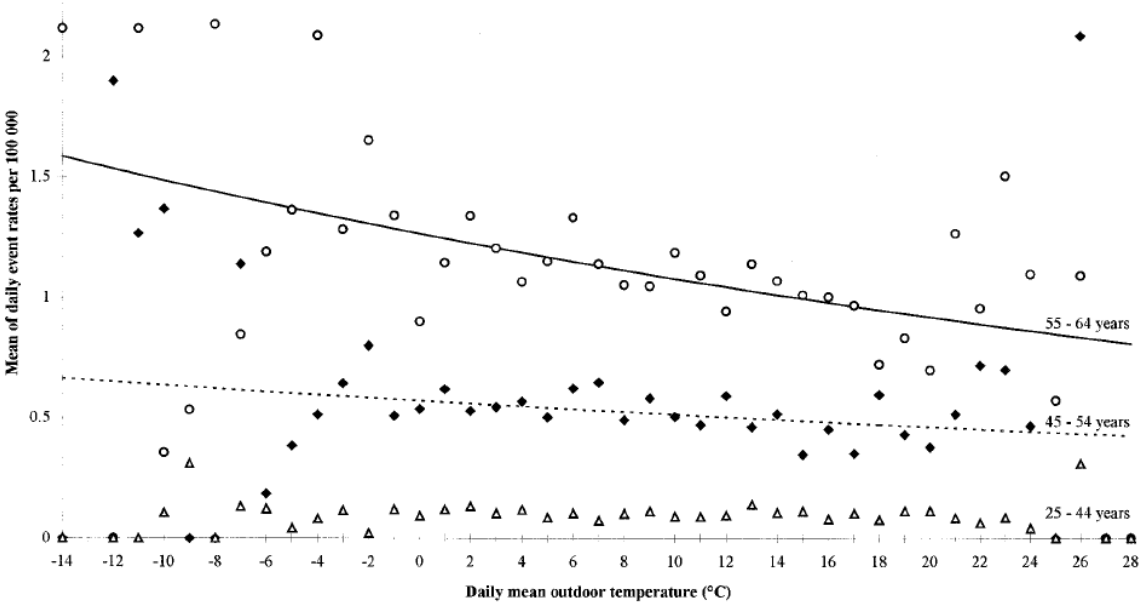



*Figure 8 : Evolution du taux d'évènements coronariens journaliers pour 100 000 personnes en fonction de la température moyenne journalière. Différents groupes d'âges sont présentés : △ : 25-44 ans; ◆ : 45-54 ans; O : 55-64 ans. (source : Danet circulation 1999)*

### Le risque lié aux températures extrêmes dans l'avenir.

Le changement climatique pourrait provoquer une augmentation de 2 à 3 degrés de la température dans le Nord-Pas de Calais d'ici à 2050. Si en 2015, nous atteignions immédiatement ces températures nous observerions probablement une mortalité augmentée liée à notre inadaptation à ces conditions, notre température de confort actuelle dans le Nord-Pas de Calais n'étant pas la même que celle du Languedoc-Roussillon. S'il y a une augmentation de température, elle nécessitera donc une adaptation et un décalage de la courbe de mortalité dans le Nord-Pas de Calais en fonction de la température par rapport à ce qu'elle est aujourd'hui est possible.

En conclusion, comme le montre la Figure 9, on peut se demander si le bénéfice sur la diminution de la mortalité que l'on aura lors d'épisodes de froid sera compensé par l'augmentation de mortalité dans les épisodes de canicule. Le changement climatique va s'accompagner d'une augmentation de la variabilité, avec peut-être, autant d'épisodes de froid, beaucoup plus d'épisodes de canicule et moins de périodes de températures médianes.

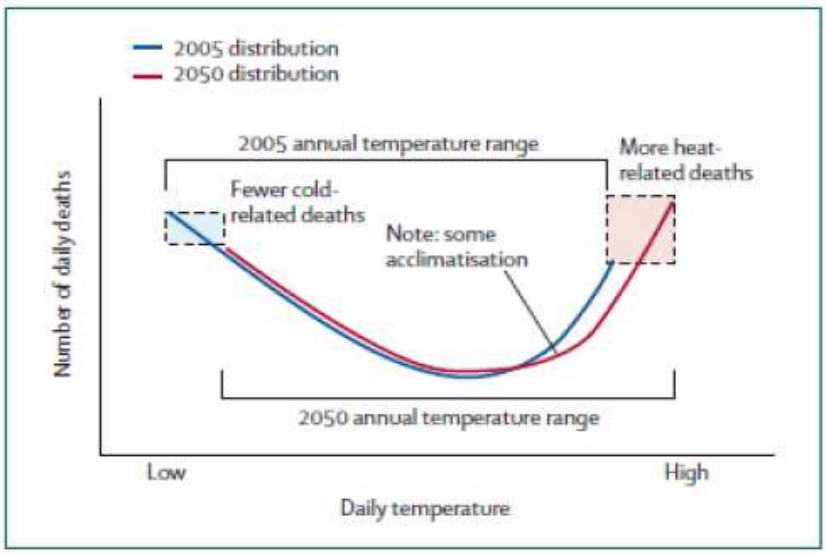



*Figure 9 : Représentation schématique de l'influence d'une augmentation de la température moyenne annuelle sur la mortalité due aux températures en décalant le nombre de morts journaliers vers la droite. (McMichael Lancet, 2006).*

Le facteur aggravant de cette évolution est le vieillissement de la population. Nous avons une population jeune dans le Nord - Pas de Calais mais elle va vieillir, comme l'ensemble de la population française. Nous avons également une population extrêmement urbanisée, donc plus fortement impactée par les changements climatiques. Il faudra probablement une modification des comportements des individus. Beaucoup de choses se feront probablement progressivement, mais certains changements seront plus complexes. Par exemple, en terme d'architecture, les bâtiments qui sont actuellement plutôt construits pour avoir plus de lumière, plus de soleil devront évoluer pour apporter plus de protection vis à vis de la chaleur.

Mais on peut se demander dans quelles mesures, toutes les adaptations nécessaires seront possibles et à quel coût ?

### Références bibliographiques

BEH, 2003. Impact sanitaire de la vague de chaleur d'août 2003 : premiers résultats des travaux à mener. *BEH* InVS, 45-46, 20p.

Danet, S., Richard, F., Montaye, M., Beauchant, S., Lemaire, B., Graux, C., Cottel, D., Marécaux, N., Amouyel, P., 1999. Unhealthy effects of atmospheric temperature and pressure on the occurrence of myocardial infarction and coronary deaths. A 10-year survey: the Lille-World Health Organization MONICA project (Monitoring trends and determinants in cardiovascular disease). *Circulation*, 100, p. 1-7.

The Eurowinter Group, 1997. Cold exposure and winter mortality from ischaemic heart disease, cerebrovascular disease, respiratory disease, and all causes in warm and cold regions of Europe. *The Lancet*, 349, p. 1341-6.

Hajat, S., Kosatky, T., 2010. Heat-related mortality: a review and exploration of heterogeneity. *Journal of Epidemiology and Community Health,* 64, p. 753-60.

Hemon, D., Jougla E., 2004. *Surmortalité liée à la canicule d'août 2003*, Rapport INSERM, 76p.

McMichael, A.J., Woodruff, R.E., Hales, S., 2006. Climate change and human health: present and future risks*. The Lancet,* 367, P. 859-869.

# Impact du changement climatique sur la santé via la pollution atmosphérique

Lydia NIKASINOVIC,

## Impact de l'environnement chimique sur la santé humaine

### Les liens complexes entre santé et pollution atmosphérique.

La pollution atmosphérique et la santé respiratoire cultivent des relations complexes à plusieurs titres. La pollution de l'air est un cocktail de polluants, c'est-à-dire d'un grand nombre de polluants, qui peuvent en outre réagir entre eux pour former des polluants secondaires. Par ailleurs, nous ne sommes pas tous exposés de la même façon. Ainsi, l'exposition à la pollution de l'air est hétérogène dans le temps et dans l'espace : elle dépend notamment des lieux fréquentés par l'individu et des activités qu'il y accomplit

Les maladies qui ont été associées à l'exposition à la pollution atmosphérique sont, par nature, multifactorielles, c'est-à-dire que la pollution atmosphérique n'est que l'un des facteurs parmi d'autres qui contribuent à leur apparition, par exemple les maladies respiratoires dont l'asthme, les allergies, la bronchite chronique, ou encore certaines maladies cardiovasculaires. Ainsi, les approches épidémiologiques doivent tenir compte de l'ensemble des facteurs de risque. De plus, les individus ne sont pas égaux, ils ne présentent pas la même sensibilité, par rapport à la pollution atmosphérique. Parmi les facteurs de sensibilité, il y a l'âge, les antécédents médicaux et l'état de santé.

Les études épidémiologiques, extrêmement nombreuses sur le sujet, ont identifié un certain nombre de populations sensibles, en premier lieu les femmes enceintes et les jeunes enfants, les personnes âgées et les personnes souffrant de maladies chroniques telles que l'asthme, les allergies, les broncho-pneumopathies chroniques obstructives (ou BPCO), les maladies cardiovasculaires et le diabète. D'autres personnes ayant déjà une exposition du fait de leur comportement, par exemple les fumeurs, ou bien au cours d'expositions professionnelles, vont également être beaucoup plus sensibles à la pollution atmosphérique. Enfin, les sportifs sont également plus sensibles du fait de leur activité physique, en inhalant beaucoup plus d'air que les autres personnes.

L'une des caractéristiques de la relation pollution atmosphérique et santé est que le risque reste faible à l'échelle individuelle. Mais comme toute la population est exposée et qu'il n'est pas possible de se soustraire à la pollution atmosphérique, l'impact en termes de santé publique, à l'échelle collective, est important.

Les populations ne sont pas toutes exposées de la même façon à la pollution atmosphérique. Il existe une inégalité environnementale par rapport à cette exposition. Celle-ci est illustrée par un exemple Figure 1. Elle présente les concentrations de particules fines de diamètre aérodynamique inférieur à 10 µm (appelées $PM_{10}$) à Lille, le 24 mars 2015. En rouge figurent toutes les zones où la pollution atmosphérique était mauvaise à très mauvaise. Les personnes qui vivent proches des grands axes de trafic vont être soumises en permanence à des niveaux

de pollution très élevés par rapport aux populations vivant éloignées. C'est une illustration des inégalités environnementales.

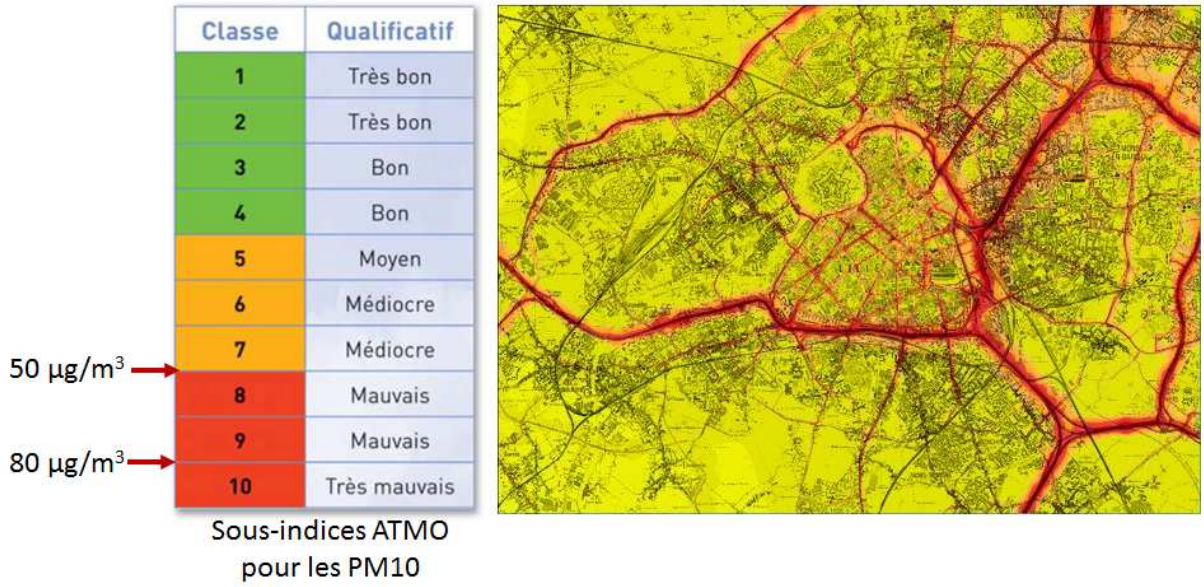



*Figure 1 : Pollution atmosphérique par les PM10 à Lille le 24/03/2015. Les zones en rouge correspondent à une mauvaise voire à une très mauvaise qualité de l'air. (Source : ATMO Nord-Pas de Calais).*

L'exposition des citoyens est également importante en Europe. La Figure 2 présente la proportion de sujets exposés à des niveaux de pollution supérieurs à la norme européenne et à celle de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS).

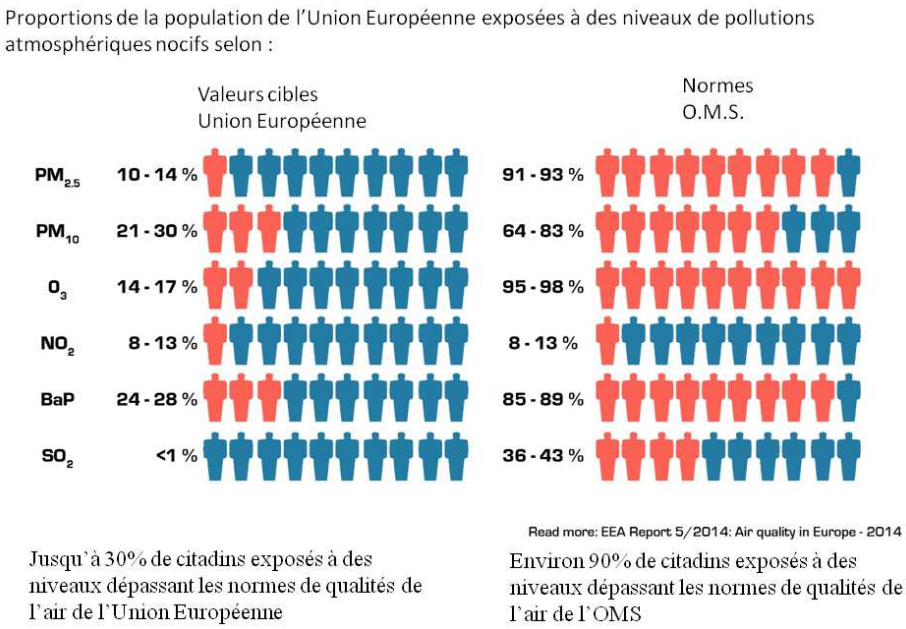



*Figure 2 : Proportions de la population européenne exposées à la pollution atmosphérique en fonction des seuils européens ou de l'Organisation Mondiale de la Santé (Source : Agence de l'Environnement Européenne, 2014).*

Par exemple, pour les $PM_{10}$, 30 % des citadins européens sont exposés à des niveaux qui dépassent les normes de qualité de l'air de l'Union Européenne (à gauche). Selon les normes de qualité de l'air préconisées par l'OMS, qui sont plus strictes (à droite), 90 % des citadins européens sont exposés à des niveaux supérieurs à ces normes, jusqu'à 98 % pour l'ozone, 91 à 93 % pour les particules de diamètre aérodynamique inférieur à 2,5 µm ($PM_{2,5}$). Enfin, toujours selon les critères de l'OMS, pratiquement l'ensemble de ces populations est finalement exposée au benzo[a]pyrène, composé cancérigène certain, à des concentrations supérieures aux normes.

### Les effets de la pollution atmosphérique sur la santé.

Les effets sur la santé sont de différents types selon qu'ils surviennent à court ou long terme.

*Les effets à court terme* sont des manifestations cliniques, fonctionnelles ou biologiques aiguës survenant dans des délais brefs (de quelques jours à quelques semaines au maximum) après l'exposition à la pollution atmosphérique. Ce sont typiquement les effets observés après des pics de pollution. Les études épidémiologiques les ont très bien quantifiés depuis le début des années 90. Les résultats mettent notamment en évidence des réactions inflammatoires de l'ensemble de l'arbre respiratoire (du nez jusqu'aux alvéoles pulmonaires) et une exacerbation des symptômes respiratoires préexistants. Par exemple, une personne asthmatique aura des symptômes amplifiés lors de pics de pollution.

Ces effets à courts termes engendrent d'autres phénomènes tels qu'une augmentation de la consommation de médicaments, une augmentation des hospitalisations et des passages aux urgences pour cause cardiorespiratoire.

Plus particulièrement, concernant les particules et l'ozone impliqués dans le changement climatique, les particules ont été associées à une augmentation de la fréquence des symptômes de maladies cardiorespiratoires. L'ozone a également des effets négatifs sur la fonction respiratoire (réactions inflammatoires).

*Un effet à long terme* est le développement de processus pathogènes au long cours qui peuvent conduire à un événement morbide (la maladie) voire même au décès. Les études épidémiologiques ont montré, depuis la fin des années 90, que les expositions à long terme sont responsables d'une augmentation du risque de développer un cancer du poumon, une BPCO ou encore de l'asthme. Il ne s'agit pas de l'exacerbation mais bien de la genèse d'une pathologie. Une augmentation du risque de développer un infarctus du myocarde a également été montré. En conséquence, on peut déplorer d'avantage de morts prématurées et une diminution de la qualité et de l'espérance de vie.

L'ozone, par exemple, provoque une baisse significative du développement de la fonction pulmonaire, ainsi un enfant exposé au cours de sa croissance a une forte probabilité d'avoir une fonction respiratoire altérée. L'ozone est également responsable d'une augmentation de l'incidence de l'asthme. Quant aux particules fines, elles diminuent la fonction pulmonaire chez l'adulte et chez l'enfant, augmentent les symptômes des voies respiratoires inférieures et l'incidence de la BPCO. Enfin, elles contribuent à diminuer l'espérance de vie du fait d'une

augmentation de la mortalité cardiorespiratoire et par cancers pulmonaires.

S'agissant de connaissances les plus récentes, un rapport de l'OMS, publié en 2013, indique que les effets sanitaires des $PM_{2,5}$, de l'ozone et du dioxyde d'azote se font ressentir à des niveaux en deçà des valeurs limites d'exposition fixées par l'OMS, déjà assez strictes. De plus, il existe une relation dose-réponse entre l'exposition aux $PM_{2,5}$ et le risque de décès, ce qui plaide en faveur d'une relation causale. C'est une relation sans seuil, c'est à dire qu'il n'y a pas de seuil en dessous duquel on ne voit pas d'effet. Les particules « diesel », qui sont les principales particules issues du trafic, ont été classées en 2012 "cancérogènes certains pour l'homme" par le Centre International de Recherche contre le Cancer (CIRC).

Les nouveaux effets de la pollution atmosphérique mis en évidence récemment concernent les troubles de la reproduction et du développement de l'enfant ainsi que les problèmes de fertilité, de fausse couche, de croissance du fœtus, de naissances prématurées et de faible poids à la naissance. À l'heure actuelle se développe le concept de « fenêtre d'exposition ». Au cours du développement, de la conception et jusqu'à la fin de l'enfance, il existerait des périodes d'exposition où l'enfant serait plus particulièrement sensible aux effets à long terme de la pollution atmosphérique. Sont également investigués à l'heure actuelle les liens entre la pollution atmosphérique et l'apparition de troubles neurologiques tels que les accidents vasculaires, l'autisme ou la maladie d'Alzheimer.

Le rapport de l'OMS de 2013 met également en avant que l'impact sanitaire le plus important à considérer aujourd'hui est à relier aux effets à long terme. C'est pourquoi la lutte contre les expositions chroniques doit se faire aussi pour la pollution de fond, et pas uniquement pour les pics de pollution.

D'un point de vue Santé publique, les estimations de l'OMS publiées en 2014 montrent que les risques sont beaucoup plus importants qu'attendus, en particulier pour les cardiopathies et les accidents vasculaires cérébraux. Les dernières estimations de décès prématurés attribuables à la pollution extérieure dans le monde s'élèvent à 3,7 millions de décès prématurés en 2012, que ce soit en zone urbaine ou en zone rurale. Parmi ces décès, 40 % sont dus à des cardiopathies ischémiques, 40 % à des accidents vasculaires cérébraux, 11 % à une BPCO, 6 % à des cancers du poumon et 3 % à des infections respiratoires des voies inférieures chez l'enfant.

À l'échelle européenne, les résultats issus du programme européen APHEKOM (réalisé de 2004 à 2006) auquel a participé l'Institut National de Veille Sanitaire indiquent que 39 millions d'Européens étaient exposés à la pollution atmosphérique. La Figure 3 présente certains résultats de cette étude qui a estimé que 19 000 décès prématurés dont 15 000 pour maladies cardiovasculaires peuvent être attribués à la pollution atmosphérique. Le coût de cette pollution serait de 31,5 milliards d'euros, liés aux dépenses de santé qui en découlent et aux coûts associés.

S'agissant de l'impact en France, selon différentes études épidémiologiques (dont le programme CAFE - Clean Air For Europe - 2005) 40 000 décès prématurés étaient attribuables à une exposition chronique au $PM_{2,5}$ en 2000. Cela représentait également 13 000 hospitalisations et 21 000 nouveaux cas de bronchites chroniques par an. À titre de

comparaison, la même année, les autres risques extrêmement médiatisés tels que les risques liés à la sécurité routière représentaient 3 300 décès tandis que le tabac était responsable de 73 000 décès.

