

## Séminaire scientifique de restitution de GICC-1 (11-12 mai 2006)

---

Le séminaire scientifique de restitution finale du programme GICC-1 s'est tenu à l'Institut National d'Agronomie (16 rue Claude Bernard, Paris 5<sup>ème</sup>) les 11 et 12 mai 2006. Organisé en une introduction, huit sessions et une table ronde finale, il a permis aux chercheurs qui n'avaient pas encore présenté leurs travaux de le faire.

Le programme du séminaire était le suivant :

---

### Introduction

Claude MILLIER, Président du Conseil Scientifique GICC

---

### Images de l'évolution du climat en France au 21<sup>ème</sup> siècle selon les scénarios CNRM et IPSL

4/02 - Impact des changements anthropiques sur la fréquence des phénomènes extrêmes de vent, de température et de précipitations (IMFREX)

Michel DEQUE

5/02 - Impacts du changement climatique sur le cycle hydrologique du bassin méditerranéen et en Europe du Sud (MEDWATER)

Laurent LI

---

### Les liens entre l'action nationale et l'action internationale

2/01 - Conditions de l'additionnalité développementale du MDP et rôle de l'Aide Publique au Développement  
Sandrine MATHY

12/01 - Recherche sur les droits d'émission : gestion juridique et négociation économique du climat  
Marie-Angèle HERMITTE

10/02 - Une analyse multidisciplinaire de l'acceptabilité du péage urbain  
Mathieu GLACHANT

---

### Les interactions climat-économie-société

#### Risques climatiques et politique publique

3/01 - Renforcement des capacités de scénarisation à long terme : maîtrise des données, couplage des modèles  
Jean-Charles HOURCADE

11/02 - Efficacité et acceptabilité des scénarios d'engagement et de réduction des émissions de GES  
Renaud CRASSOUS

#### Politique climatique et séquestration forestière et agricole de carbone

3/02 - Biodégradation des litières et séquestration du carbone dans les écosystèmes cultivés et pérennes  
Patricia GARNIER

12/02 - Etude des politiques économiques destinées à promouvoir la séquestration du carbone dans les sols agricoles  
Katheline SCHUBERT

---

## L'impact sur la biosphère terrestre

7/00 - Indicateurs dendroécologiques et prédictions des effets des changements environnementaux sur la croissance et les propriétés du bois d'espèces forestières majeures

Jean-Luc DUPOUEY

9/01 - Fonctionnement d'une communauté végétale soumise à un réchauffement atmosphérique et à une sécheresse édaphique

Isabelle CHUINE

---

## L'impact sur les hydrosystèmes

2/00 - Etude des impacts potentiels du changement climatique sur le bassin versant du Rhône en vue de leur gestion

Etienne LEBLOIS

8/01 - Influence du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique et biogéochimique du bassin de la Seine

Agnès DUCHARNE

9/02 - Impact de la variabilité climatique sur les ressources halieutiques et la distribution des prédateurs marins dans les DOM-TOM (Indien Austral)

Charles-André BOST

---

## Vers de nouveaux inventaires d'émissions nettes de GES (direct ou indirect) et d'aérosols

4/00 - Quantification des flux et stocks de carbone au niveau Européen et national

P. BOUSQUET

5/00 - Quantification des émissions des gaz à effet de serre autres que le CO<sub>2</sub> et de leurs précurseurs par modélisation inverse

Aude MIEVILLE

6/00 - Bilans de carbone et d'eau de la région Sud-Ouest : Historique récent, états actuels et scénarios du futur : comparaison des pressions climatiques et anthropiques

Gérard DEDIEU

4/01 - Impact climatique de l'aérosol carboné

Robert ROSSET

5/01 - Emissions d'oxydes d'azote par les sols. Mesures, modélisation, cadastre et inventaire. Impact sur la qualité de l'air, le changement climatique et évaluation des gisements de réduction de ces émissions

Dominique SERCA

6/01 - Sources et puits de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) en prairie pâturée et stratégies de réduction

Jean-François SOUSSANA

---

## Impacts sur la biodiversité

3/00 - Conséquences potentielles du changement climatique sur les biocénoses aquatiques et riveraines françaises

Didier PONT

---

## L'impact sur la santé

6/02 - Quantification des risques d'émergence d'épidémies à choléra dans le bassin méditerranéen en relation avec le changement climatique

Jean-François GUEGAN

7/02 - Modélisation des arboviroses tropicales émergentes climato-démendantes (MATECLID)

Marc DUBOIS

8/02 - Etude de l'impact des changements climatiques sur les maladies à transmission vectorielle en Afrique de l'Ouest : le cas de la borréliose à tiques et du paludisme

Jean-François TRAPE

---

## Bilan et perspectives

Table ronde

Claude MILLIER, Thierry BRECHET, Wolfgang CRAMER, Pascale DELECLUSE, Serge MORAND, Serge PLANTON, André MONACO.