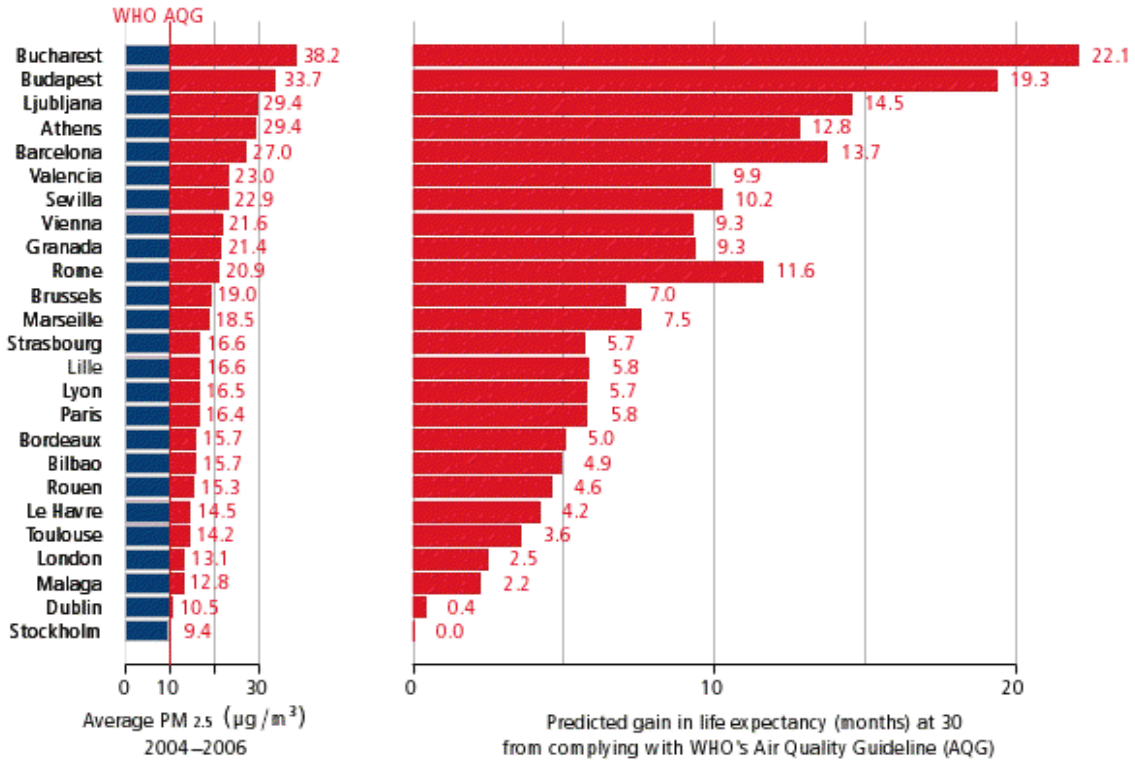



*Figure 3 : Résultat du programme APHEKOM. Il concerne 25 villes européennes (dont Lille). Cette figure présente le gain en espérance de vie (en mois) à 30 ans, si les critères de concentration en PM2.5 préconisés par l'OMS (soit 10 µm/m³ en moyenne sur l'année) étaient respectés (Source : APHEKOM. Improving Knowledge and Communication for Decision Making on Air Pollution and Health in Europe, 2008-2011).*

### Les effets de la pollution atmosphérique sur la santé dans le contexte du changement climatique.

Les conditions météorologiques vont jouer sur les polluants, notamment au niveau de la chimie atmosphérique, de leur dispersion et de leurs niveaux d'émission pour finalement, aboutir à des niveaux d'imissions, c'est-à-dire les concentrations de polluants dans l'air ambiant, plus élevés, qui vont impacter un peu plus la santé.

Le programme franco-américain ACHIA (Air Climat Health Impact Assessment 2011-2013) avait pour objectif d'estimer les impacts sanitaires futurs de la pollution dans le monde, l'Europe et en Île-de-France et de comparer les bénéfices sanitaires attendus sous différents scénarii de réduction des émissions de polluants dans l'air. Ce programme a utilisé les outils de modélisation du climat, de la qualité de l'air et de la santé les plus récents ainsi que deux scénarii d'évolution, l'un modéré (Scenario CLE), correspondant uniquement à ce qu'il se passerait si on appliquait la réglementation actuelle en vigueur ainsi que les objectifs prévus pour l'avenir, et l'autre plus restrictif (scénario MFR), correspondant à la réduction maximale

d'émission techniquement faisable. Concernant l'évolution du climat, le scénario moyen RCP4.5. a été utilisé (ni optimiste ni pessimiste). La Figure 4 présente l'évolution des décès pour causes cardiovasculaires, associés aux évolutions des $PM_{2.5}$ (en haut) et à l'ozone (en bas) en Europe à l'horizon 2030, par rapport à 2010. A gauche sont indiqués les résultats en appliquant le scénario CLE, et à droite le scénario MFE.

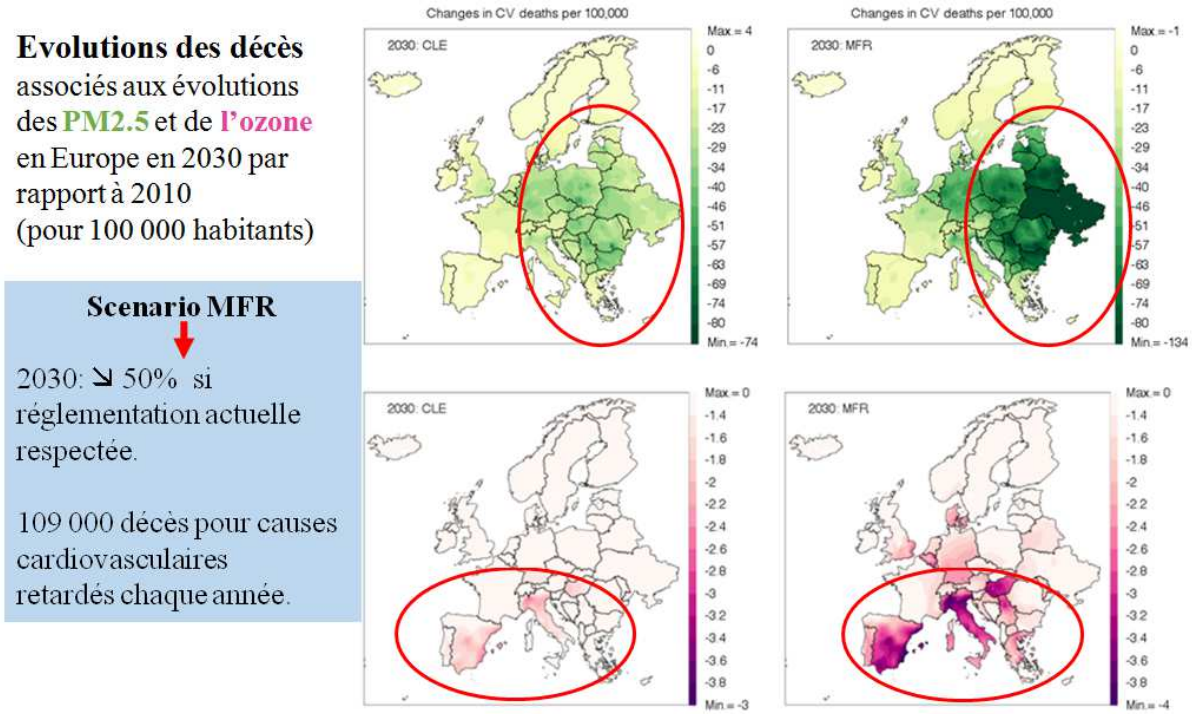



*Figure 4 : Evolution des décès pour cause cardiovasculaires en Europe en fonction de différents scénarii de diminution de la pollution en $PM_{2,5}$ et en ozone (Source http://ac-hia.com).*

Toutes les régions en vert présenteraient un gain non négligeable en termes de décès pour pathologies cardiovasculaires. Si le modèle le plus restrictif (qui tient compte du changement climatique), est appliqué le bénéfice qui en découle est beaucoup plus important et serait surtout observé du côté de l'Europe centrale et des pays de l'Est (pays en vert foncé). C'est la même chose pour l'ozone, avec une légère amélioration des pathologies liées à la pollution pour le scénario modéré. Avec le modèle restrictif intégrant le changement climatique (rose foncé), le gain serait non négligeable en termes de réduction du nombre de décès. Cela profiterait surtout aux pays du sud de l'Europe. L'application du scenario MFR, permettrait, dès 2030, une baisse de 50 % des décès associés à cette pollution et 109 000 décès pour causes cardiovasculaires seraient retardés chaque année. La Figure 5 présente les bénéfices santé, à l'échelle de la région parisienne, à l'horizon 2050 cette fois, comparés à 2010. En haut figure la baisse du nombre de décès (pour 100 000 habitants) par maladie cardiovasculaire liés à la baisse des concentrations en PM2.5 si le scénario CLE était appliqué (en violet), et si le scénario MFE était appliqué (en vert), tandis qu'en bas figure la baisse du nombre de décès (pour 100 000 habitants) par maladie respiratoire liés à la baisse des concentrations en ozone, selon le scénario CLE (en violet) ou le scénario MFR (en vert).

On remarque que pour les PM2.5, les bénéfices seraient plus élevés à Paris et sa banlieue en cas d'application du scénario MFR, tandis que pour l'ozone, ce même scénario bénéficierait surtout en zone rural et en banlieue parisienne. Avec le scénario MFR, 2800 décès seraient retardés en 2050, tandis que la mortalité cardiovasculaire attribuable aux PM2.5 et à l'ozone serait réduite de 20%, par rapport à 2010.

**Evolution du nombre de décès pour cause cardiovasculaire** associée aux évolutions des PM2.5 et de l'ozone en Ile-de-France en 2050 par rapport à 2010 (pour 100 000 habitants)

**Scenario MFR**

- 2050: 2800 décès retardés chaque année
- Par rapport à 2010, ↘ mortalité cardiovasculaire de près de 20%.

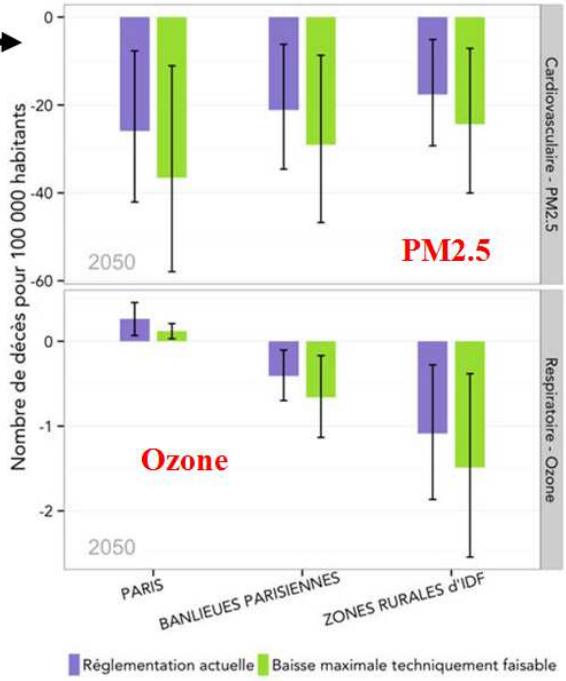



*Figure 5 : Evolution des décès pour cause cardiorespiratoire en Ile de France en fonction de différents scénarii de diminution de la pollution en $PM_{2,5}$ et en ozone (Source [http://ac-hia.com](http://ac-hia.com)).*

### Conclusion

Selon l'OMS (2014) : « *La pollution atmosphérique est désormais le principal risque environnemental pour la santé au niveau mondial.* » Le projet A-CHIA est un exemple remarquable de collaboration entre spécialistes de la modélisation, de la qualité de l'air, du climat et de l'épidémiologie. Il montre des interactions fortes entre pollution et changement climatique. Nous avons ici l'opportunité de gagner sur les deux tableaux, à condition que les politiques publiques intègrent le changement climatique, dans une stratégie coordonnée de réduction des émissions de gaz à effet de serre et d'amélioration de la qualité de l'air. En termes de santé publique, le bénéfice de cette stratégie coordonnée serait beaucoup plus important.

### Références bibliographiques

APHEKOM, 2011. *Improving Knowledge and Communication for Decision Making on Air Pollution and Health in Europe. Summary report of the Aphekom project 2008-2011.* Rapport 2011, 12p.

Chanel, O., 1999. *Monétarisation des effets de la pollution atmosphérique sur la santé de la population française : Une approche européenne*. BETA, EUREQua, GREQAM, Rapport, 62p

European Environment Agency, 2014. *Air quality in Europe — 2014*. Rapport 2014, 80 p.

Organisation Mondiale de la Santé (WHO), 2005. *Lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air : particules, ozone, dioxyde d'azote et dioxyde de soufre. Mise à jour mondiale 2005 : synthèse de l'évaluation des risques*. Rapport 2006 , 25p.

Organisation Mondiale de la Santé (WHO), Susann Henschel and Gabrielle Chan, 2013. *Health risks of air pollution in Europe –HRAPIE project New emerging risks to health from air pollution – results from the survey of experts. 2013*. Rapport 2013, Regional Officie for Europe, Danemark, 65p.

Organisation Mondiale de la Santé (WHO), 2014. *7 millions de décès prématurés sont liés à la pollution de l'air chaque année*. Communiqué de presse du 25 mars 2014.

# Impacts climatiques sur la santé : Risques sanitaires émergents

Régis MATRAN

Hospitalier Régional, Université de Lille 2

Le changement climatique va influencer les déterminants sociaux et environnementaux de la santé. Il aura de nombreux impacts, en particulier socio-économiques, mais aussi sur la qualité de l'air et de l'eau, pouvant faire émerger des risques actuellement connus dans les pays chauds. Nous pouvons envisager, au-delà de 2100, une augmentation des pathologies déjà existantes, telles que la malnutrition, l'infection, les diarrhées, l'hyperthermie, etc... Selon l'Organisation mondiale pour la santé (OMS) ce risque représente une augmentation de 250 000 décès par an pour la France entre 2030 et 2050 et un coût direct des dommages évalué entre 2 et 4 milliards de dollars par an dans le monde.

Le changement climatique va provoquer des modifications importantes de notre environnement. Actuellement, leurs impacts sanitaires ne sont pas encore connus mais il est très probable que la modification des écosystèmes s'accompagnera d'une augmentation des risques sanitaires.

En 2050, le climat de la Région Nord-Pas de Calais se rapprochera de celui de Nantes ou d'Angers. Ce changement climatique s'accompagnera d'un changement environnemental, donc d'une évolution des différentes pratiques (agriculture, aquaculture, élevage...) avec des impacts économiques importants.

Toutes les populations sont exposées. Cependant, il existe des populations plus vulnérables ou à risques : les personnes âgés, précaires, les enfants et toutes les personnes fragilisées. Les patients atteints d'une pathologie chronique, qu'elle soit rénale, cardiaque, hépatique, respiratoire, sont toujours plus sensibles.

## Les impacts du changement climatiques sur les pathologies non infectieuses

Le changement climatique risque de provoquer une augmentation des maladies déjà connues et en particulier cardiovasculaires, respiratoires et digestives. Ce risque est lié à l'augmentation probable des concentrations des polluants atmosphériques, à une élévation des températures, aux évolutions des pratiques professionnelles dans de nombreux secteurs (Industrie, agriculture....), aux adaptations des comportements alimentaires mais aussi à l'allongement de la période d'expositions aux allergènes liée à l'augmentation de la période de pollinisation.

L'augmentation du risque de catastrophes naturelles, que ce soit aussi bien la modification des précipitations, les inondations mais aussi la sécheresse vont probablement modifier les risques de famine et de malnutrition, les pathologies parasitaires, et celles liées aux vecteurs d'agents infectieux comme les moustiques.

L'augmentation des périodes d'ensoleillement entraîne un risque d'atteintes cutanées et notamment de cancers. Le mélanome est une des pathologies en forte augmentation dans le futur. La Figure 1 présente l'évolution de l'incidence de mélanome au niveau mondial. Entre 1980 et 2011, leur nombre a augmenté aussi bien chez l'homme que chez la femme. En France, le mélanome a progressé de 45 % chez l'homme en 20 ans et de 20% chez la femme. Des campagnes de prévention et d'information seront de plus en plus nécessaires à l'avenir.

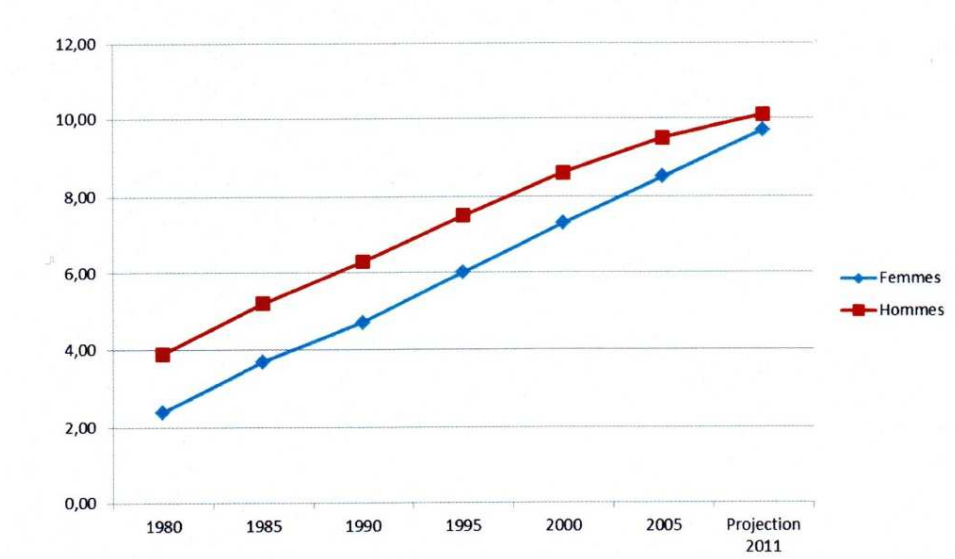



*Figure 1 : Evolution de l'incidence du mélanome dans le monde. Taux standardisé pour 100 000 personnes/an (Source InVS/ INSERM, 2011 & HCL/InVS/INCa/Francim/INSERM, 2011).*

Les changements climatiques vont modifier la biodiversité et bouleverser la production agricole dans un contexte marqué par une mondialisation des pratiques agricoles et les limitations dans le choix des semences (politique économique). A titre d'exemple, la sélection d'un seul génotype de graminée favorise la diffusion d'agents pathogènes, et de ce fait, provoque un usage beaucoup plus massif d'insecticides. Lorsque l'on mélange les espèces et les variétés, on crée ce que l'on appelle « l'effet de dilution ». Cela veut dire que différentes espèces entre elles sont capables d'être beaucoup plus résistantes vis-à-vis des agents pathogènes, d'être moins permissives et surtout de réduire la dépendance aux pesticides et insecticides. D'autres milieux seront influencés par les changements climatiques (air, eau) avec un impact direct sur l'agriculture et l'élevage.

Les conséquences du changement climatique auront des impacts sur l'alimentation et au-delà, sur les pathologies digestives et les pathologies associées. Ainsi, dans l'intestin, il existe une flore indispensable au fonctionnement intestinal, le microbiome. Toute action qui va entraîner la modification qualitative et/ou quantitative du microbiome peut être liée à des facteurs environnementaux, à de nouvelles pratiques alimentaires, à l'hygiène ou aux traitements... Cette altération du microbiome aura systématiquement un retentissement sur l'émergence et/ou l'augmentation de la prévalence de pathologies digestives existantes, en particulier des maladies inflammatoires de l'intestin.

## Les impacts du changement climatiques sur les pathologies infectieuses

Là encore, il s'agit d'un problème multifactoriel. 70 à 80 % des maladies infectieuses de l'homme viennent d'un contact avec les animaux (animal domestique ou sauvage) qui sont les hôtes des agents pathogènes. Ces derniers sont contaminés par des vecteurs (moustique, rongeur…), qui sont les réservoirs des agents infectieux (virus, bactéries, champignons…). Lors d'un contact entre l'hôte et l'homme, ce dernier peut être infecté et développer une maladie. Les relations possibles entre le vecteur, l'hôte et l'homme sont très nombreuses (alimentation, mode de vie, animaux de compagnie…).

Le changement climatique modifiera probablement les relations agent infectieux/hôtes et nous pouvons envisager l'apparition de nouvelles maladies infectieuses, l'émergence d'infections actuellement absentes dans notre région ou des épisodes d'épidémies en cas de catastrophes naturelles importantes. Par exemple, les épidémies de choléra sont connues depuis très longtemps, avec des épisodes importants comme à Londres en 1954, et plus récemment à Haïti, en 2010. Enfin, il y a des épisodes réguliers de tuberculose, liés ou non au Sida.

Les facteurs favorisant les émergences ou les réémergences de maladies infectieuses sont nombreux. Ils concernent l'adaptation des différents acteurs (vecteurs, hôtes, homme) impliqués dans le risque infectieux. Par exemple, il s'agit de l'adaptation du micro-organisme, qui peut produire de nouvelles toxines. Certains vont devenir pathogènes pour l'homme (alors qu'ils ne l'étaient pas). Le vecteur, comme le moustique par exemple, peut également s'adapter aux évolutions climatiques. Enfin, la susceptibilité (façon de réagir vis à vis du parasite) de l'hôte (animal ou homme) évolue dans le temps. L'homme ou l'animal peut développer une meilleure tolérance ou au contraire devenir plus fragile en fonction de l'évolution des systèmes de défense (système immunitaire). Il faut également intégrer les changements des comportements et des habitudes de vie des populations humaines (alimentation, regroupements, voyages, modifications socio-économiques…) qui peuvent influencer l'écosystème des agents infectieux.

Les maladies émergentes et ré-émergentes existent chez les animaux sauvages, chez les animaux domestiques et chez l'homme (Figure 2). Certaines sont spécifiques et d'autres sont communes aux trois groupes. Ainsi, par exemple, la maladie de Lyme, liée à la piqûre des tiques représente 5 000 cas en France.

L'organisation mondiale de la santé animale s'intéresse principalement à l'élevage. Cette organisation établie des relations entre la production animale, l'évolution des écosystèmes et les maladies animales. Elle estime que l'évolution des écosystèmes, les changements climatiques et environnementaux ont un impact fort sur les maladies animales émergentes ou ré-émergentes. De même, la production animale a un impact sur l'évolution des écosystèmes (production de méthane par exemple). Ainsi, les politiques d'élevage et les pratiques des traitements et d'amélioration des espèces vont avoir une influence. Compte tenu de ces multiples interactions, les maladies animales peuvent être transmises à l'homme via d'autres vecteurs, en particulier les rongeurs.

Les infections sont très bien suivies en Europe. Par exemple, l'infection au virus West Nil (l'infection du Nil) est surtout présente en Camargue. Elle est portée par un moustique qui va transmettre le West Nil virus aux chevaux, provoquant des anomalies mortelles. Le vecteur peut également être les oiseaux migrateurs. Il y a eu sept cas humains en 2003. L'homme est un hôte purement aléatoire et intermédiaire. Cette maladie, essentiellement liée à la Camargue et au Languedoc-Roussillon, est très surveillée, car le virus se déplace à nouveau légèrement, remontant notamment en Aquitaine.

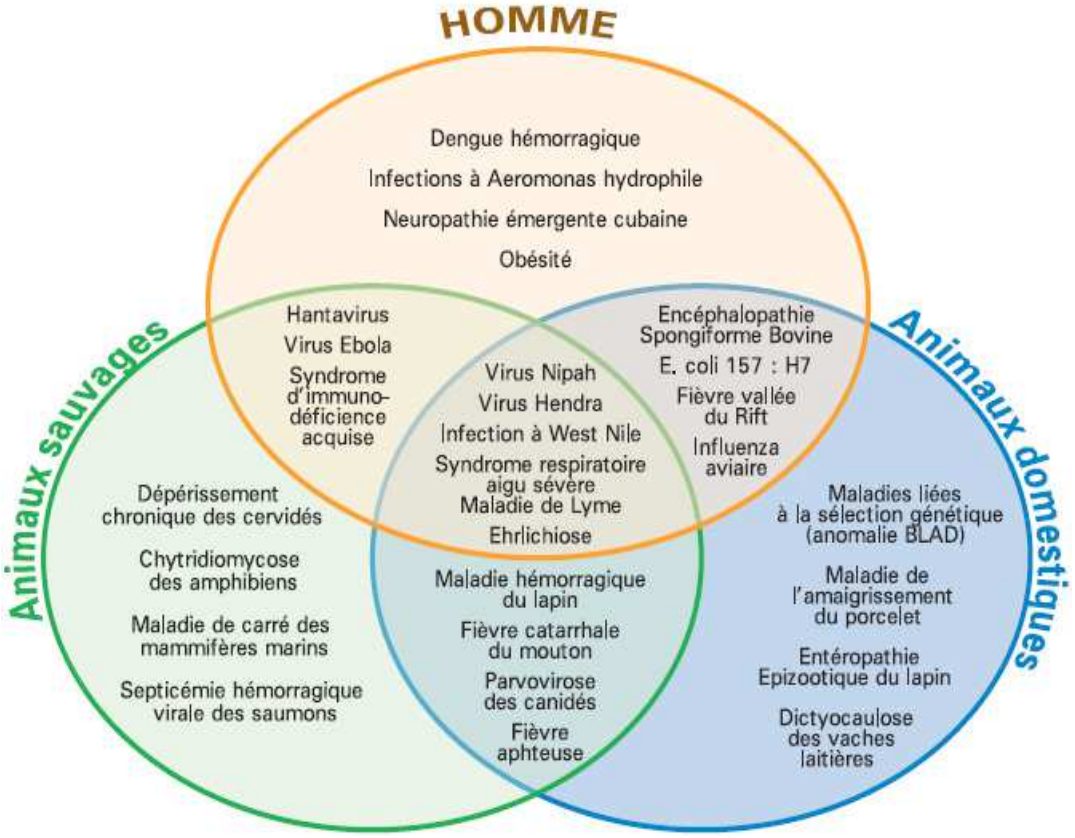



*Figure 2 : Exemples de pathologies émergentes ou ré émergentes chez l'homme et les animaux (sauvages et domestiques). (Source : INRA).*

De même la dengue et le chikungunya véhiculés par le moustique tigre, font l'objet d'un suivi important. Il est fort probable que ces deux pathologies émergent car le moustique va s'adapter au changement climatique. Comme le montre la Figure 3, depuis 2010 environ, le moustique tigre est apparu dans le sud de la France jusque dans le Languedoc-Roussillon où il est maintenant présent. Il existe également des cas de dengue et de chikungunya importés (personnes rentrant de voyages dans les zones touchées telles que les Antilles, la Réunion...).

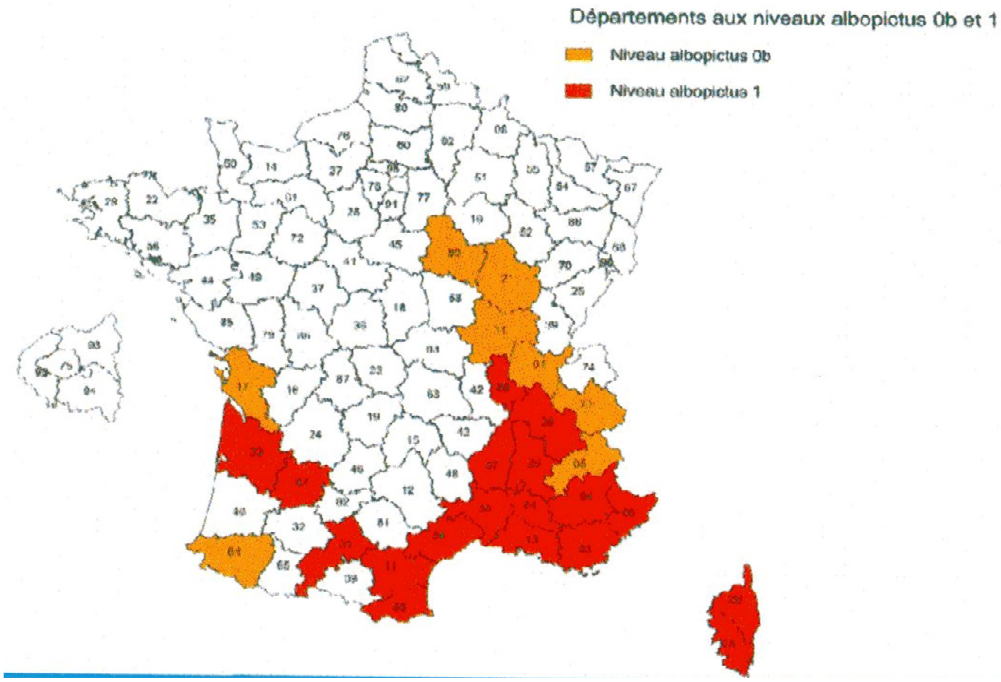



*Figure 3 : Classement des départements au 1er décembre 2013 quant à la présence du moustique tigre, Aedes albopictus (Source : Chanaud, 2013).*

Une large campagne d'information est réalisée dans le sud et fonctionne très bien. Elle insiste sur la suppression des eaux stagnantes qui permet de lutter efficacement contre le moustique.

L'information des populations sur ces risques émergents est effectivement fondamentale. Les efforts doivent également, en amont, concerner la recherche, notamment celle de marqueurs biologiques précoces dans la population face au risque sanitaire et plus particulièrement chez les sujets fragiles. Dans ce contexte, les approches interdisciplinaires, multidisciplinaires, sont fondamentales pour avancer, telle que celle développée dans le programme CLIMIBIO. Les sciences humaines et sociales encore peu présentes ont un rôle fondamental pour étudier toute la vulnérabilité. Il faut avoir des stratégies de recherche et de formation et surtout, optimiser la surveillance. Tous ces réseaux de surveillance existent mais doivent évoluer, en allant peut-être vers des systèmes plus simples, qui communiquent beaucoup plus entre eux.

Le changement climatique aura un impact sur la santé des populations. Outre, une augmentation des pathologies existantes (cardio-vasculaires, pulmonaires, digestives et certains cancers), il modifiera l'élevage, l'agriculture et le mode de vie des populations dans un contexte où les modèles économiques ont tendance à se mondialiser.

Des pathologies infectieuses, actuellement inconnues dans notre région peuvent émerger avec le changement climatique et la migration des vecteurs (moustiques par exemple) dans le Nord-Pas de Calais. Des risques d'épidémies sont possibles en cas de catastrophes naturelles importantes.

L'homme peut être responsable de l'émergence ou la réémergence de nouvelles maladies en particulier infectieuses. Par exemple, les pratiques agronomiques intensives et l'utilisation large de l'antibiothérapie dans les sociétés occidentales et dans le monde animal ont entraîné l'émergence de résistance bactérienne et le transfert de souches plus virulentes de l'animal vers l'humain. La résistance bactérienne est peut-être, demain, un point sur lequel il va falloir se pencher (Joenes et al., 2008). La diminution des variétés de semence provoque un usage beaucoup plus important d'insecticides avec des risques sanitaires encore mal connus. Le changement climatique favorisera le risque infectieux pour l'élevage et l'agriculture et il faudra trouver de nouveaux moyens pour traiter les animaux et les cultures sans risque pour l'homme.

### Références bibliographiques


Black, P, Nunn, M., 2009. *Conséquences du changement climatique et des modifications environnementales sur les maladies animales émergentes ou ré-émergentes et sur la production animale,* Conférence at the World Organisation for Animal Health

GIS Climat-Environnement-Société, 2015. *Conférence internationale « Changement Climatique et Santé*, CNRS Meudon

Haut Conseil de la santé Publique, 2011. *Les Maladies Infectieuses Emergentes : Etat de la situation et Perspectives*, Rapport HCSP, 207p.

Jones, K. E., Patel, N. G., Levy, M. A., Storeygard, A., Balk, D.,Gittleman, J. L., Daszak, P., 2008. Global trends in emerging infectious diseases, *Nature*, 451, p. 990-94.

Levy, S., 2015. Warming Trend. How climate shapes Vibrio ecology. *Environmental Health perspectives*, 123, p. A83-A89.



Photo : Denis Petitprez



Claude Kergomard a été enseignant-chercheur à l'Université des Sciences et Technologies de Lille de 1978 à 2003. Géographe-climatologue, il a consacré initialement sa recherche à l'observation, depuis l'espace, des glaces marines de l'Arctique et à leurs relations avec la variabilité et l'évolution du climat. En 2003, il a été nommé professeur à l'Ecole normale supérieure de Paris, où il a contribué à fonder le Centre d'Enseignement et de Recherches sur l'Environnement et la Société, et dirigé le Département de Géographie jusqu'en 2013. Il s'est consacré alors aux interactions entre les questions de l'environnement global et les sociétés, en privilégiant les approches territoriales. A l'Agence Nationale de la Recherche, il a participé activement aux comités des programmes consacrés aux Changements globaux et à la Ville Durable.

# Impacts du changement climatique sur le milieu urbain et enjeux liés à l'adaptation

Partie coordonnée par Claude Kergomard
Professeur des Universités, enseignant-chercheur à l'Université des Sciences et Technologies de Lille (jusqu'à 2003), puis directeur du Département de Géographie et co-directeur du Centre d'Enseignement et de Recherches sur l'Environnement et la Société (CERES-ERTI) à l'Ecole normale supérieure de Paris (2003-2013)

Les aires urbaines couvrent 58% du territoire et regroupent 88% de la population du Nord-Pas de Calais. Le nombre élevé et la taille limitée des centres urbains historiques, l'héritage minier et industriel, le poids de la périurbanisation confèrent au réseau urbain régional une originalité dans le contexte national. Les politiques de lutte contre le changement climatique, telles qu'elles s'expriment dans les Plans Climat-Energie Territoriaux, font une large place aux enjeux urbains mais restent essentiellement consacrées aux choix énergétiques : un effort de recherche est nécessaire pour permettre de mieux fonder scientifiquement les orientations proposées en matière d'adaptation. Cette session présentera des retours d'expériences et identifiera les axes de recherche les plus pertinents pour répondre aux enjeux régionaux et euro-régionaux.

Cette partie présente les interventions suivantes :

- Enjeux climatiques urbains en Nord - Pas de Calais
  *Claude Kergomard, professeur des Universités*
  Conférence CERCLE du 3 avril 2015

- Végétal et adaptation climatique des villes : les résultats du projet VegDUD
  *Marjorie Musy, Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville, Nantes*
  Conférence CERCLE du 3 avril 2015

- Villes futures et climat urbain : quels leviers pour l'adaptation ? Synthèse du projet ACCLIMAT
  *Thomas Houet, Laboratoire de Géographie de l'Environnement, CNRS - Université de Toulouse Jean Jaurès*
  Conférence CERCLE du 3 avril 2015

# Enjeux de l'adaptation climatique en région urbanisée
# Quelles spécificités pour le Nord-Pas de Calais ?

Claude KERGOMARD

Université des Sciences et Technologies de Lille (jusqu'en 2003)
Ecole normale supérieure de Paris (2003-2013)

Dans le cadre de la démarche CERCLE, il nous est apparu utile d'ouvrir nos réflexions aux questions et enjeux associés à l'adaptation climatique des villes. Dans une région urbanisée comme le Nord-Pas de Calais, le thème semblait s'imposer. Dans les cinq dernières années, de très importants programmes de recherche pluridisciplinaires ont été menés sur ce thème, en particulier à l'initiative de l'Agence Nationale de la Recherche, dans le cadre des appels à projets sur la « Ville Durable ». Il semblait intéressant, au moins à ce stade initial d'une réflexion sur la question urbaine, de faire appel à des expériences menées ailleurs que dans la région Nord - Pas de Calais, à la différence des autres thèmes qui sont essentiellement représentés par des équipes régionales et des travaux portant sur la région.

Cette présentation a pour objet d'introduire le thème général des enjeux de l'adaptation climatique en région urbanisée et de poser quelques jalons sur la façon dont la question se pose pour le Nord - Pas de Calais, avant que les deux collègues qui suivront, Marjorie Musy et Thomas Houet, ne présentent les expériences et les résultats d'équipes pluridisciplinaires et dispersées géographiquement, qui ont travaillé sur des aspects de l'adaptation urbaine sur des terrains qui ne sont pas régionaux (Nantes, Paris, Toulouse).

## Un thème apparu récemment

En premier lieu, il faut évoquer un constat qui peut paraître étonnant. Le diagnostic du changement climatique et la question des impacts étaient avancés dès les années 90 ; et pourtant, il a fallu attendre la fin des années 2000 pour que la question des villes soit véritablement posée. Dans le volume 2 du rapport du GIEC de 2007, par exemple, qui est consacré aux impacts, aux vulnérabilités et à l'adaptation, il n'est pas question de la ville, on ne trouve pas un mot sur les questions urbaines. Cette absence interroge…

Comment l'expliquer ? On pourrait dire que cela tient avant tout à quelques faits qui influent sur la démarche du GIEC. D'un point de vue strictement physique, les villes ne représentent qu'1 à 2 % de la surface de la planète. Elles n'ont donc qu'un rôle relativement limité, voire sont quasi-absentes, dans les modèles de climat. Ensuite, du point de vue purement technique de la modélisation, la capacité des modèles climatiques à aborder les questions à l'échelle de la ville est extrêmement réduite, ou en tout cas l'était jusqu'il y a peu. On commence seulement, à voir apparaître les outils qui permettent d'introduire l'énergétique de la ville dans les modèles de climat. Les questions posées par le climat urbain proprement dit, c'est-à-dire les modifications du climat qu'introduit la ville, ce que l'on appelle l'îlot de

chaleur urbain ou le dégagement de chaleur anthropique direct dans les villes, ne contribuent que pour une part minime à la hausse de la température, comparé aux problèmes liés à l'effet de serre. *A priori*, une vision physique de la question du changement climatique laisse donc de côté la question urbaine.

A l'inverse, il faut rappeler que les villes regroupent plus de 50 % de la population mondiale, le seuil des 50 % a été franchi en 2007. Elles sont responsables de plus de 80 % de la consommation de carburants fossiles, leur part est un peu moindre si l'on considère les émissions totales de gaz à effet de serre. Elles représentent une concentration d'enjeux considérables face aux risques climatiques à cause de la concentration des populations, de la mortalité en cas de catastrophe climatique, de la santé des populations urbaines, de la concentration d'enjeux économiques et financiers, de la vulnérabilité des réseaux, en particulier dans les très grandes villes *(les mégacities)* qui deviennent des métropoles à l'échelle mondiale, et enfin des enjeux sociaux et culturels que pose la vulnérabilité urbaine.

La prise de conscience de ces enjeux a fait apparaître récemment des travaux largement diffusés sur ces questions. L'ouvrage *Climate Change and Cities,* paru en 2009 sous forme informatique et sous forme papier en 2011, à l'initiative du *Urban Climate Change Research Network*, pose la question essentiellement en termes d'évaluation de la vulnérabilité. L'évaluation *(assessment)* de la vulnérabilité vient en complément de la démarche *top-down* (du global vers le local) qu'impose la modélisation du climat et des impacts. L'important est que cette autre démarche qui part des caractéristiques des villes et des territoires puisse, à un moment donné, rencontrer et compléter les résultats des modèles.

Il paraît inutile d'insister trop longuement sur le fait que quelques situations de catastrophe fortement médiatisées ont largement contribué à poser la question de la vulnérabilité urbaine et à en révéler la nature complexe. En France, la canicule de 2003, dont les effets ont été largement amplifiés en milieu urbain, en particulier à Paris, a joué ce rôle. A la Nouvelle Orléans, l'ouragan Katrina a révélé la vulnérabilité d'une ville tout à fait spécifique, où les défauts de gouvernance et les questions sociales et ethniques se sont combinés avec le risque physique d'inondation. De même à New York, l'ouragan Sandy a révélé le caractère systémique du risque climatique dans une métropole, une *Global City* qui concentre des fonctions économiques, financières et culturelles en même temps qu'une population très dense en zone inondable. Tous ces événements montrent, quand on les analyse de façon détaillée, combien la notion de vulnérabilité urbaine face au climat n'est pas une notion simple. Bien sûr, les villes sont plus ou moins exposées aux accidents climatiques ; à la différence de la Nouvelle-Orléans ou même de New-York située sur un littoral bas, le risque n'était pas forcément évident pour les villes de la France du nord et du bassin parisien comme Paris. Pourtant l'exemple de la canicule à Paris a révélé les failles du système sanitaire français mais aussi les fragilités d'une société vieillissante qui ne réagit pas toujours très facilement à des questions de solidarité face aux classes d'âge, etc.

### Adaptation et vulnérabilité

Revenons rapidement sur les conséquences de ce que révèlent ces exemples. Adaptation, vulnérabilité, de quoi parle-t-on au juste ? La notion de vulnérabilité impose une nécessaire combinaison entre les apports des sciences du climat et des sciences de l'homme et de la société, combinaison qui nécessite une réflexion pluridisciplinaire. Le graphique (Figure 1) insiste sur l'idée que l'adaptation est un processus temporel qui se déroule à l'échelle du temps long, qui est aussi l'échelle du renouvellement, de la transformation de la ville.

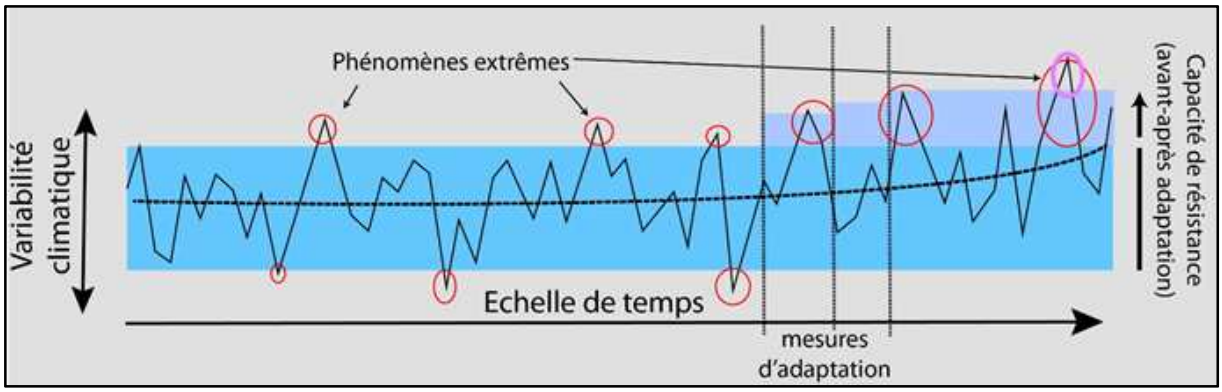



*Figure 1 : L'adaptation face au changement climatique, un processus inscrit dans le temps (d'après Flüssel & Klein, 2002)*

L'échelle du siècle, en tout cas de quelques décennies, est l'échelle qu'il faut prendre en compte pour modifier une ville de façon significative. Il y a donc convergence entre l'échelle de temps du changement climatique, qui se fera sentir progressivement sur un siècle, et celle des évolutions urbaines. Cela impose une dimension prospective à l'échéance 2100, que la physique du climat maîtrise aujourd'hui en combinant les scénarios ou trajectoires d'émissions et les modèles. La prospective est beaucoup plus difficile quand on parle de la ville : il faut envisager conjointement l'évolution démographique, la conjoncture économique, les politiques urbaines et les évolutions sociologiques. Mais le temps long de la prospective ne signifie pas pour autant que les mesures peuvent attendre : de même que les mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre prises dans les deux décennies à venir conditionneront largement le climat de la fin du XXI$^{ème}$ siècle, l'urbanisme des deux décennies à venir doit dessiner ce que devrait être une ville à la fois sobre en carbone et adaptée aux risques climatiques de la fin du siècle.