Conclusions

Eric Vindimian, Directeur du service de recherche et prospective, D4E, MEDD

---

## Le programme Gestion et Impacts du Changement Climatique

### Le réchauffement climatique : un phénomène préoccupant

---

La variabilité naturelle des phénomènes climatiques est clairement perceptible par chacun de nous. Mais le climat est également soumis à un certain nombre de modifications, en partie dues aux activités humaines. L'opinion et les pouvoirs publics sont de plus en plus préoccupés par ces changements risquant d'entraîner des effets néfastes sur la biosphère, les écosystèmes et les ressources naturelles, sur les infrastructures et les activités économiques et plus généralement sur le bien-être des générations futures. Les réflexions sur le développement durable ne peuvent faire l'économie de la prise en compte des impacts de ces changements.

Répondre à ces préoccupations est donc une obligation politique, sociale et morale qu'il convient d'assumer. Mais les questions soulevées sont complexes et nécessitent une solide approche scientifique menée dans un contexte national décrit ci-dessous, dans un contexte européen (notamment à travers le 6<sup>e</sup> Programme Cadre de Recherche et de Développement Technologique de la Commission européenne) et dans un contexte mondial. Le GIEC (Groupement d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) mis en place en 1988 à la demande du G7 (groupe des 7 pays les plus riches) par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE), a publié à ce jour 3 rapports (1990, 1995, 2001). Ceux-ci indiquent de manière de plus en plus affirmative que le réchauffement climatique observé au cours du 20<sup>e</sup> siècle est en grande partie lié aux activités humaines, principalement au rejets de dioxyde de carbone et à la destruction de ses puits naturels. En effet, l'accroissement de la concentration de ce gaz dans l'atmosphère renforce l'effet de serre en piégeant le rayonnement thermique infrarouge naturellement émis par notre planète. Tout porte à croire que cet accroissement se poursuivra dans les prochaines décennies et que la planète continuera à se réchauffer au 21<sup>e</sup> siècle.

### GICC, la composante scientifique de la réponse nationale

---

Il convient donc en premier lieu d'asseoir sur des bases solides la compréhension de la variabilité du climat, sa prévision et celle de ses impacts, notamment dans les domaines les plus préoccupant pour les décideurs impliqués.

Le programme de recherche GICC (Gestion et Impacts du Changement Climatique) a été mis en place par le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD) et la Mission Interministérielle de l'Effet de Serre (MIES). La coordination en est déléguée au GIP MEDIAS-France. Ce programme fédérateur constitue **le volet "Impacts" du dispositif national de recherche sur le climat**. Il s'agit donc d'un programme à vocation pluridisciplinaire et interdisciplinaire, devant apporter des réponses scientifiquement fondées à tous ceux qui s'interrogent sur les risques climatiques futurs - décideurs locaux, régionaux et nationaux. Les recherches nécessaires mobilisent conjointement des équipes des diverses disciplines des sciences humaines et sociales, et des sciences physiques et biologiques.

L'objectif général est de développer les recherches finalisées dans le domaine des impacts du changement climatique et de leur maîtrise. Ces recherches visent à mettre au point les outils et les méthodes qui permettront aux pouvoirs publics et aux investisseurs d'optimiser les stratégies de prévention de l'augmentation de l'effet de serre et d'adaptation aux changements climatiques potentiels.

Pour assurer à la fois l'excellence scientifique du programme et le fait que celui-ci réponde aux attentes des principaux acteurs concernés, le programme est piloté par un Comité d'Orientation comprenant des représentants de divers Ministères et Institutions Publiques, qui s'appuient sur le jugement et les expertises indépendantes d'un Conseil Scientifique travaillant selon le principe de l'évaluation par les pairs.

Le programme GICC se compose aujourd'hui de deux phases (GICC-1 et GICC-2). Il opère par appel à propositions de recherche (APR) annuel. Ainsi, GICC-1 a émis des APR en 1999, 2000, 2001, 2002. GICC-2 a émis deux APR, en 2003 et en 2005, ainsi qu'un appel d'offres conjoint avec l'Institut Français de la Biodiversité (IFB) sur le thème "biodiversité et changement global".