La vulnérabilité face au changement climatique est une notion complexe. C'est la combinaison de l'exposition aux phénomènes climatiques qui caractérisent le territoire et qui s'analysent essentiellement à partir des modèles climatiques, d'une sensibilité au changement climatique et, d'une capacité d'adaptation qu'il faut s'attacher à augmenter (Figure 2). C'est finalement l'objet de la démarche CERCLE que d'augmenter la capacité d'adaptation de la région face au changement climatique pour réduire sa vulnérabilité.

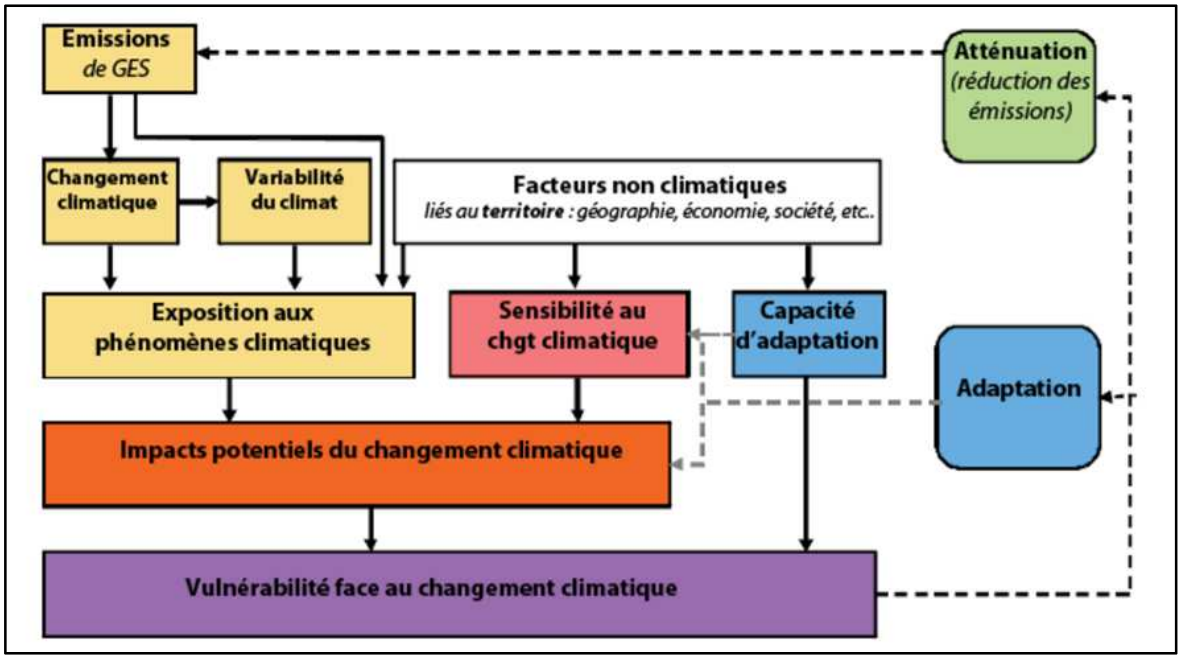



*Figure 2 : La vulnérabilité face au changement climatique, une notion « hybride » (d'après Flüssel & Klein, 2002).*

### Consommation des énergies fossiles, réduction des émissions et adaptation

La Figure 2 rappelle également qu'il existe deux modes d'action face au changement climatique : d'une part l'atténuation (réduction des émissions) qui se donne pour objectif de limiter à 2 degrés l'augmentation de la température moyenne de la planète et donc de limiter l'exposition aux phénomènes climatiques auxquels nous serons soumis ; d'autre part, l'adaptation qui vise à réduire la vulnérabilité, en particulier en travaillant sur la sensibilité et la capacité d'adaptation. En France, les politiques territoriales et urbaines ont clairement mis l'accent sur la réduction des émissions, la *mitigation* selon le vocabulaire employé dans les rapports du GIEC et le débat s'est très vite porté sur la densité urbaine et la péri-urbanisation. Dès la fin des années 80, l'idée est apparue, suite aux travaux de Newman et Kenworthy, que la densité urbaine est un outil essentiel pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Newman et Kenworthy avaient en effet diffusé à l'échelle mondiale des travaux sur la comparaison entre la densité et la consommation de carburants fossiles des villes (Figure 3).

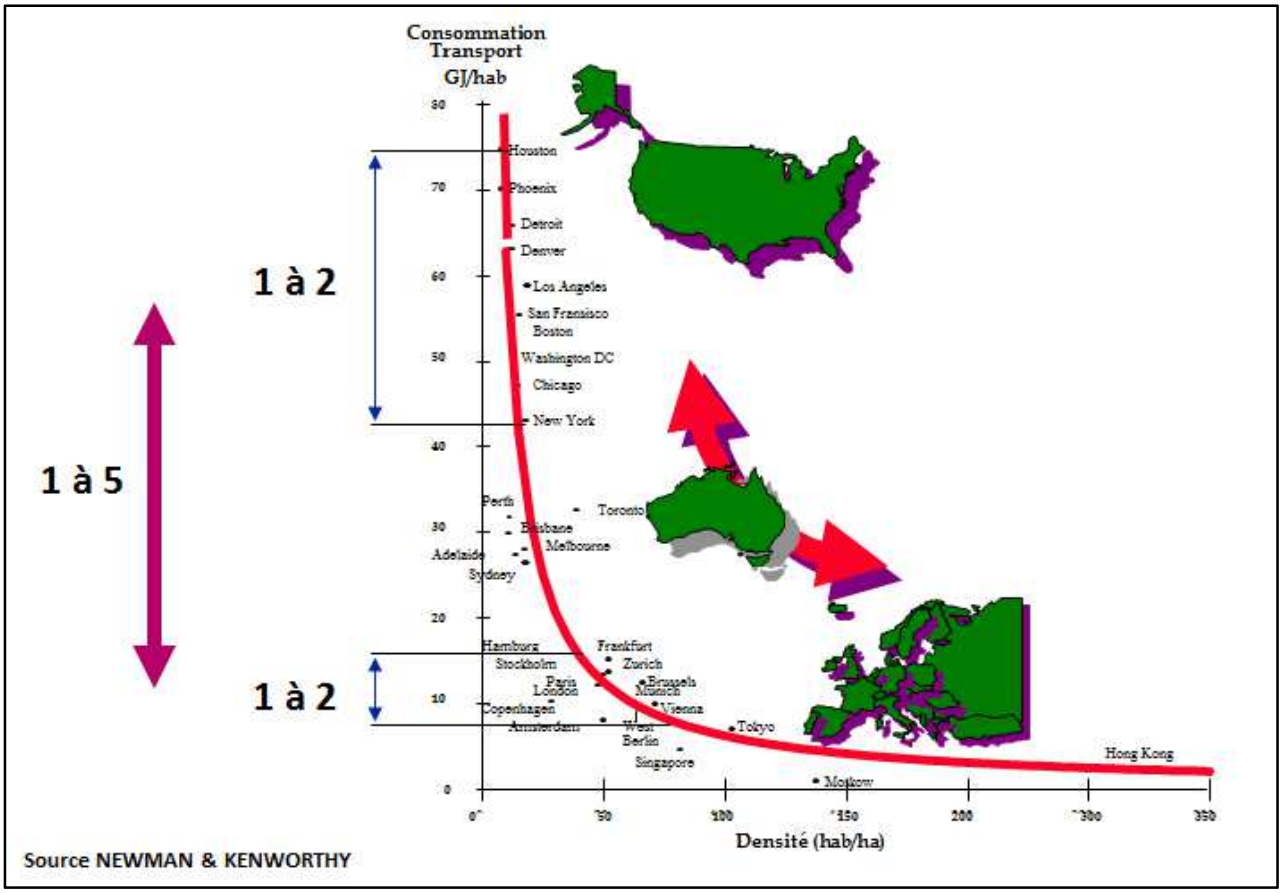



*Figure 3 : Densités urbaines et consommation d'énergies fossiles dans les villes américaines, australiennes, européennes et asiatiques (données de Kenworthy et Newman, 1989).*

L'étalement urbain et la péri-urbanisation qui induisent une consommation obligatoire d'énergies fossiles, sont devenus les ennemis désignés de la lutte contre le changement climatique dans toutes les études urbaines depuis les années 90. En France, c'est apparu à travers des réflexions sur la périurbanisation. En témoigne par exemple le travail de collègues de Besançon qui ont proposé une modélisation des consommations énergétiques obligatoires selon le lieu d'habitation (Figure 4).

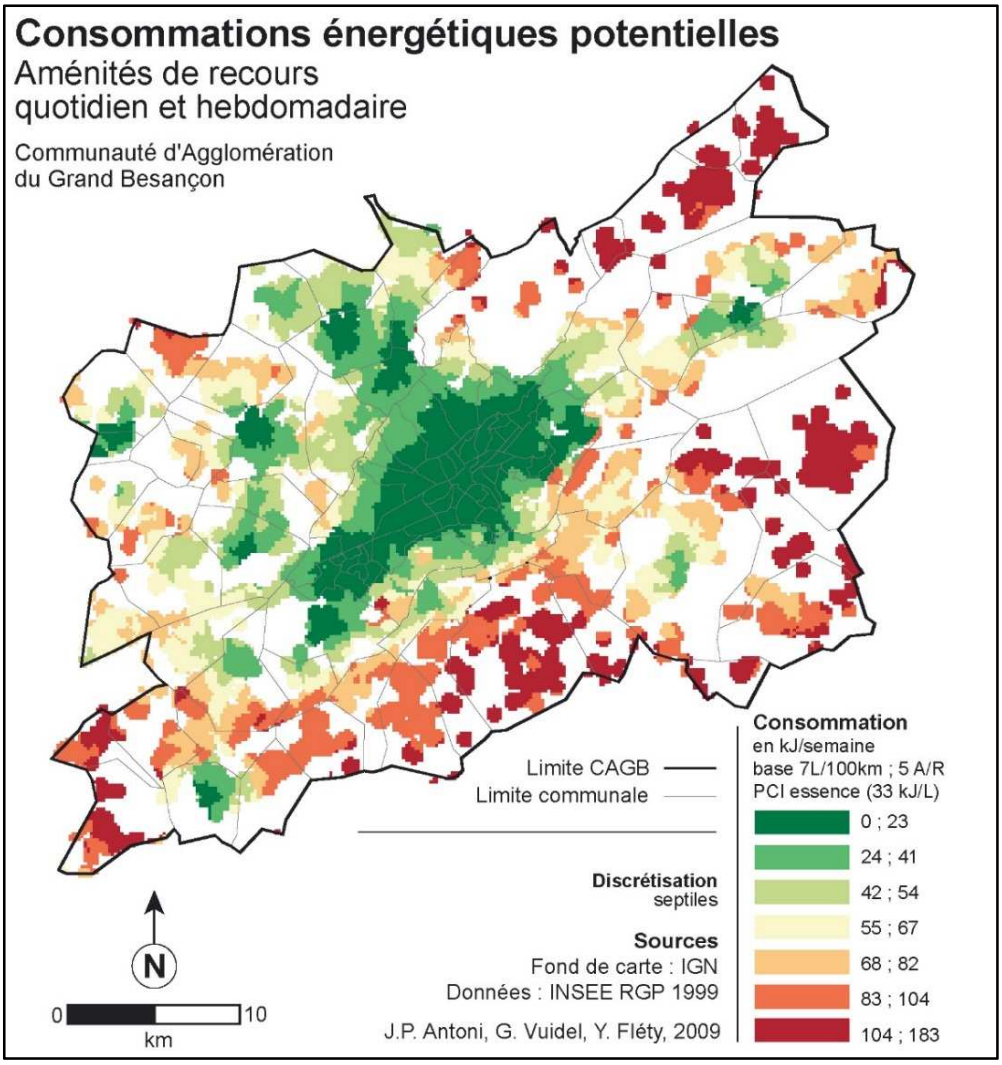



*Figure 4 : Simulation des consommations d'énergie selon le lieu d'habitation dans le Grand Besançon (Antoni, J.P., G. Vuidel et Y. Flety, 2009).*

Mais l'accent mis ainsi sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre par la densité urbaine privilégie l'atténuation sur l'adaptation, même si les deux aspects sont difficilement séparables, comme en témoignent les travaux de Marjorie Musy et Thomas Houet présentés dans ce recueil.

En France, les démarches territoriales sur les questions de climat, de qualité de l'air et d'énergie dans le cadre de ce que l'on appelle les « Plans Climat Energie Territoriaux» puis, après association de la qualité de l'air, les « Plans Climat Air Energie Territoriaux» et, à une échelle différente les « Schémas Régionaux Climat Air et Energie », privilégient la régulation des émissions urbaines liées au transport automobile. Cela induit un lien prioritaire des politiques climatiques avec les PDU (plans de déplacements urbains), les PLU (plans locaux d'urbanisme) et autres SCOT (schémas de cohérence territoriale). Cette priorité accordée à la maîtrise de l'étalement urbain et aux dépenses énergétiques liées aux mobilités urbaines est légitime, mais quelle est la place faite à l'adaptation au sens strict ? Il semble qu'il y ait un consensus au-delà des experts pour admettre que l'on ne se limitera pas à une hausse de 2 degrés, qu'il faudra donc vivre avec le dérèglement climatique : quelle place fait-on à la vulnérabilité des villes et, surtout, quelle dimension prospective ?

Les plans climat énergie territoriaux approuvés – qui ont été faits il y a quelques années-, n'envisagent souvent timidement que l'horizon 2020-2025 ; il semble que l'on soit incapable d'avoir aujourd'hui une prospective à plus long terme en matière de ville. Les politiques urbaines d'aujourd'hui sont orientées vers la réduction des consommations énergétiques du bâtiment, la définition d'un bâtiment ou habitat si possible concentré dans le cadre de ce que l'on appelle les « écoquartiers », d'un habitat à faible consommation voire de bâtiments passifs du point de vue énergétique, la promotion des modes de déplacement « doux », etc. Concernant la question de l'adaptation, du confort urbain dans le cadre d'un climat qui change, on se borne souvent à des « choix sans regret », qui consistent à réintroduire la végétation, l'eau si possible, la nature en ville. Ce sont des choix sans regret parce qu'ils suscitent peu d'opposition ou de contestation, mais, en même temps, sont peu fondés scientifiquement. Par exemple, le verdissement des villes fait partie des impératifs catégoriques de l'urbanisme actuel sans que l'on puisse en évaluer l'effet réel. La ville sans carbone telle que la préparent les politiques actuelles sera-t-elle nécessairement une ville saine et adaptée au climat attendu pour 2100 ?

### La région Nord-Pas de Calais, quelles spécificités ?

Dans le pays encore très centralisé qu'est la France, les politiques en matière d'atténuation et d'adaptation au changement climatique sont remarquablement homogènes, même si leurs déclinaisons régionales et locales conduisent à privilégier tel ou tel aspect en fonction des spécificités du territoire. Quelle originalité ou spécificité du réseau urbain du Nord-Pas de Calais ? Dans l'évaluation de la vulnérabilité climatique des territoires européens proposée par le programme ESPON-Climate, la France apparaît comme un domaine homogène, ce qui paraît justifier l'homogénéité des politiques d'adaptation et de réduction des vulnérabilités. Mais il faut aussi tenir compte de la particularité d'un réseau urbain marqué par la forte densité de population, qui tend à effacer l'opposition ville-campagne, si prégnante partout ailleurs en France. Cela apparaît très clairement sur la carte (Figure 5) du dégagement de chaleur anthropique en Europe : on y observe que le Nord - Pas de Calais appartient à un monde de nébuleuses urbaines qui couvre une grande partie du nord de l'Europe, et diffère du modèle de l'agglomération urbaine isolée dans un milieu rural qui caractérise le reste de la France. La région est aujourd'hui en passe de devenir une région presque totalement périurbanisée avec une série de noyaux urbains de taille moyenne de 45 000 à 50 000 habitants, noyée dans une nébuleuse urbaine qui représente d'une part l'héritage des habitats ouvrier et minier fortement étalés, d'autre part le phénomène de périurbanisation induit par le choix préférentiel de la maison individuelle.

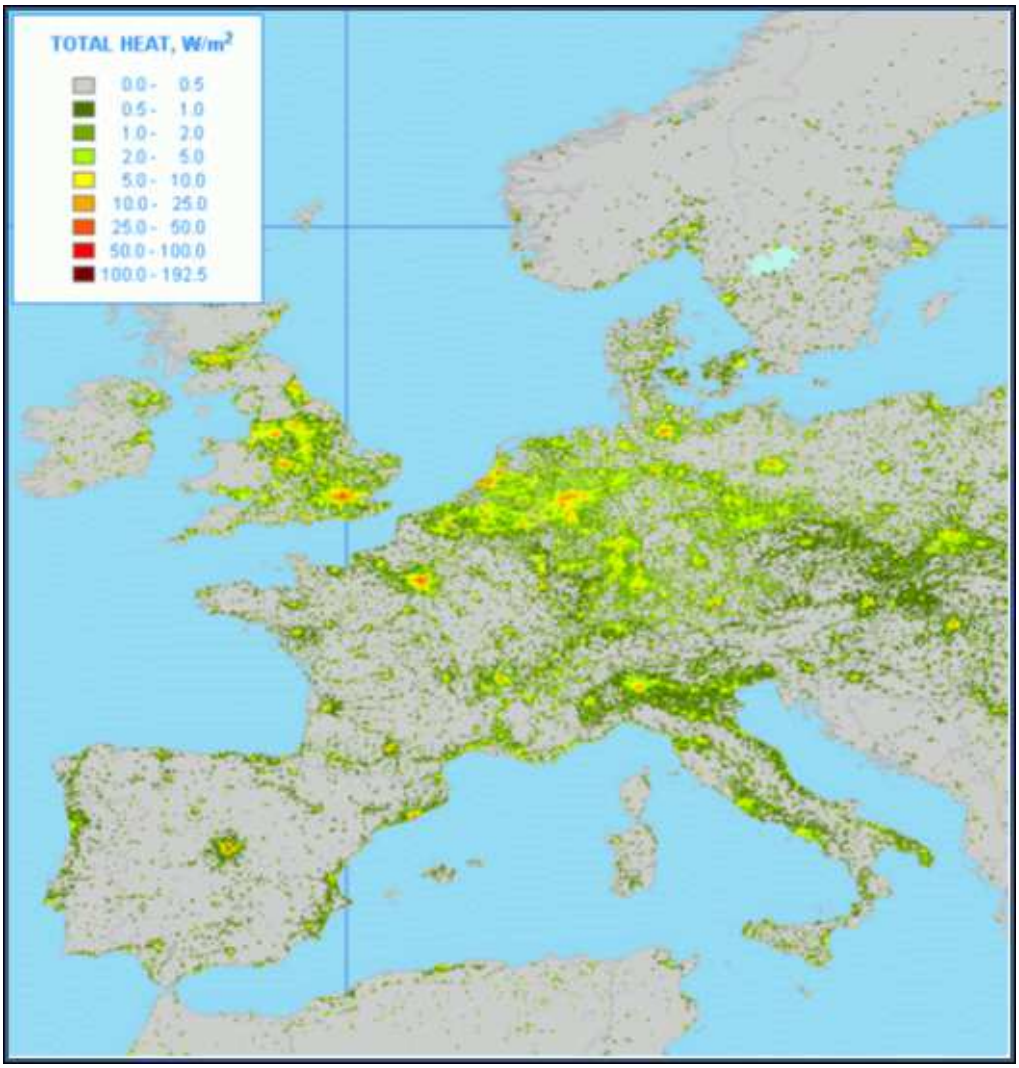



*Figure 5 : Dégagement de chaleur anthropique (en W.m-2) sur l'Europe. On note la continuité entre la région NPdC et les espaces de forte densité du nord de l'Europe.*
*Source : Chirkov, 2003. http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/TNT/WEB/heat/gif/tot-eu.gif*

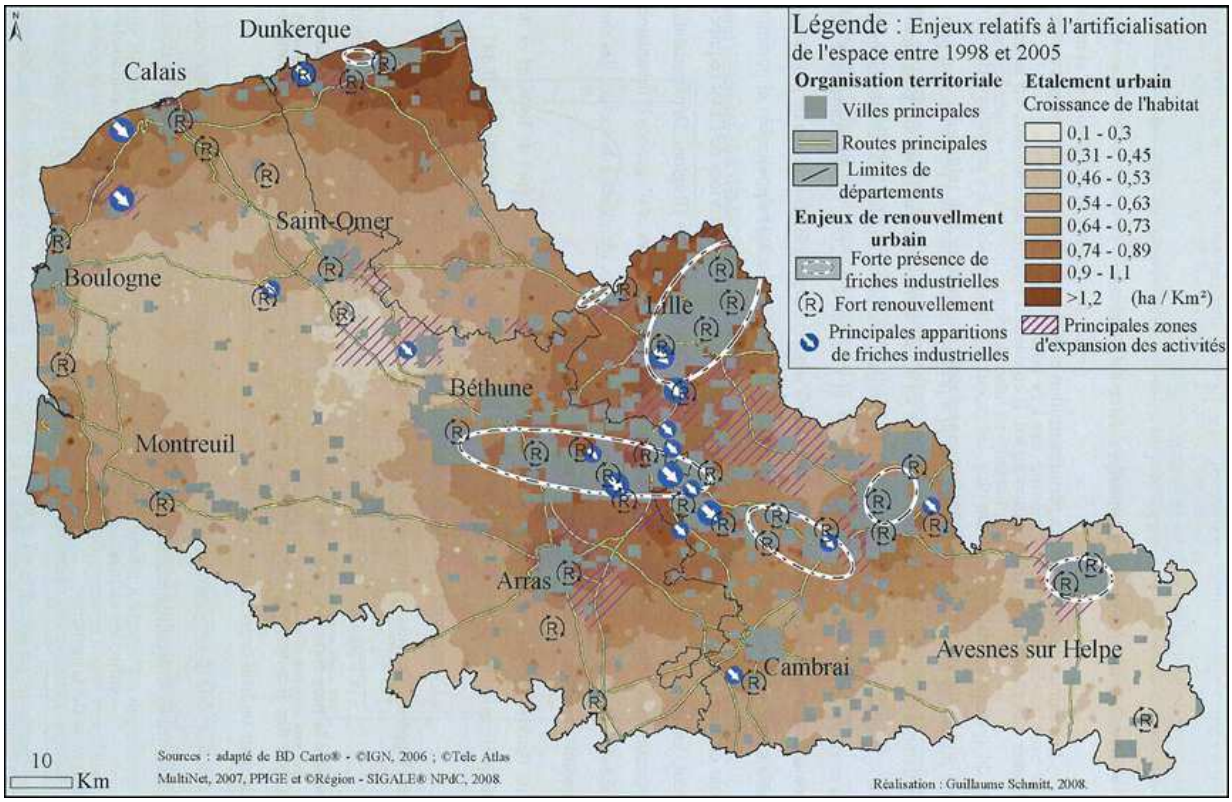



*Figure 6 : Enjeux urbains à relier à l'adaptation au changement climatique en région Nord-Pas de Calais. Source : G. Schmitt, Thèse U. Lille 1, 2009.*

Tout en prenant en compte les acquis scientifiques obtenus par des programmes menés dans d'autres régions françaises, il faudra intégrer les politiques d'adaptation de la ville dans le contexte spécifique de la région (Figure 6), celui de la périurbanisation quasi généralisée, mais aussi celui du renouvellement urbain hérité de l'ère minière et industrielle, de l'usage des friches industrielles, des trames verte et bleue, etc. et tenir compte aussi des vulnérabilités induites par le contexte social et culturel.

Quelles sont donc, en conclusion, les directions d'une recherche sur l'adaptation des villes du Nord - Pas de Calais au climat de la fin du XXI$^{ème}$ siècle ? Trois ensembles de tâches semblent s'imposer :

- définir la nature et évaluer l'importance des impacts spécifiques. Les impacts du changement climatique en Nord - Pas de Calais ne sont pas forcément les mêmes que dans d'autres régions. Le risque de canicule, de température extrême n'est pas encore, au moins à un horizon prévisible, le plus important. En revanche, il existe d'autres questions, l'évolution de la qualité de l'air, le risque d'inondations (inondations urbaines en particulier), la conjonction entre risques climatiques et risques industriels, qui peuvent apparaître prioritaires.
- fonder scientifiquement les choix urbanistiques et les politiques urbaines proposées aujourd'hui comme « allant de soi », à l'instar de ce qui est fait à propos de la végétation urbaine dans le cadre du projet VegDUD qui est présenté par Marjorie Musy.

- fournir les bases d'une prospective urbaine argumentée tenant compte des enjeux urbains spécifiques de la région, et à une échéance compatible avec ce que l'on sait du climat aujourd'hui. L'exemple des travaux menés sur les agglomérations parisienne et toulousaine, qui sont présentés par Thomas Houet, montre qu'il est possible de dépasser l'horizon temporel ordinairement limité des documents d'urbanisme et d'aménagement.

### Références bibliographiques


Antoni, J.P., Fléty, Y. Vuidel, G., 2009 : *MobiSim, vers des indicateurs locaux de performance énergétique, les Etiquettes Energétiques Territoriales,* Rapport de recherche, ADEME et CNRS ThéMA, Université de Besançon, 47 p.

ESPON Climate, 2012 : *Climate Change and Territorial Effects on Regions and Local Economies in Europe*, http://www.espon.eu/main/Menu_Projects/Menu_AppliedResearch/climate.html

Füssel, H.-M., Klein, R.J.T., 2006. Climate Change Vulnerability Assessments: an Evolution of Conceptual Thinking. *Climatic Change,* 75(3), p. 301-329.

Newman, P., Kenworthy, J., 1989. *Cities and Automobile Dependence: a sourcebook*, Gower, Adelshot and Brookfields, Victoria, 388 p.

Kergomard, C., 2015. *Résilience et changement climatique global: l'exemple des villes, in Reghezza M. et Rufat S. (dir), Résilience, sociétés et territoires face à l'incertitude, aux risques et aux catastrophes,* ISTE éditions, p. 123-140. http://iste-editions.fr/products/resiliences

Rosenzweig, C., Solecki, W.D., Hammer, S.A., Mehrotra, S. (eds.), 2001. *Climate change and cities*, First assessment report of the urban Climate Change Research Network, Cambridge University Press, 286 p. http://uccrn.org/resources/publications/arc3/

Schmitt G., 2009. *Valeurs et usages de l'espace : approches méthodologiques des dynamiques foncières dans le Nord-Pas de Calais*, Thèse ED SESAM, Université de Lille 1, 491 p.

# Végétal et adaptation climatique des villes
# Les résultats du projet VegDUD

Marjorie MUSY

Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville, Nantes

Cette présentation est fondée sur les résultats d'un projet financé par l'Agence nationale de la recherche (ANR) qui s'appelle VegDUD (rôle du Végétal dans le Développement Urbain Durable). Le projet a duré quatre ans et s'est terminé en 2014. L'objectif était d'évaluer le rôle du végétal dans le développement urbain durable, et de définir des stratégies de végétalisation. Le projet a regroupé dix partenaires académiques, des équipes sous-traitantes et des partenaires non académiques comme la Ville de Nantes et Nantes Métropole, qui ont été des supports extrêmement importants dans ce travail de recherche. Le partenariat « recherche et collectivité » apporte beaucoup dans ce type de projet. Ce projet d'envergure a mobilisé plusieurs équipes de recherche, et grâce aux apports des collectivités, de l'ANR et de l'Ademe, il a bénéficié d'un financement total de plus de 5 M€.

## Végétalisation de la ville, atténuation et adaptation climatique

L'entrée de ce projet était vraiment la question de la stratégie de végétalisation de la ville. La question de la densification des villes pose celle de la place de la végétation dans les villes, qui est le plus souvent en compétition avec les infrastructures et le bâti. Mais on voit apparaître également de nouvelles formes de végétalisation desquelles on attend beaucoup, les façades et toitures végétales. Á l'origine les éléments de réponse manquaient sur leur rôle réel dans les questions climatiques mais également énergétiques et d'usage de la ville.

Nous voulions aborder conjointement les questions d'adaptation et d'atténuation climatique, les questions d'énergie, d'impact sur les émissions de gaz à effet de serre et les questions d'adaptation climatique de la ville. Sinon, on peut arriver à des solutions qui peuvent être favorables en termes d'adaptation au changement climatique, mais contre-performantes en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre, à l'image de la climatisation. Ainsi, une végétation qui demande beaucoup d'engrais ou beaucoup d'entretien pourrait être favorable en termes d'atténuation, mais présenter un bilan carbone défavorable.

Le projet VegDUD n'a pas porté sur le rôle du végétal dans le développement durable, dans toute sa diversité. Il s'est limité aux questions d'énergie, de climat, d'ambiances au sens large, incluant la perception et le confort thermiques et acoustiques, aux questions d'usages et aux rapports avec l'hydrologie et n'a pas abordé, par exemple, les questions de pollution, de santé, d'économie. Ses résultats concernent les thématiques de l'adaptation et de l'atténuation qui portent essentiellement sur des questions d'énergie et de climat.

## Typologie du végétal en ville

Le végétal en ville couvre une grande variété de formes. Dans un premier temps, une typologie était nécessaire, en raison de la diversité des dispositifs de végétalisation que l'on voit apparaître actuellement dans l'urbanisme sur lesquels les gestionnaires d'espaces verts se posent beaucoup de questions, sur lesquels naissent des controverses. Des enquêtes ont permis de dégager les points de vue sur ces dispositifs et leur rôle dans l'évolution de la ville : les questions sur les façades et les toitures végétales ressortaient particulièrement. En effet, quelques villes veulent maintenant imposer 100 % de toitures végétales. On peut légitimement se demander si l'on va vraiment pouvoir remplacer le sol naturel par des toitures végétales, avec le même effet. Toutes les questions d'aménagement, de gestion des eaux pluviales utilisant le végétal, celles des noues en particulier font également l'objet de beaucoup d'interrogations dans les nouveaux aménagements.

Se posait également la question des surfaces enherbées sur des surfaces imperméabilisées, dont les effets doivent être comparés aux surfaces minérales autant qu'aux surfaces de pleine terre. Végétal, oui, mais avec quelle quantité de terre ? Ce sont des enjeux urbains très forts, puisque cela concerne les PLU (plans locaux d'urbanisme) : quel coefficient de pleine terre va-t-on garder ? Si l'on construit beaucoup de parkings souterrains avec des sols reconstitués dessus, quelle est l'épaisseur de sol nécessaire pour conserver les avantages de la pleine terre ? Sur les lignes de tram, les dalles engazonnées ont-elles le même rôle qu'une végétation en pleine terre ? Enfin, évidemment, nous ne pouvions pas négliger le rôle spécifique des arbres.

## Méthodologie : les outils de connaissance et d'inventaire du végétal en ville

Quand on veut travailler aux différentes échelles de la ville (la rue, le quartier, l'agglomération entière), la première grande difficulté réside dans la connaissance du végétal en ville. Pour pouvoir utiliser des modèles, analyser les mesures, il fallait au préalable disposer d'inventaires quantitatifs de la végétation présente en ville. Nous avons mis en place des méthodes d'acquisition à grande échelle et de gestion de l'information spatialisée. Pour élaborer ensuite des scénarios prospectifs, nous avions besoin de mettre en place des modèles d'évolution de la ville liant forme urbaine et présence du végétal.

Pour l'acquisition des données, nous avons mis en œuvre différentes méthodes : les plus simples partent des images de satellites. Ce sont des images prises verticalement, qui représentent la végétation en plan. Pour certains modèles, un pourcentage de surface végétale dans la ville, par quartier, par maille du modèle peut suffire ; pour d'autres, cela ne suffit pas car nous avons besoin d'une vision 3D, de discriminer les arbres ou la pelouse. Nous sommes allés plus loin dans l'acquisition de données avec des caméras hyperspectrales et des méthodes de traitement qui nous permettent de distinguer des catégories : arbres, pelouse, feuillus, conifères, avec une définition assez précise puisque les pixels sont de l'ordre de 40 ou 60 cm (Figure 1).

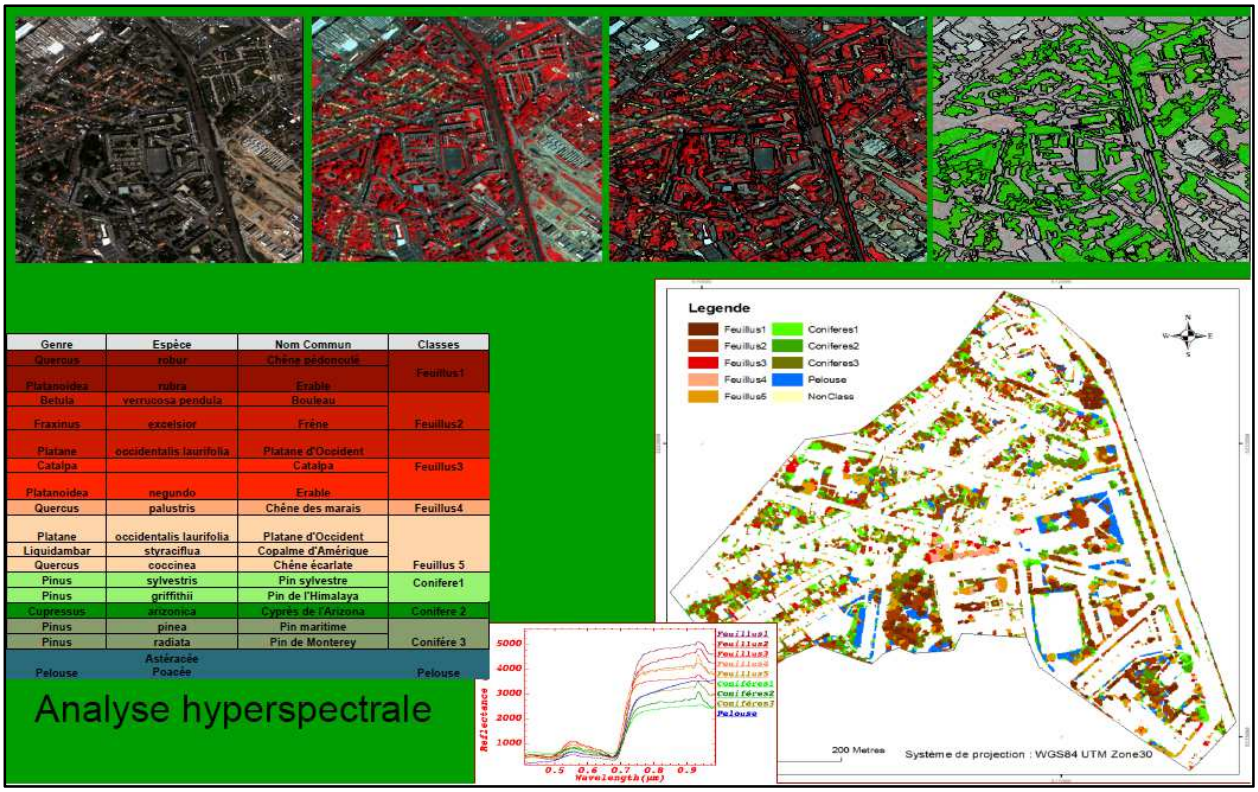



*Figure 1 : Acquisition de données sur la végétation en ville (données hyperspectrales Quickbird 2009). Sources : Nathalie Long et P. Launeau. VegDUD*

Nous obtenons donc un inventaire précis et automatisé. Les données de celui-ci sont introduites dans des SIG afin de croiser l'ensemble des données, d'intégrer les mesures in situ et de générer des simulations, à partir des données initiales et de contraintes d'évolution. Nous avons produit plusieurs scénarios des villes plus ou moins denses en fonction des scénarios assez classiques de laisser-faire ou, au contraire, de contraintes fortes sur la densification et/ou la végétalisation de la ville.

Les mesures et modèles de micro-climatologie ont toujours été associés à l'hydrologie, à la question de l'eau et du cycle de l'eau dans la ville. Un observatoire de long terme de l'environnement urbain a été mis en place et instrumenté à Nantes. Les mesures d'hydrologie sont complétées par des mesures de climatologie et le seront bientôt par des mesures d'acoustique et d'énergie. Les sites sont tous instrumentés de façon similaire, de manière à pouvoir regrouper les données et croiser les informations.

Lors de deux campagnes à grande échelle, de nombreux chercheurs sont venus à Nantes mettre à disposition leur matériel et leur connaissance. Un certain nombre de modèles réduits ont également été mis en place, notamment pour les dispositifs toitures et façades, et pour les travaux de modélisation et simulation. Pour l'expérimentation de long terme, des instruments ont été mis dans les sols pour mesurer la température et la teneur en eau. Ce sont des noues instrumentées, des réseaux d'eau, des mâts et de la météorologie au-dessus des bâtiments. Nous avons même eu, pendant les campagnes intensives, des caméras infrarouges postées sur des bâtiments. Nous avons ainsi mis en place un réseau permanent de mesure de température et d'humidité (Figure 2).

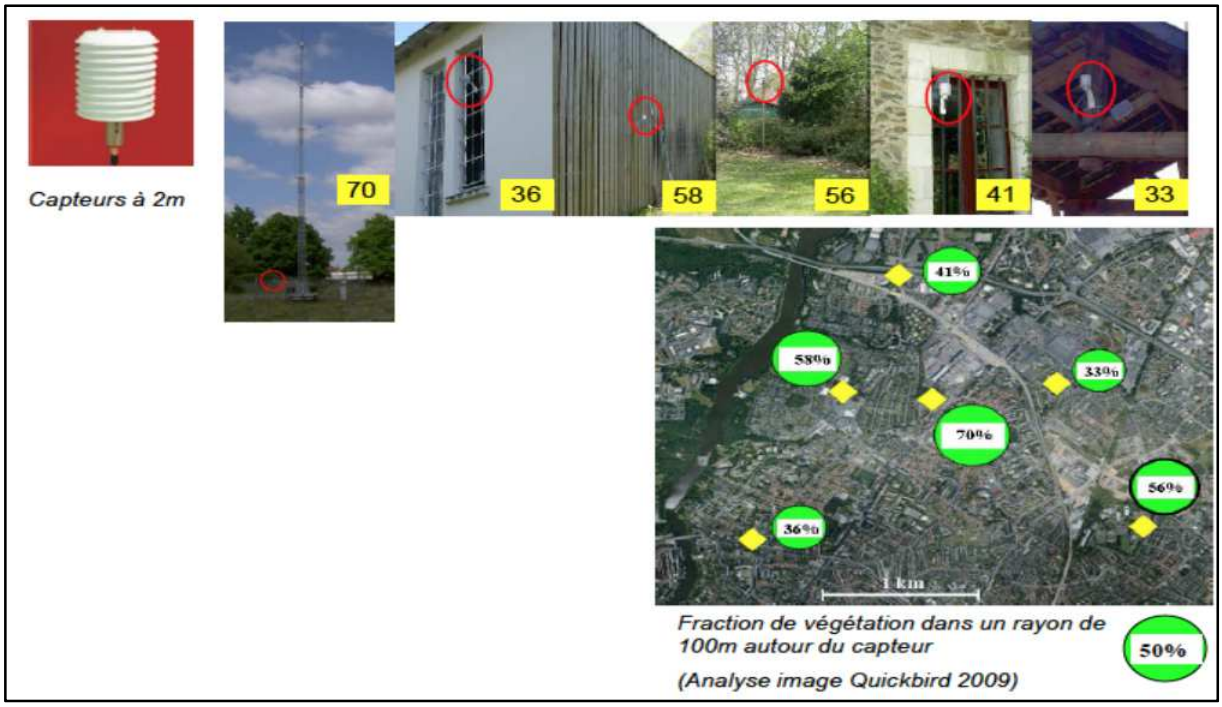



*Figure 2 : Réseau de mesure de température et d'humidité à Nantes.*
*Source : Jean-Michel. Rosant et Karina Furusho, VegDUD*

Une trentaine de sites sont équipés. Des points de mesure ont été établis également à la Roche-sur-Yon et à Angers pour disposer de comparaison avec des villes plus petites. Autour de ces capteurs, une analyse locale permet d'évaluer le taux de végétalisation autour des capteurs et nous avons croisé les différences de température ou d'humidité que nous avons entre ces capteurs et une station météo de référence rurale (nous n'avons pas utilisé la station Météo France, car elle est trop proche de la ville et trop minérale).

On obtient ainsi une cartographie des îlots de chaleur mesurés à Nantes en 2011 et 2012. En moyenne, surtout l'été, on observe une forte corrélation entre taux de végétation et importance de l'îlot de chaleur ; notons que les îlots de chaleur ne sont jamais très marqués à Nantes, qui reste une ville assez verte et peu dense. On observe cependant des profils différents, clairement liés à la forme du quartier : de petits îlots fermés avec beaucoup de végétation qui retiennent la fraîcheur en journée mais refroidissent moins vite la nuit, des quartiers peu végétalisés qui refroidissent plus vite la nuit mais qui chauffent plus le jour.

### Résultats : énergie et chaleur en ville

Parmi les résultats, voici des mesures des flux d'énergie obtenus sur des mâts : flux de chaleur sensible, qui représente la cession directe de chaleur solaire de la surface à l'air, et flux de chaleur latente, qui mesure l'énergie consommée par l'évaporation et la transpiration des végétaux (Figure 3). Selon le taux de végétalisation, les deux flux varient d'une manière inverse. Dans les quartiers plus végétalisés, qui apparaissent en vert, les flux de chaleur latente sont plus élevés et les flux de chaleur sensible moins importants. Ces quartiers se réchauffent moins au cours de la journée, les surfaces moins chaudes réchauffent moins l'air.