Les projets de recherche sélectionnés suite à ces APR durent plusieurs années (typiquement 3 ans), de sorte que les programmes se chevauchent dans le temps. Ainsi GICC-1 couvre la période 1999-2005. GICC-2 a débuté avec la publication de l'APR 2003 en octobre 2003 ; celui-ci couvre la période 2004-2006. L'APR 2005 prend naturellement la suite.

La connaissance scientifique progresse régulièrement dans cette logique pluridisciplinaire et interdisciplinaire. Le Conseil scientifique veille à prendre en compte les acquis de la recherche et les préoccupations sociétales exprimées par le Comité d'Orientation pour définir les grands axes de chaque nouvel APR. Bien entendu, les actions de recherche sur le changement climatique menées au niveau européen sont également prises en compte. Le MEDD est engagé dans le programme européen ERA-NET CIRCLE, qui vise à fédérer les bailleurs de fonds de la recherche nationale en Europe pour une meilleure synergie.

## " Gestion et Impacts des Changements du Climat " (GICC) : A French Initiative

### Rationale

---

Global environmental and climate conditions fluctuate on all kind of spatio-temporal scales. Some fluctuations or change/trends are not only anthropogenic, but have different regional and national signatures. While the frequency of extreme events on smaller scales is changing, the public sector and general opinion become more and more aware and concerned of local impacts from global environmental and climate changes. Indeed, negative effects and feedbacks, might occur on ecosystems, natural resources, buildings and grounds, superstructures, economies, food security, public health... This is how, during 1999, a concerted French initiative led to the research program 'Management and Impacts of Climate Change' or 'Gestion et Impacts du Changement Climatique (GICC)' in French.

GICC is essentially managed by the Ministry of Ecology and Sustainable Development (Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, MEDD, in French), <http://www.environnement.gouv.fr> in close collaboration with the Inter-Ministerial Mission on Greenhouse Effect (Mission Interministérielle de l'Effet de Serre, MIES, in French) <http://www.effet-de-serre.gouv.fr>

The mission of GICC is to promote and develop scientific research on identifying national 'Impacts of Climate Change' and associated physical mechanisms. The main objective, downstream, is to provide sound scientific arguments in order to participate in the tuning of adaptive tools and techniques. This will allow policy and decision makers from the public sector to optimize strategies for prevention and mitigation of those impacts.

The latter objective is in-line with international discussions and results from the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) "<http://unfccc.int/>, and the "Kyoto Protocol, December 1997", <http://unfccc.int/resource/convkp.html>. It also fits directly within the government objectives of the 'Plan National de Lutte contre le Changement Climatique (PNLCC)' and of the 'Observatoire National des Effets du Réchauffement Climatique (ONERC)'.

The GICC structure is composed of a Steering Committee (with two co-Presidents from MEDD and MIES), a Scientific Council with a President, a permanent Secretariat. The overall coordination of the program is by MEDIAS-France.

The GICC overall partnership include Institutions, Agencies, Scientific Organizations and Universities:

### Main national institutions

- ✦ MEDD,
- ✦ MIES,
- ✦ ADEME, (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie, in French), Developing Environmental Technology, <http://www.ademe.fr>,
- ✦ DRAST (Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques, in French) <http://www.equipement.gouv.fr/recherche/drast/>,
- ✦ DRIRE (Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement, in French) <http://www.drire.gouv.fr>,
- ✦ MAAPAR (Agriculture, Food and Fishery, and Rural Affairs Ministry), <http://www.agriculture.gouv.fr>,
- ✦ Research and New Technology Ministry, <http://www.recherche.gouv.fr>

### Main scientific institutions

- ✦ CEMAGREF (Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement, in french), Protecting and managing ecosystems, <http://www.cemagref.fr>;
- ✦ CERFACS (Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique, in French), <http://www.cerfacs.fr>;
- ✦ CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement, in French), <http://www.cirad.fr>;
- ✦ CIRED (Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement, in French), Prospective on climate change, <http://www.centre-cired.fr>;
- ✦ CITEPA (Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution, in french), Assessment on GHG, <http://www.citepa.org>;
- ✦ CNRS/INSU (National Center for Scientific Research), <http://www.insu.cnrs-dir.fr>;
- ✦ INRA (Institut National de la Recherche Agronomique, in French), <http://www.inra.fr>;
- ✦ IPSL (Pierre-Simon-Laplace Institute), <http://www.ipsl.jussieu.fr>;
- ✦ IRD (Institut de Recherche pour le Développement, in French), <http://www.ird.fr>;
- ✦ MEDIAS-France, <http://www.medias.obs-mip.fr>;
- ✦ Météo-France / CNRM , <http://www.meteo.fr>;
- ✦ IFB (Institut Français de la Biodiversité, in French), <http://www.gis-ibf.org>.