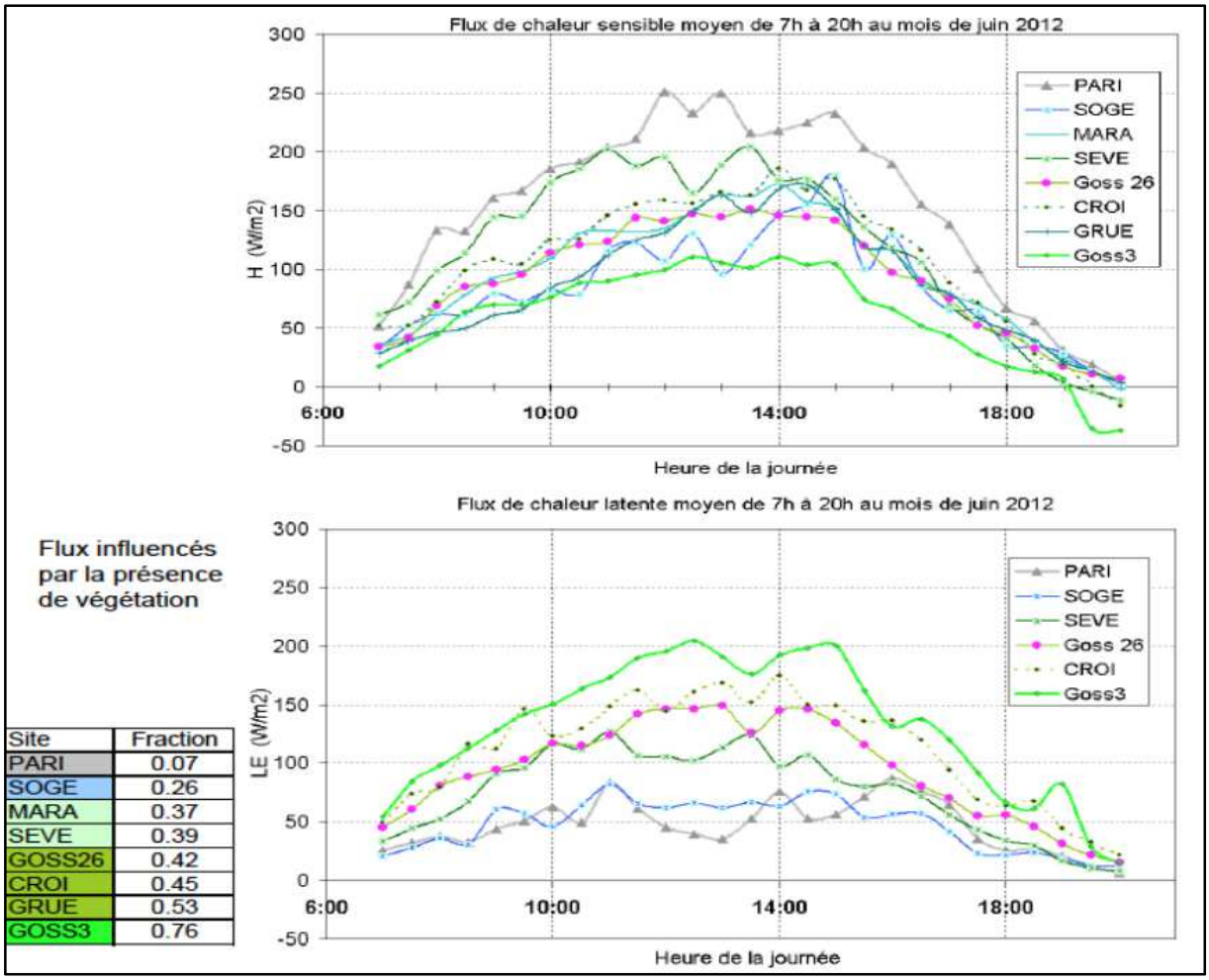



*Figure 3 : Flux de chaleur mesurés pendant la campagne Fluxsap 2012. Source : J.M. Rosant, VegDUD*

Une instrumentation sur des bancs d'essai de toitures, de façades mis en place à La Rochelle, à l'ONERA (Office National d'Etudes et Recherches Aérospatiales) ou au CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) à Nantes, a fourni des données destinées à caler des modèles. Nous souhaitions caractériser comment fonctionnait une toiture végétale, une façade végétale, pour caler ensuite des modèles de thermique et de climat aux échelles de la ville ou du quartier. Par rapport à l'instrumentation, les modèles permettent de tester des scénarios d'évolution.

Plusieurs modèles ont été utilisés à l'échelle de la ville, dont le modèle de climat de Météo France avec lequel nous avons testé des scénarios de végétalisation dans les conditions de la canicule de 2003. Les résultats obtenus sur Paris sont plus démonstratifs que les résultats sur Nantes. Plusieurs scénarios de végétalisation ont été étudiés. Quand on végétalise au sol et avec des arbres, les gains (refroidissement) atteignent au maximum 2 degrés dans les rues. Quand on met des toitures végétales, les gains, même en les arrosant, sont beaucoup plus faibles, de 0,5 degré au maximum dans la rue.

A l'échelle du quartier, nous avons pu tester également des scénarios intégrant la gestion de l'eau, des toitures végétales, des arbres et des noues. Les noues réduisent très fortement le ruissellement. Les toitures végétales sont finalement moins performantes pour diminuer le ruissellement, mais plus intéressantes que les noues pour l'évaporation. En termes d'aménagement, on s'oriente vers des compositions entre les arbres, plus intéressants du point de vue du climat et les noues plus intéressantes pour la gestion des eaux, la réduction du ruissellement et la filtration.

En ce qui concerne l'énergie, de la même manière, le projet VegDUD a comporté une part d'expérimentation et de simulation, à l'échelle la plus fine, du bâtiment dans une rue. Il est très difficile d'obtenir des résultats très précis sur l'impact du végétal sur l'énergie, car cela dépend beaucoup du bâtiment. Que vous ayez un bâtiment peu vitré ou très vitré, bien ou mal isolé, vous n'aurez pas du tout les mêmes résultats. Sur les bâtiments très bien isolés, on a peu d'impact de la végétation, puisqu'ils sont isolés ; l'ombrage des arbres sur les façades a cependant un effet. L'ajout d'une toiture végétale n'apporte pas beaucoup. En revanche, sur les bâtiments mal isolés, les impacts sont très importants. Nous avons surtout essayé de travailler en élaborant une classification des types de bâtiment, et en testant des effets directs (sur le seul bâtiment concerné) et indirects (interactions entre bâtiments proches). Les études sur les effets indirects apportent des résultats intéressants pour les bâtiments que l'on ne peut pas réhabiliter, notamment les bâtiments administratifs des années 80 très vitrés. Peut-être peut-on jouer sur l'environnement pour pallier les difficultés d'une réhabilitation ?

Les mêmes scénarios ont été appliqués à l'échelle de la ville et dans une perspective de changement climatique à long terme. On pourrait gagner jusqu'à 25 % d'énergie en végétalisant complètement la ville. Mais il faut aussi tenir compte des besoins en eau de la végétation : pour limiter le réchauffement climatique à Paris par un usage massif de la végétation, les besoins en eau représenteraient jusqu'à 87 % du débit de la Seine. C'est un facteur limitant à prendre en compte.

### Du climat au confort urbain

Parler d'adaptation en termes de climat ou d'énergie ne suffit pas, il faut également parler du confort perçu dans les espaces urbains, hors des bâtiments. Nous avons essayé de travailler à l'échelle de la rue, pour déterminer quels seraient les aménagements les plus intéressants pour une personne qui est dans la rue ; nous avons calculé des températures ressenties dans la rue. Les effets les plus intéressants sont ceux des arbres, à cause de l'ombre ; les toits et façades végétalisés n'apportent pas d'ombre, et leurs effets sur le rayonnement ne se traduisent pas directement en une sensation de fraîcheur, et ne se cumulent pas avec l'ombre des arbres. La perception du végétal, la manière dont il fait la médiation en ville entre l'espace habité et l'espace public, la manière dont il fait vivre la ville, dont les gens la ressentent, ont un rôle presque aussi important que le rôle climatique quantifiable. C'est toute la demande sociale de végétation en ville qu'il faut absolument prendre en compte.

En conclusion, il convient de citer l'effort de diffusion des résultats du projet VegDUD, auprès d'une communauté large, incluant non seulement les chercheurs, mais aussi les architectes, les urbanistes, les gestionnaires professionnels de la ville. Un livre fait un état de l'art des résultats sur les thématiques traitées dans VegDUD. À destination des professionnels, 61 pages de fiches thématiques sont diffusées par l'association Plante & Cité.

Les perspectives prenant en compte les acquis du projet VegDUD sont nombreuses. À l'heure actuelle, nous travaillons encore beaucoup sur la végétation, mais il existe d'autres solutions. On parle d'arrosage des rues, on parle également beaucoup d'albédo, de peindre les villes en blanc. Ce sont des solutions techniques très différentes qui n'ont pas du tout les mêmes impacts, pas les mêmes coûts, pas les mêmes mises en œuvre. Sur le quartier de Lyon Part-Dieu, nous sommes en train d'étudier des scénarios composant eau, végétation et albédo. À Paris, nous participons à des mesures dans et autour des parcs et à des simulations pour voir s'ils diffusent leur fraîcheur et jusqu'à quelle distance. Il apparaît que le parc est un îlot de fraîcheur intéressant, mais on ne peut pas attendre qu'il rafraîchisse toute la ville. Enfin, le croisement des impacts thermiques et énergétiques de la végétation avec la question de la biodiversité en ville représente un prolongement indispensable de ces travaux.

### Références bibliographiques


Musy, M., 2015. *Une ville verte. Les rôles du végétal en ville,* Quae éditions, 200 p. http://www.quae.com/fr/r3400-une-ville-verte.html

Plante et Cité, *Impacts du végétal en ville,* fiches de synthèse issues du programme VegDUD, 61 p. http://www.plante-et-cite.fr/data/fichiers_ressources/pdf_fiches/experimentation/VegDUD-VD.pdf

# Villes futures et climat urbain, quels leviers pour l'adaptation ? Synthèse du projet ACCLIMAT

Thomas HOUET

Laboratoire Géographie de l'Environnement,
Université Toulouse 2 Jean Jaurès

L'objet de cette communication est de présenter les résultats du projet ACCLIMAT, qui, à la suite du projet MUSCADE, envisage la prospective urbaine en lien avec le changement climatique. Ces projets sont en lien étroit le projet VegDUD. Le projet ACCLIMAT porte sur l'agglomération urbaine de Toulouse.

## Développement urbain et réchauffement climatique

Le projet ACCLIMAT part du principe que réchauffement climatique et développement urbain sont des processus très incertains à long terme. En urbanisme, les prospectives à 10 ou 15 ans sont assez claires car en lien étroit avec les politiques publiques, mais à cette échelle, on ne percevra pas les effets du changement climatique. Or, quand on connaît les répercussions de l'influence de la forme, de la densité ou de l'aménagement de la ville d'une façon plus générale sur le climat urbain et les répercussions que cela peut avoir sur la vulnérabilité aux canicules, les risques sanitaires associés, etc., on se rend compte que l'évolution urbaine d'aujourd'hui aura de lourdes répercussions sur ce qui se passera dans 50 ans.

Cela nécessite de prendre en compte les interactions entre les évolutions de la ville et du climat à l'échelle du XXI$^{ème}$ siècle. C'est un enjeu scientifique assez difficile. On est moins dans la dimension politique, dans le sens où l'on aborde le siècle. Les scénarios élaborés pour Toulouse dans le cadre du projet ACCLIMAT peuvent laisser sceptique, ou peut-être faire sourire, mais l'objectif du projet était d'identifier des leviers d'action concrets pour les décideurs d'aujourd'hui. Le projet a mobilisé une équipe d'une quinzaine de personnes en noyau dur avec des personnes qui interviennent de façon plus ponctuelle : météorologues et climatologues (CNRM, ONERA), économistes (CIRED), géographes (GEODE), urbanistes (Agence d'Urbanisme de Toulouse aire urbaine) et architectes (Laboratoire de Recherche Urbaine, Ecole d'Architecture).

### Méthodologie : scénarios et modèles

La méthodologie du projet repose sur la construction de scénarios d'évolution de la ville, prenant en compte des adaptations technologiques plus ou moins poussées, des usages particuliers et des politiques de planification urbaines très différentes également (Figure 1).

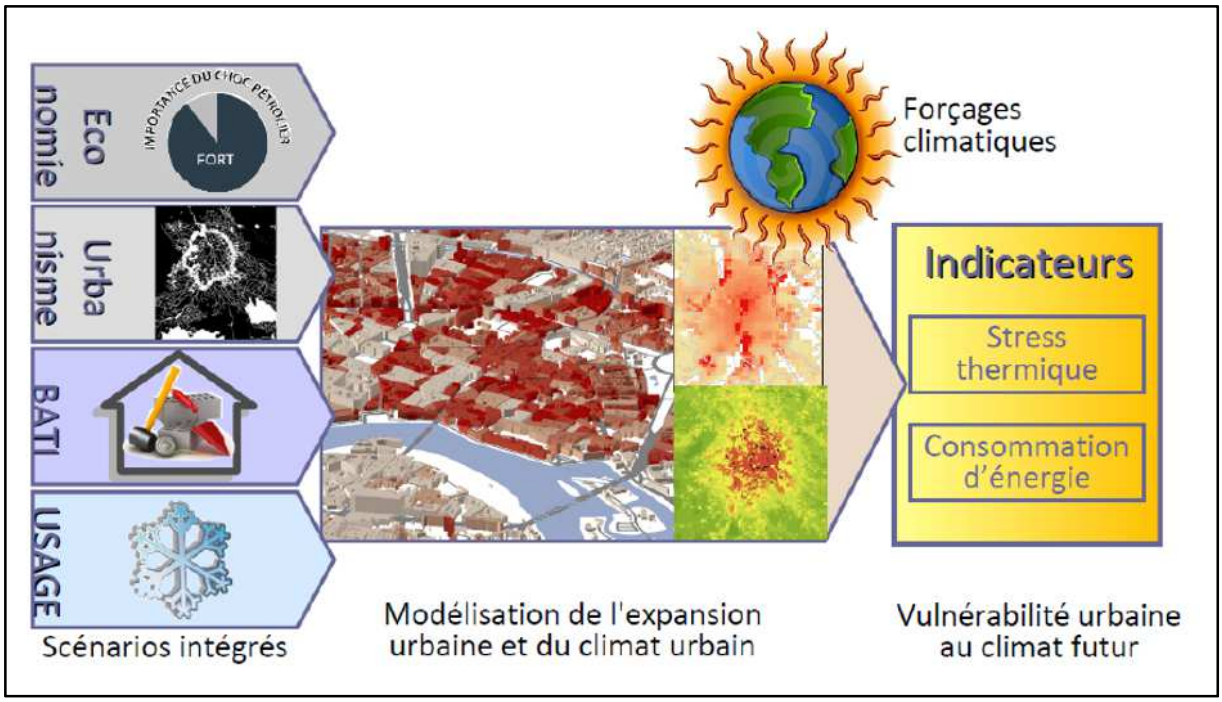



*Figure 1 : Méthodologie générale du projet ACCLIMAT. Source : ACCLIMAT*

A partir des scénarios d'évolution urbaine (économie, urbanisme, transformations du bâti et des usages), nous utilisons ensuite des modèles spatialisés pour évaluer les impacts à la fois en termes de consommation énergétique et d'intensité de l'îlot de chaleur urbain, prenant en compte l'impact du végétal en ville, qui sont les deux principales variables d'analyse. À travers un certain nombre d'indicateurs et d'analyses de comparaison de ces scénarios, l'objectif a été de voir dans quelle mesure on peut identifier des leviers d'adaptation par rapport à ces questions.

La zone d'étude correspond un peu à la dimension de l'agglomération lilloise. L'agglomération toulousaine est l'une des villes les plus étalées de France ; le mode d'habitat de prédilection est la maison individuelle. L'aire d'étude totalise presque 8 000 km$^2$ avec une grande ville centre et les couronnes périphériques. Toulouse est aussi actuellement l'une des villes les plus attractives de France, qui accueille près de 19 000 habitants nouveaux par an, l'équivalent d'une commune périphérique chaque année. Le processus s'accroît de plus en plus, mais il ne va peut-être pas durer.

On comprend les enjeux qui sont derrière cette croissance et cet étalement urbain. La construction de scénarios prospectifs n'est pas simple, d'autant plus si l'on vise l'horizon 2100. Nous avons travaillé avec l'Agence d'urbanisme de Toulouse pour envisager des scénarios très contrastés d'un point de vue de l'impact du choc pétrolier, qui sera l'une des variables importantes, et de la mise en œuvre (ou non) de politiques climatiques

contraignantes. Au niveau de l'économie locale, nous avons envisagé trois situations très simplistes et contrastées : une situation de crise économique marquée, une situation de croissance rapide de pôle d'excellence porté par le domaine aéronautique et spatial, ou une situation de croissance modérée comme pôle de complémentarité régionale (il n'y a en effet pas qu'Airbus, il y a également tout ce qui découle du Cancéropôle, des activités autour de la santé agroalimentaire, qui constituent vraiment un socle économique fort pour la région). Nous avons imaginé également des stratégies d'aménagement du territoire différentes et leurs effets en matière d'évolution du bâti, du système de transport, etc. Ensuite, nous avons croisé les différents scénarios sectoriels de façon à créer des scénarios systémiques. Nous avons tenu compte également des stratégies d'adaptation technologique avec des usages plus ou moins vertueux, etc., le tout pour créer **sept scénarios systémiques très contrastés**. Ces scénarios fournissent les variables d'entrée qui vont alimenter les différents modèles (Figure2).

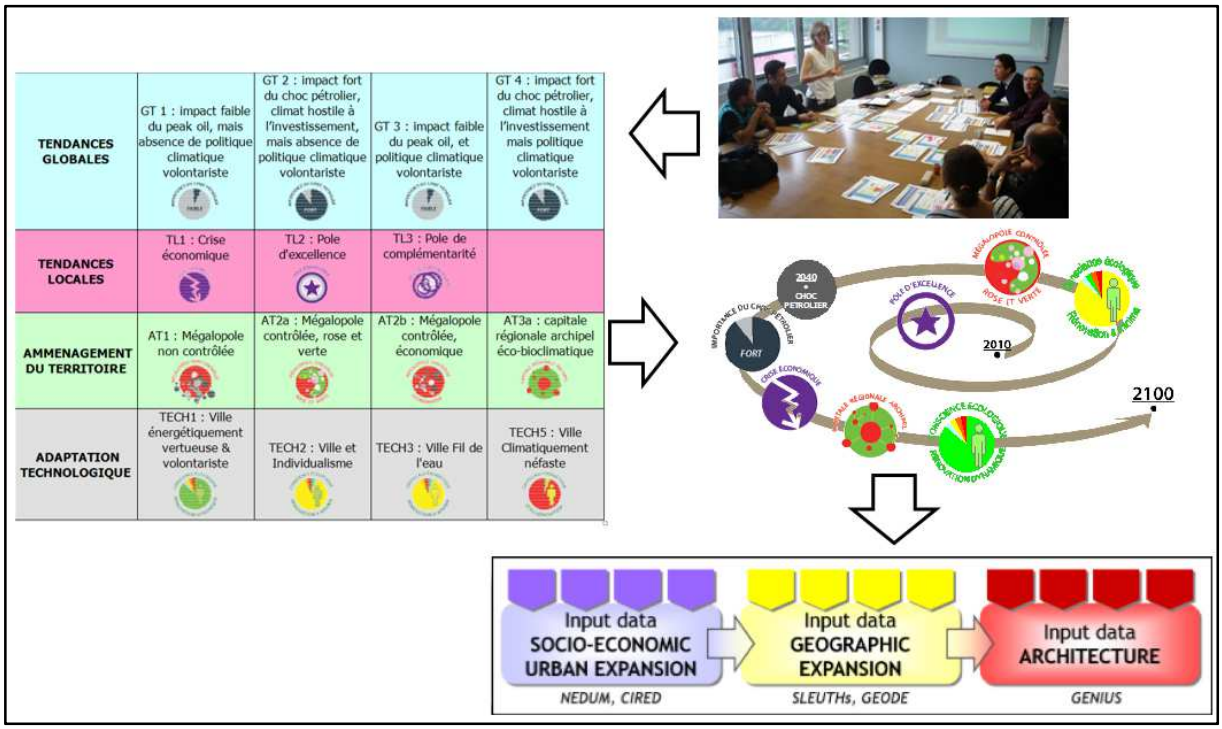



*Figure 2 : Construction des scénarios prospectifs. Source : ACCLIMAT*

Un modèle économique permet de prévoir la croissance démographique attendue pour l'agglomération à l'horizon 2100 ; un modèle géographique, prenant en compte les contraintes des corridors écologiques, des trames vertes et bleues, les contraintes liées au plan de prévention des risques, aux zones inondables, et tous les caractères qui font que l'on peut plus ou moins aménager la ville différemment, permet de simuler l'extension spatiale de l'agglomération ; un modèle architectural permet de prévoir quels types de quartier risquent d'apparaître selon l'évolution des besoins et des politiques. Quant aux usages, ils concernent l'énergie consommée en fonction des températures recommandées pour le chauffage et la climatisation.

### Résultats

Les résultats apparaissent de manière très synthétique dans le tableau (Figure 3). Nous avons sept scénarios, deux sont quasiment identiques (ils diffèrent juste pour les usages, cela ne change donc pas trop la forme de la ville). Sont présentés ci-dessous les six scénarios qui traduisent l'évolution de l'agglomération urbaine entre la forme existante de départ, en gris, et tout ce qui pourra s'accroître en termes d'urbanisation à l'horizon 2100, les effets sur la densité de population dans la partie plutôt centre-ville, les types de quartiers qui ont été générés par ces simulations et les impacts sur les îlots de chaleur.

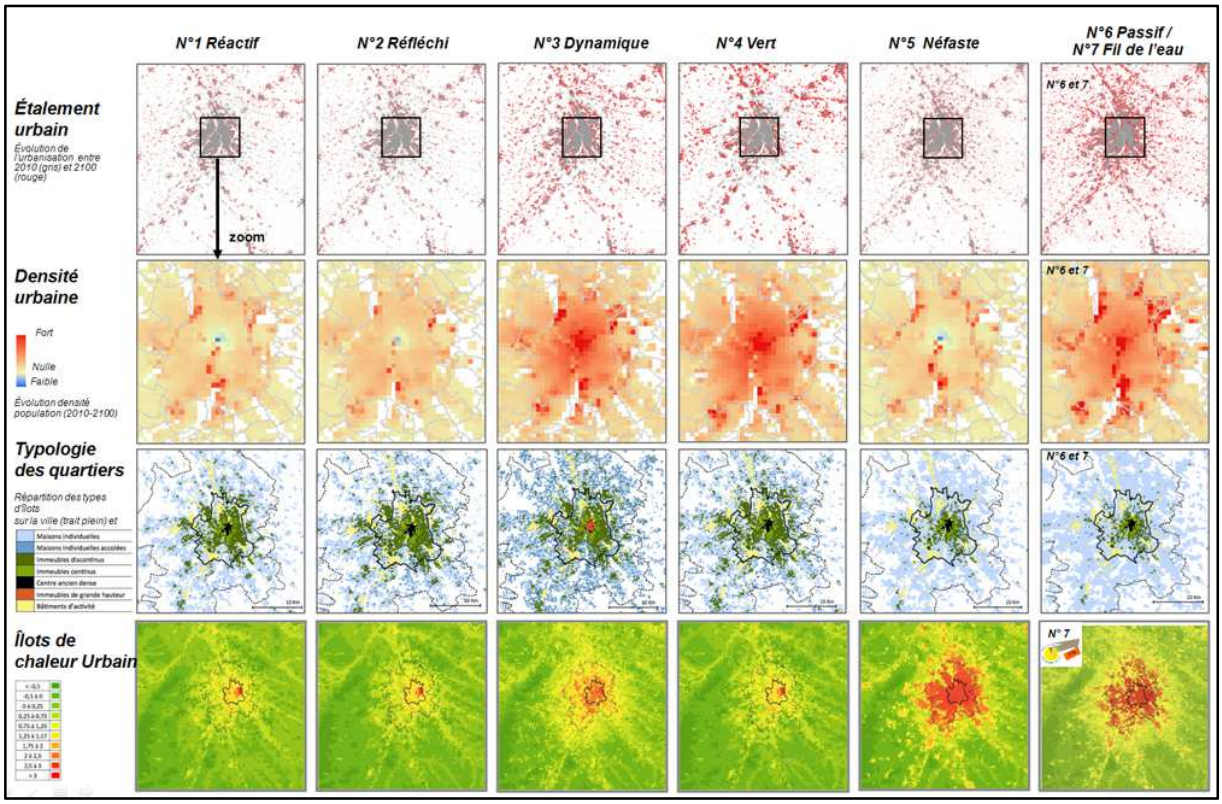



*Figure 3 : Les résultats : 6 des 7 scénarios prospectifs. Source : ACCLIMAT*

### Quel modèle urbain promouvoir ?

Les travaux visaient avant tout à répondre à des questions sur la stratégie d'adaptation. Aujourd'hui, Toulouse lutte contre l'étalement, c'est le credo des politiques urbaines actuelles. Tout l'intérêt de la dimension prospective est d'en mesurer les effets possibles. Nos scénarios montrent que, à partir d'une situation qui représente à peu près 75 000 ha de surface artificialisée, on peut atteindre selon les cas entre 95 000 ha et 144 000 ha à l'horizon 2100. Soit c'est une croissance de l'ordre de + 15 ou 20 %, soit un doublement de la superficie. La gamme de futurs possibles est assez conséquente. Faut-il donc absolument favoriser la ville compacte ? Un scénario que nous avons appelé « réactif » envisageait un modèle de ville compacte, d'une agglomération régionale contrainte grâce à une ceinture verte située à une trentaine de kilomètres du centre-ville. Le scénario montre que finalement, l'effet de la ceinture verte, s'il n'est pas pensé de façon dynamique dans le temps, a un effet pervers qui repoussera encore plus loin la croissance urbaine. C'est déjà ce qui a été constaté à Londres qui a eu une politique de ceinture verte.

Une autre question portait sur les leviers pour réduire la consommation énergétique du bâti. Nous nous sommes rendu compte qu'avec le réchauffement climatique, la réduction de la consommation d'énergie pour le chauffage l'hiver serait supérieure à l'augmentation liée à la climatisation durant l'été. Au final, le bilan annuel est donc positif. Mais ce ne sont pas les mêmes sources d'énergie : le chauffage, c'est du pétrole, du gaz naturel, du bois, de l'électricité alors que, la climatisation, c'est uniquement l'électricité. De nouvelles tensions sur les énergies vont apparaître, qui seront différentes des enjeux énergétiques d'aujourd'hui. Nous avons également examiné l'impact potentiel de la modification des usages de l'énergie. Par exemple, le choix d'allumer le chauffage à 21 ou à 19 degrés a des répercussions sur la consommation énergétique beaucoup plus fortes que le fait de rénover l'ensemble du bâti existant du centre-ville de Toulouse. La rénovation du bâtiment est un levier moins efficace que la modification des usages des populations.

Les modèles de climat urbain permettent d'évaluer les effets conjoints de la croissance urbaine et du changement climatique sur le phénomène d'**îlot de chaleur**. Aujourd'hui, l'îlot de chaleur moyen à Toulouse est de l'ordre de 1 à 2 degrés (valeur moyenne de la différence de température entre les campagnes et le centre-ville), ce qui n'est pas très important ; la variabilité associée est de l'ordre de 3 à 4 degrés. On peut donc avoir des endroits où il fait beaucoup plus chaud mais, en moyenne, c'est environ de 1 à 2 degrés. On atteint, certains hivers, un écart de 6 degrés entre la campagne et le centre-ville. Les résultats des modèles, fondés sur la comparaison des différents scénarios, nous ont permis de montrer (Figure 4) que l'évolution de l'étalement urbain au XXI$^{ème}$ siècle contribue à ajouter + 1 à + 3 degrés par rapport à l'îlot de chaleur actuel. A l'effet direct du réchauffement climatique (selon les différents scénarios du GIEC), il faut ajouter encore cette augmentation due à l'effet urbain. Potentiellement, il faut donc attendre une augmentation possible de la température ressentie en centre-ville de l'ordre de + 3 à + 9 degrés. Sachant qu'à Toulouse, on prévoit, à l'horizon 2075-2080, 1 jour d'été sur 4 avec une température supérieure à 35 degrés, la prise en compte des effets de la forme urbaine et de l'îlot de chaleur ne peut être négligée. Alors que le scénario d'une ville dynamique (n°3), en croissance forte et étalée, montre une intensification et une extension de l'îlot de chaleur vers les périphéries urbaines, le scénario d'une ville verte (n°4) montre la possibilité de faire apparaître des îlots de fraîcheur dans certains quartiers d'habitation.

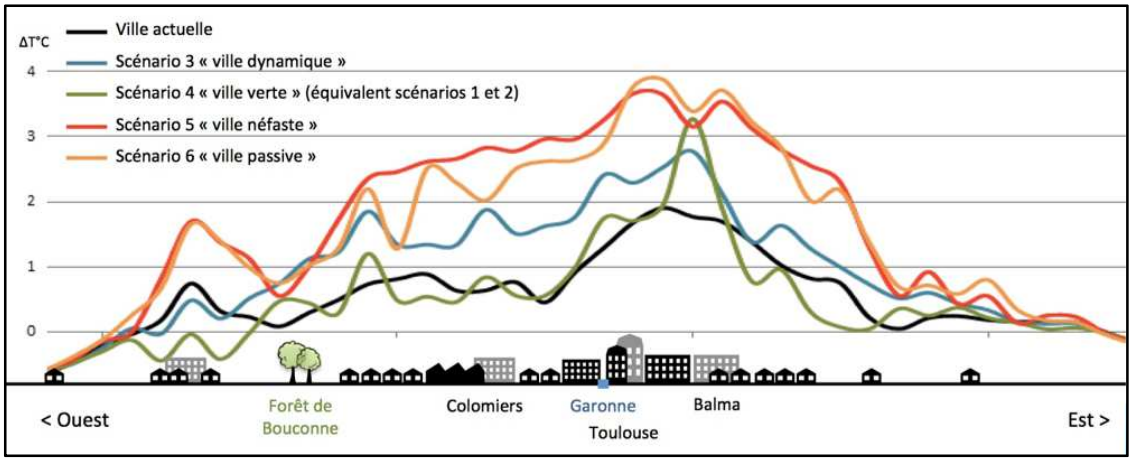



*Figure 4 : Scénarios de croissance urbaine et effets sur l'îlot de chaleur urbain. Source : ACCLIMAT*

La dernière question que pose la prospective est celle de l'urgence de l'action, fréquemment posée par les décideurs, élus ou techniciens : faut-il agir rapidement ? La comparaison des états simulés de la ville vers 2040 avec ceux qui sont attendus vers 2100 répond pour l'essentiel à la question. Les divergences entre les différents scénarios apparaissent dès 2040, et l'état final observé en 2100 dépend fortement de ce qui sera déjà acquis en 2040. Ainsi, les actions entreprises dès aujourd'hui pour la situation de 2040 seront déterminantes pour la situation de 2100.

## Les enjeux de la prospective urbaine

Le projet ACCLIMAT a permis d'identifier les enjeux majeurs de l'adaptation urbaine face au changement climatique. Le premier enjeu est la nécessité d'une action rapide et adaptative, c'est-à-dire qu'il faut définir le modèle urbain du futur dès aujourd'hui, et au-delà des délais habituels de l'action politique. Les Plans Climat Energie Territoriaux (PCET) et Schémas Régionaux Climat Air Energie (SRCAE) comportent beaucoup d'incertitudes sur les évolutions au-delà de l'horizon 2020-2030. Ce n'est sans doute pas suffisant encore. L'anticipation du choc pétrolier (peak-oil), suppose que des réseaux de ville se constituent pour envisager une pénurie éventuelle des ressources pétrolières, et anticiper une situation de crise qui peut être considérable et défier toute stratégie d'adaptation efficace d'un point de vue économique.

L'acceptation sociale est une question très importante. Il ne faut pas imaginer faire sans la population ou pouvoir imposer des mesures très contraignantes. Dans nos usages, nos modes de vie, il n'est pas toujours évident de se dire qu'il vaut mieux mettre un pull en hiver chez soi plutôt que de mettre une bûche ou d'augmenter le chauffage. L'accélération de la rénovation de l'habitat ancien est sans aucun doute fondamentale pour être encore plus efficace.

Enfin, comme le souligne Marjorie Musy, le fait de végétaliser la ville, en même temps que le changement des pratiques et la rénovation poussée des bâtiments peut permettre, dans une ville telle que Toulouse, de conserver des températures comparables à celles d'aujourd'hui. En matière d'adaptation, ce serait un résultat très positif. Néanmoins, il faut considérer que, en parallèle, la Garonne n'aura peut-être pas le même débit et qu'à alimenter et arroser cette végétation sera problématique Finalement, tout est lié. La végétation n'est pas le seul levier d'adaptation, il faut envisager une action multiforme et systémique.

## Références bibliographiques


Masson, V., Marchadier, C., Adolphe, L., Aguejdad, R., Avner P., Bonhomme, M., Bretagne, G., Briottet, X., Bueno, B., de Munck, C., Doukari, O., Hallegatte, S., Hidalgo, J., Houet, T., Le Bras, J., Lemonsu, A., Long, N., Moine, M.-P., Morel, T., Nolorgues, L., Pigeon, G., Salagnac, J.-L., Viguié, V., Zibouche, K., 2014. Adapting cities to climate change : a systemic modelling approach. *Urban Climate*, 10(2), p. 407-429.

Fiches thématiques des projets MUSCADE et ACCLIMAT : http://www.cnrm.meteo.fr/ville.climat/

# Conclusion

Une expérience d'une ampleur sans précédent se déroule en ce moment même. Elle est involontaire et non maîtrisée, mais elle concerne la planète toute entière. Les émissions de gaz à effet de serre ont déjà sensiblement modifié la composition de l'atmosphère et déséquilibré le bilan énergétique de la planète. Le réchauffement est inéluctable ; c'est ce que dit la quasi-totalité des chercheurs actifs sur le sujet depuis que l'on dispose des preuves de l'augmentation de la teneur de l'atmosphère en $CO_2$ et autres gaz à effet de serre (GES). C'est ce qu'expriment tous les rapports du GIEC les uns après les autres. On sait aussi que la température ne peut pas augmenter régulièrement d'une année sur l'autre parce que l'océan absorbe la plus grande partie du surplus de chaleur et qu'il le restitue à l'atmosphère de façon irrégulière.

Le ralentissement récent de l'augmentation de la température moyenne de la planète d'une année sur l'autre depuis le pic de 1998 ne doit donc pas faire illusion et il faut s'attendre à ce que le rythme du réchauffement reprenne de plus belle comme cela fut le cas dans les années 90. L'ampleur du réchauffement dépendra principalement de la quantité totale de GES présents dans l'atmosphère. Sur la base du rythme actuel des émissions, la température moyenne de la planète pourrait encore croître de 4 à 5 degrés d'ici la fin du siècle alors que l'augmentation depuis le début de l'ère industrielle approche déjà 1 degré, des températures que la planète n'a plus connu depuis plus d'un million d'années. Autant dire que s'il en était ainsi, les références passées ne seraient d'aucune utilité. Ce serait même le cas de bouleversements écologiques majeurs et d'extinctions massives de la biodiversité comme la crise de la fin du pléistocène responsable de la disparition d'une grande partie des grands mammifères terrestres. Le réchauffement de la fin du pléistocène en effet, s'est étalé sur plusieurs milliers d'années alors que nous pourrions connaître un changement climatique de même ampleur en moins d'un siècle.

C'est pour cette raison que la limitation des émissions de GES est une urgence absolue. L'objectif est de réduire les émissions de façon à limiter l'augmentation de la température moyenne à moins de deux degrés ce qui permettrait de rester en terrain connu. Il est évidemment nécessaire de tout faire pour contribuer à cet objectif mais il faut aussi, d'ores et déjà anticiper un réchauffement qui pourrait être bien supérieur et en décliner toutes les conséquences dans tous les domaines.

Anticiper le réchauffement, c'est aussi l'inscrire dans son contexte : les changements auxquels sont confrontés nos sociétés et plus généralement l'ensemble de la planète ne concernent pas que le climat. Ils atteignent une proportion telle que l'on qualifie la période actuelle de nouvelle ère, l'anthropocène, en ce sens que la trace des activités humaines s'inscrit désormais profondément dans les marqueurs de l'évolution de la planète. La pollution atmosphérique, l'acidification des océans, la surexploitation des sols tout comme

celle des ressources énergétiques et des ressources en matériaux, la pression démographique, la mondialisation de l'économie. Tous ces facteurs agissent de manière concomitante et souvent en synergie. Un des défis scientifiques est d'identifier, de comprendre et de hiérarchiser les contributions respectives de chacune des pressions anthropiques aux changements environnementaux, d'anticiper les rétroactions, de manière à proposer les bons leviers pour une action préventive ou curative efficace.

Tout préliminaire qu'il soit, ce rapport et le travail qui l'a précédé permettent quelques recommandations.

A l'échelle du Nord - Pas de Calais, anticiper ce réchauffement, c'est d'abord essayer d'en préciser les contours pour la région. Les moyens mis en place par Météo France et le CNRS via le portail DRIAS permettent d'estimer ce que seraient les températures et les précipitations dans la région pour les divers scénarios envisagés par le GIEC. Le climat de la région est essentiellement marqué par l'influence océanique et fort logiquement, les projections disponibles ne prévoient pas de bouleversement du climat régional qui resterait, pour l'essentiel, un climat tempéré mais avec des températures moyennes plus élevées, moins de vagues de froid et des températures maximum plus élevées. Mais bien que l'augmentation de la fréquence et de la durée des vagues de chaleur soit beaucoup plus modeste que dans le sud de la France par exemple, elle devrait augmenter sensiblement avec des conséquences non négligeables sur les littoraux, la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines, la biodiversité, la qualité de l'air, la santé et les cadres de vie.

Le réchauffement global aura pour conséquence une hausse moyenne du niveau de la mer que le GIEC estime entre environ 0,5 et 1 m à la fin du siècle suivant les scénarios mais qui pourrait être assez largement dépassée. **Les littoraux** du Nord - Pas de Calais sont en grande partie constitués de plages et de dunes côtières qui protègent des zones basses des attaques de la mer, notamment des submersions marines lors d'épisodes météo-marins de forte intensité. La hausse du niveau de la mer est susceptible d'accroître les phénomènes d'érosion côtière ce qui ne pourrait que fragiliser les dunes côtières qui subissent déjà par endroits un recul important. Pour faire face à l'augmentation de ces risques, des solutions « douces » pourraient être favorisées de façon à ne pas recourir uniquement à des solutions lourdes (digues, enrochements) visant à rigidifier le trait de côte. On peut citer, par exemple, le rechargement artificiel des plages ainsi que la mise en place de structures pouvant favoriser l'accumulation éolienne de sable au pied des dunes comme cela se fait depuis plusieurs décennies dans des pays voisins comme la Belgique ou les Pays Bas.

Les manifestations du changement climatique telles que l'élévation du niveau de la mer, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des précipitations affectent les **eaux continentales,** dans la zone des Wateringues et plusieurs bassins versants de la région, en terme de quantité et qualité des eaux. L'adaptation à ces changements est cruciale car les enjeux sont multiples et concernent le maintien de la fourniture en eau pour les usagers, la

préservation de la qualité de la ressource, déjà plus ou moins polluée. Une première piste d'adaptation serait d'accroître et d'optimiser les capacités de stockage sur le linéaire du réseau hydrographique. Une autre piste serait d'augmenter les capacités de pompage du système actuel dans les watergangs pour la prévention des inondations. Ces solutions sont coûteuses et questionnent sur la capacité des collectivités à les financer. Au-delà, développer une « culture de l'eau» en prenant conscience des risques permettrait de construire un territoire résilient.

Bien que l'on ne s'attende pas à un bouleversement du climat de la région, le réchauffement attendu aura nécessairement des conséquences sur **la biodiversité**. Les services rendus par les écosystèmes naturels pourraient en être affectés très sensiblement : altération des services rendus par les insectes pollinisateurs ou diminution des ressources naturelles comme les ressources halieutiques. Les changements climatiques régionaux pourront entrainer l'apparition de nouveaux pathogènes affectant les cultures ou de nouvelles espèces végétales à fort pouvoir allergènes.

**La qualité de l'air** dans la région Nord – Pas de Calais est surveillée et étudiée depuis plusieurs décennies. Sa situation, complexe de part les origines multiples de polluants et les phénomènes météorologiques locaux (brises de mer, îlots de chaleur urbains), rend la question de l'impact du changement climatique sur la qualité de l'air particulièrement difficile à appréhender. Même si des phénomènes tels que l'augmentation des émissions biogéniques avec la température ou l'augmentation de la fréquence de pics de pollution sont observables, l'interaction entre les phénomènes impliqués au cours de ces épisodes de pollution (émission, chimie, dépôt, transport…) impose une approche pluridisciplinaire. Grâce aux différents outils expérimentaux mis en place en région, il est possible de caractériser les situations météorologiques, la composition des masses d'air en termes de polluants gazeux et particulaires et leur devenir. On dispose aussi de modèles qui permettent de comprendre et prédire certains comportements (augmentation d'événements extrêmes, modification des conditions météorologiques, modification de certains types d'émission). A plus long terme, la poursuite des études sur la qualité de l'air s'avère nécessaire pour abaisser le niveau des incertitudes qui demeurent sur son évolution, incertitudes fortement liées à celles du climat et donc aux évolutions des émissions anthropiques.

Le changement climatique de part les effets précédemment cités sur la qualité de l'air et la biodiversité aura également de nombreuses répercutions sur **la santé humaine** par une plus forte exposition à la pollution atmosphérique, aux pollens, etc.... Les changements climatiques s'exerceront de manière directe (hyperthermie en cas de vague de chaleur), ou indirecte. Ainsi, par exemple, des pathologies infectieuses actuellement inconnues dans notre région pourront émerger avec le changement climatique et la migration des vecteurs (moustiques par exemple) dans le Nord-Pas de Calais. Des risques d'épidémies sont également possibles en cas de catastrophes naturelles importantes. Si tout le monde est exposé à ces risques,

certaines populations telles que les enfants, les personnes âgées, les personnes atteintes de pathologies cardiovasculaires et respiratoires chroniques, les personnes précaires, sont plus fragiles que les autres.

Afin de limiter ces effets, les adaptations passent en amont par une recherche accrue (natures et conséquences des effets, diagnostic précoce…). Elles doivent également miser sur une information large du grand public afin d'obtenir les modifications nécessaires des comportements des individus et une meilleure efficacité des politiques de prévention. Certains changements nécessaires seront plus complexes tels, par exemple, en terme d'architecture, que l'évolution des bâtiments et des villes qui devront apporter plus de protection vis à vis de la chaleur. L'urbanisme et l'aménagement du territoire se révèlent donc comme des enjeux majeurs de l'adaptation au changement climatique, en incluant sous ce terme autant la réduction des consommations d'énergies fossiles et des émissions de GES, que la prévention des risques climatiques et la préservation du « confort urbain » et des modes de vie collectifs. L'étalement urbain et la péri-urbanisation, qui concernent particulièrement la région Nord-Pas de Calais, sont au cœur de ces enjeux. Des outils scientifiques font leur apparition, ils permettent d'asseoir les politiques urbaines sur des bases solides. L'implication des sciences sociales paraît indispensable pour mettre les citoyens au cœur des transformations à venir. La combinaison de scénarios prospectifs et de modèles permet d'envisager les évolutions urbaines prenant pleinement en compte les changements environnementaux attendus.

Ce rapport a été réalisé à partir des exposés de deux conférences et rendu possible grâce à la participation directe ou non d'un grand nombre de chercheurs dont plusieurs extérieurs à la région. Il doit être considéré comme une première étape dans la compréhension des conséquences environnementales du changement climatique en région Nord-Pas de Calais. Il a été l'occasion de constituer un noyau de chercheurs fortement impliqués dans la thématique des changements environnementaux. Les domaines de recherche qui sont les leurs sont divers mais ne couvrent pas encore, loin s'en faut, tous les champs d'interaction du changement climatique. Cette exhaustivité n'est d'ailleurs pas l'objectif du CERCLE : il s'agit plutôt de réunir les compétences régionales quand elles sont disponibles et d'aider à leur développement et de trouver dans l'EuroRégion ou ailleurs celles qui manquent.

# Annexes

## Annexe 1 : Coordonnées des auteurs et coordinateurs

### Thématique Climat

- Coordination
  *ancien membre du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* ***(GIEC)***
  *ancien directeur du Laboratoire d'Optique Atmosphérique* ***(LOA)***
  Contact : Yves FOUQUART (yfouquart@wanadoo.fr)

- *Météo France Direction Interrégionale de Lille*
  Site web : http://www.meteofrance.fr/
  Contact : Eric BARBAY (eric.barbay@meteo.fr)

### Thématique Littoral

- *Laboratoire d'Océanologie et Géosciences* ***(LOG)***
  *UMR 8187 CNRS-Université de Lille-ULCO*
  Site web : http://log.prod.lamp.cnrs.fr/
  Contacts: Arnaud HEQUETTE (arnaud.hequette@univ-littoral.fr)
  Marie-Hélène RUZ (ruz@univ-littoral.fr)
  Alain TRENTESAUX (alain.trentesaux@univ-lille1.fr)

- *Groupe d'Etude sur les Géomatériaux et Environnements Naturels, Anthropiques et Archéologiques* ***(GEGENA)***
  *EA CNRS 3795, Université de Reims Champagne-Ardenne*
  Site web : http://www.univ-reims.fr/site/laboratoire-labellise/groupe-d-etude-sur-les-geomateriaux-et-environnements-naturels-anthropiques-et-archeologiques-ea3795
  Contact : Guillaume PIERRE (guillaume.pierre@univ-reims.fr)

### Thématique Eaux continentales

- *Laboratoire de Spectrochimie Infrarouge et* Raman ***(LASIR)***
  *UMR CNRS 8516, Université de Lille*
  Site web : http://lasir.univ-lille1.fr/
  Contact : Ludovic LESVEN (ludovic.lesven@univ-lille1.fr)

- *Institution Interdépartementale des Wateringues*
  Site web : http://www.institution-wateringues.fr/
  Contact : Stéphane VANHEE (stephane.vanhee@institution-wateringues.fr)

## Thématique Biodiversité

- *Laboratoire d'Océanologie et Géosciences* ***(LOG)***
  *UMR 8187 CNRS-Université de Lille-ULCO*
  Site web : http://log.prod.lamp.cnrs.fr/
  Contact : Grégory BEAUGRAND (gregory.beaugrand@univ-lille1.fr)
  Eric GOBERVILLE (eric.goberville@univ-lille1.fr)

- *Laboratoire Evolution, Ecologie et Paléontologie* ***(Evo-Eco-Paléo)***
  *UMR CNRS 8198, Université de Lille*
  Site web : http://gepv.univ-lille1.fr/
  Contacts : Yves PIQUOT (yves.piquot@univ-lille1.fr)
  Nina HAUTEKEETE (nina.hautekeete@univ-lille1.fr)

- *Laboratoire : Écologie et Dynamique des Systèmes Anthropisés* ***(EDYSAN),***
  *FRE 3498 CNRS – Université de Picardie – Jules Vernes.*

  Site web : https://www.u-picardie.fr/edysan
  Contact : Jonathan LENOIR (jonathan.lenoir@u-picardie.fr)

## Thématique Qualité de l'air et atmosphère

- *Laboratoire de Physicochimie des Processus de Combustion et de l'Atmosphère (****PC2A****)*
  *UMR CNRS 8522 Université de Lille*
  Site web : http://pc2a.univ-lille1.fr/
  Contacts : Coralie SCHOEMAECKER (coralie.schoemaecker@univ-lille1.fr)
  Valérie FEVRE-NOLLET (valerie.nollet@univ-lille1.fr)

- *Laboratoire d'Optique* Atmosphérique *(****LOA****)*
  *UMR CNRS 8518, Université de Lille*
  Site web : http://www-loa.univ-lille1.fr/
  Contact : Philippe GOLOUB (philippe.goloub@univ-lille1.fr)

- *Laboratoire de Spectrochimie Infrarouge et* Raman *(****LASIR****)*
  *UMR CNRS 8516, Université de Lille*
  Site web : http://lasir.univ-lille1.fr/
  Contact : Marie CHOEL (marie.choel@univ-lille1.fr)

- *Laboratoire de Physico-Chimie de l'Atmosphère (****LPCA****)*
  *EA 4493, Université du Littoral Côte d'Opale*
  Site web : http://lpca.univ-littoral.fr/
  Contact : Hervé DELBARRE (herve.delbarre@univ-littoral.fr )

- *Département Sciences de l'Atmosphère et Génie de l'Environnement (****SAGE****)*
  *Ecole des Mines de Douai*
  Site web : http://ce.mines-douai.fr/
  Contact : Véronique RIFFAULT (veronique.riffault@mines-douai.fr)

- *Laboratoire Territoires, Villes, Environnement et Société (****TVES****)*
  *EA 4477 Université de Lille – Université du Littoral Côte d'Opale*
  Site web : http://tves.univ-lille1.fr/
  Contact : Caroline NORRANT (caroline.norrant@univ-lille1.fr)

## Thématique Santé

- *Association pour la Prévention de la Pollution Atmosphérique Nord-Pas de Calais (**APPA**),)*
  Site web : http://www.appanpc.fr
  Contact : Laetitia DAVRANCHE (ldavranche@appanpc.fr)

- *Réseau National de Surveillance Aérobiologique (**RNSA**)*
  Site web : http://www.pollens.fr/accueil.php
  Contact : Michel THIBAUDON (rnsa@rnsa.fr)

- *Laboratoire Facteurs de risque et déterminants moléculaires des maladies liées au vieillissement (**RID-AGE**)*
  *Unité INSERM 1167, Institut Pasteur*
  Site web : http://www.pasteur-lille.fr/fr/recherche/u744/
  Contact : Luc DAUCHET (Inserm-u1167@pasteur-lille.fr)

- *Laboratoire IMPact de l'Environnement Chimique sur la Santé humaine **(IMPECS)****
  *EA 4483, Université de Lille*
  Site web : http://recherche.univ-lille2.fr/fr/annuequipes/sciencesviesante/ea/ea-4483.html
  Contacts : Damien CUNY (damien.cuny@univ-lille2.fr)
  Lidia NIKASINOVIC (lydia.nikasinovic@univ-lille2.fr)
  Régis MATRAN (regis.matran@univ-lille2.fr )

## Thématique Villes

- *Ancien Directeur du Département Géographie de l'Ecole Normale Supérieure*
  Site web : http://www.geographie.ens.fr/ http://www.environnement.fr
  Contact : Claude KERGOMARD ckergomard@gmail.com)

- *Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville, Nantes*
  *Fédération de recherche FR 2488 CNRS*
  Site web : http://www.irstv.fr/fr/
  Contact : Marjorie MUSY (marjorie.musy@cerma.archi.fr)

- *Laboratoire Géographique de l'Environnement,*
  *UMR CNRS - Université de Toulouse Jean Jaurès*
  Site web : http://w3.geode.univ-tlse2.fr/permanents/houet.php
  Contact : Thomas HOUET (thomas.houet@univ-tlse2.fr)

# Annexe 2 : Mesures d'adaptation prévues dans le SRCAE

## SCHEMA REGIONAL CLIMAT AIR ENERGIE DU NORD PAS DE CALAIS

Le SRCAE Nord-Pas-de-Calais propose 8 orientations liées à l'adaptation du territoire au changement climatique.

ADAPT1 : Améliorer la connaissance sur les effets probables du changement climatique en région Nord-Pas-de-Calais, notamment sur les débits des cours d'eau, le risque d'inondation continentale, l'érosion côtière, les productions agricoles et forestières, et la santé humaine.

ADAPT2 : Intégrer dans l'exercice de révision du SDAGE et des SAGE l'impact des effets du changement climatique sur l'évolution de la gestion de l'eau et des milieux aquatiques.

ADAPT3 : Elaborer et mettre en œuvre des stratégies d'aménagement et de gestion foncière adaptées à l'importance du risque de submersion marine en s'appuyant sur des analyses coûts/avantages.

ADAPT4 : Anticiper les effets du changement climatique et faire évoluer en conséquence les modes de gestion des eaux continentales dans les Wateringues.

ADAPT5 : Prévenir les phénomènes d'îlots de chaleur urbains dans les projets d'aménagement, notamment en favorisant l'accès de la nature en ville et e s'appuyant sur la mise en œuvre du plan canicule.

ADAPT6 : Renforcer l'information et la sensibilisation sur le phénomène de retrait-gonflement des argiles prenant en compte l'augmentation de l'aléa lié au changement climatique.

ADAPT7 : Intégrer les effets du changement climatique dans l'évolution des pratiques agricoles, dans les choix des variétés mises en culture ainsi que dans les dispositifs de préservation de la biodiversité, notamment des zones humides.

ADAPT8 : Mettre en œuvre les principes de gestion durable de la forêt et anticiper les impacts du changement climatique.

# Annexe 3 : Description des scénarios SRES et RCP

La concentration atmosphérique en GES est le facteur déterminant de l'évolution du climat au cours du XXIe siècle (voir l'article d'Y. Fouquart). Toutes les projections sont donc basées sur des hypothèses quant à l'évolution de ces concentrations au cours du temps. Dans une première étape, le GIEC a sélectionné un certain nombre de scenarios socio -économiques et démographiques (dénommés SRES pour Special Report on Emissions Scenarios, décrits dans le rapport du GIEC de 2000) qui conduisaient à une évolution des émissions. Le $CO_2$ n'est pas le seul gaz à effet de serre produit par l'activité humaine mais pour des raisons de simplicité, il est d'usage de combiner ces autres GES comme le méthane, le protoxyde d'azote, les fréons avec le $CO_2$. Les concentrations en question sont donc exprimées en concentrations de $CO_2$ équivalent.

Au total, ce sont 40 scénarios qui ont été élaborés à partir de 4 familles (A1, A2, B1, B2) reposant sur des hypothèses d'évolution très différentes. Certains d'entre eux supposent une évolution démographique contenue et un recours massif aux énergies renouvelables (scénarios des familles B) , d'autres, au contraire, supposent que les émissions continuent à progresser à un rythme proche du rythme actuel (familles A).

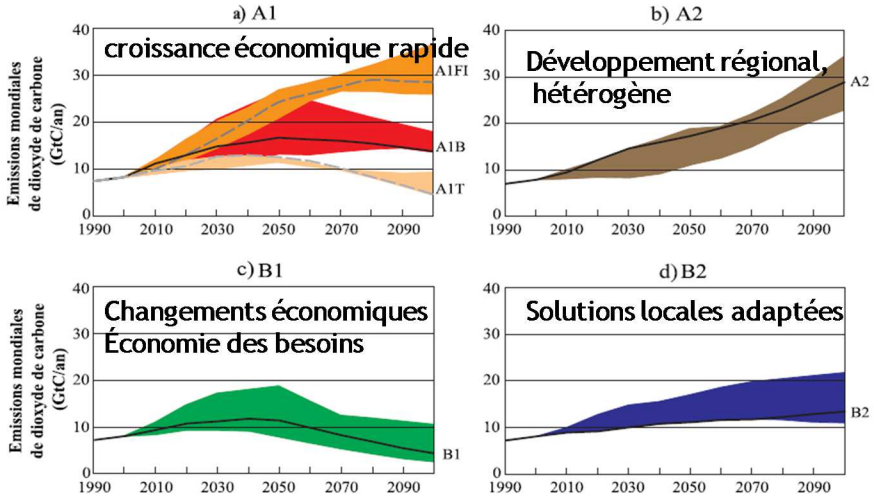



*Figure 1 : représentation des différentes familles de scénarios SRES ( à partir du rapport Spécial du GIEC, résumé à l'intention des décideurs : https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-fr.pdf )*

Une grande partie des GES émis sont absorbés par l'océan et par la végétation, des modèles de cycles biogéochimiques, en particulier du carbone permettait de déduire l'évolution des concentrations des GESselon les différentes hypothèses des scénarios. L'éventail des concentrations en $CO_2$ à la fin du siècle s'étendait ainsi d'environ 500 ppm à 1000 ppm.

L'ennui avec ces scénarios, c'est que si on souhaitait modifier l'une des hypothèses de développement, alors on modifiait les émissions, et de nouvelles modélisations étaient nécessaires pour déterminer de nouvelles concentrations en GES. Pour remédier à cela, les modélisateurs du climat utilisent désormais 4 évolutions représentatives des types d'évolution des concentrations auxquelles on peut s'attendre et donc le forçage radiatif en découlant, c'est

à dire à un déséquilibre énergétique de la planète qui est rappelé dans la dénomination.. Ce sont les RCP pour "Representative Concentration Pathways" dont la dénomination fait référence à la valeur du forçage en 2100 (2.6; 4.5;6 et 8.5). C'est ainsi que la RCP 2.6 conduit à un forçage radiatif de 2,6 W/m$^2$ à la fin du siècle alors que pour la RCP 8.5 ce déséquilibre atteint 8,5 W/m$^2$. Notez que seule la RCP 2.6 permet de maintenir le réchauffement depuis le début de l'ère industrielle en dessous de 2 degrés. L'avantage de ces scénarios est de permettre aux climatologues d'utiliser les RCP comme données d'entrée de leurs simulations et de travailler en parallèle des économistes qui définissent, eux, des simulations socio-économiques résultantes sur les différents RCP.

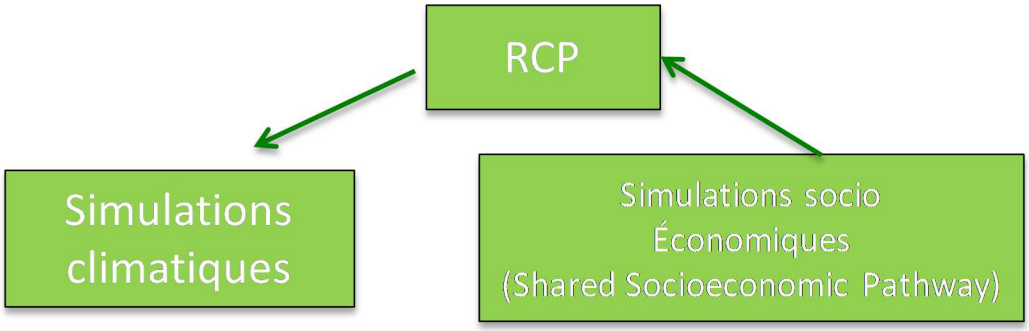



*Figure 2 : Utilisation des RCP par les communautés scientifiques (inspiré de la synthèse de la Direction de l'énergie et du climat, "découvrir les nouveaux scénarios RCP et SSP utilisés par le GIEC, sept 2013, http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERC_decouvrir_scenarios_Giec.pdf)*

La Figure 3 permet de comparer les évolutions des concentrations pour les trois scénarios SRES les plus utilisés à trois des RCP.

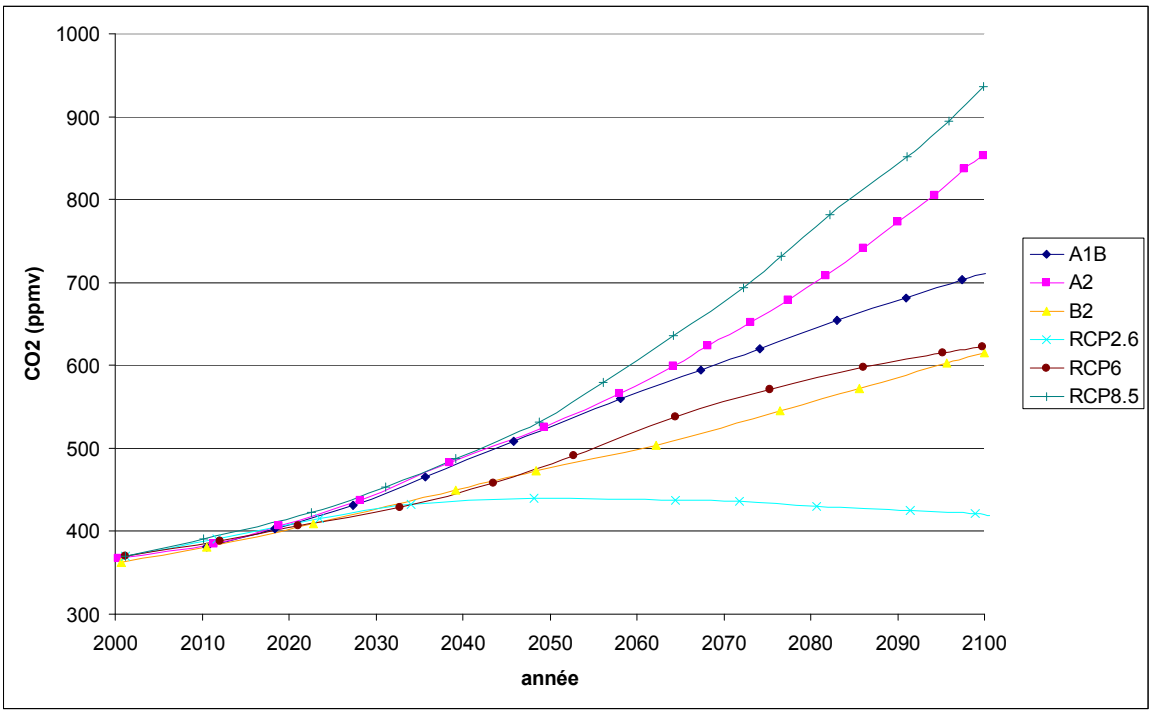



*Figure 3: comparaison de l'évolution de la concentration atmosphérique en CO2 pour les scénarios et les RCP utilisés dans ce rapport*

Le dérèglement climatique pose à nos sociétés deux questions : comment le limiter, et comment s'y adapter. La première question est aujourd'hui largement explorée dans une politique d'ensemble. La seconde nécessite la mobilisation des chercheurs, l'exploration de la dimension régionale et sa prise en compte dans les politiques publiques.

La démarche CERCLE (Collectif d'Expertise Régionale sur le Climat et son Evolution), à l'initiative du Conseil régional Nord-Pas de Calais, est une démarche de régionalisation des impacts du changement climatique, à l'échelle du territoire régional et des régions limitrophes.

Un collectif de chercheurs et d'experts s'est constitué pour cela. Dans un premier temps, il propose de dresser un état des lieux des connaissances existantes ou en cours d'acquisition sur les impacts du changement climatique sur la Qualité de l'air, le Littoral, les Eaux continentales, la Biodiversité, la Santé, la Ville. Cet état des lieux a fait l'objet de 2 conférences qui sont restituées dans ce recueil.

Dans un second temps, l'enjeu sera de soutenir des travaux de recherche pour poursuivre cette dynamique et de mobiliser les décideurs et représentants de la société civile pour éclairer l'action publique.

Remerciements au coordinateur scientifique (Yves FOUQUART),
aux membres de la mission scientifique (Damien CUNY, Arnaud HEQUETTE, Claude KERGOMARD, Yves PIQUOT, Coralie SCHOEMAECKER),
et à tous les intervenants des 2 journées du CERCLE.

RÉGION
NORD-PAS DE CALAIS

151, avenue du Président Hoover - 59555 Lille Cedex
Tél. 03 28 82 82 82 - Fax. 03 28 82 82 83 - www.nordpasdecalais.fr

Crédit photographique : D. BOKALO - Région Nord-Pas de Calais