### Other institutions

The list of the institutions involved in GICC may evolve with time. This list is updated in the French version of the present website.

### Implementation of GICC 1999-2006

---

Since 1999, GICC has been going through two phases:

### **The 1999-2003 period: GICC First Phase**

GICC started in 1999. Its first phase (1999-2006) included four calls for proposal, APR in French, ( APR 1999, APR 2000, APR 2001, APR 2002). Reports end evaluation from the different APRs are made available on the French version of the present website.

In parallel and in 2003-2004, the MIES has been developing the so-called 'Climate Plan' or 'Plan Climat', in French which is to contribute to the PNLCC. The 'Plan Climat' is based upon three principles :

- Insure that France follows agreements from the 'Kyoto Protocol' ;
- Participate in ways and means leading to reduction of greenhouse gases by 75% in 2050 ;
- Allow for reduction of pollution from transportation means.

The initial version of the 'Plan Climat' was endorsed in 2004. A review of the preliminary results was led during the so-called "Rendez-Vous Climat 2005", november 14-15, 2005, Paris. Input from GICC Phase One final reports are contributing to 'Plan Climat'.

The eight themes proposed by GICC-1 through APR 1999, APR 2000, APR 2001 and APR 2002 are as follows :

- Theme 1: Evolution scenarios of the average and extreme features of the XXI<sup>th</sup> Century climate,
- Theme 2: Interactions between climate, economy and society; related timescales,
- Theme 3: Role of carbon forest uptake and agricultural practices on climate policies,
- Theme 4: Links between national and international activities,
- Theme 5: Towards new inventories of GHG and aerosols (direct and indirect) emissions,
- Theme 6: Impacts on terrestrial biosphere,
- Theme 7: Impacts on hydrosystems,
- Theme 8: Impacts on public health.

A symposium presenting the available results of the GICC first phase has taken place in MEDD, Paris, 23rd & 24th November, 2004.

A final presentation workshop of the first phase took place in Paris, 11th & 12th May, 2006.

# **IMPACT DES CHANGEMENTS ANTHROPIQUES SUR LA FRÉQUENCE DES PHÉNOMÈNES EXTRÊMES DE VENT DE TEMPÉRATURE ET DE PRÉCIPITATIONS (IMFREX)**

**Michel Déqué**

Météo-France/Centre National de Recherches Météorologiques

Météo-France, le Centre Européen de Recherche et Formation Avancée en Calcul Scientifique, le Laboratoire de Géographie Physique, Électricité de France, le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Médias-France et l'Institut Pierre-Simon Laplace ont associé leurs efforts de 2003 à 2005 pour tenter de répondre à la question de l'impact que pourrait avoir le changement climatique d'origine anthropique sur la fréquence d'un certain nombre de phénomènes extrêmes sur la France métropolitaine et l'Atlantique tropical. Les hypothèses de départ sont le scénario GIEC-A2 et la fin du 21<sup>ème</sup> siècle telle que simulée par les modèles climatiques régionaux de Météo-France (ARPEGE) et de l'Institut Pierre-Simon Laplace (LMDZ). Les activités de recherches ont été déployées autour de cinq thèmes dont les principaux résultats sont donnés dans ce qui suit.

## **Constitution du site web**

Le produit phare du projet IMFREX est un site web dédié au projet et hébergé par Médias-France. Ce site public est consultable sur <http://medias.cnrs.fr/imfrex/>. Il est encore très fréquenté, notamment par les enseignants, étudiants ou lycéens en quête d'informations et d'illustrations sur le changement climatique en France. Il contient une base de données qui fournit sur requête des valeurs quotidiennes issues des simulations d'ARPEGE. Les données de LMDZ sont accessibles par des requêtes ftp. Pendant la durée du projet, ce site a également permis de délivrer aux partenaires les données quotidiennes de températures, précipitations, vent et neige observées. Des séries quotidiennes de référence (SQR) ont été développées spécifiquement pour le projet IMFREX en ce qui concerne la température et les précipitations. Ces séries ont été utilisées à la fois pour la calibration des modèles de climat et pour l'établissement des diagnostics climatiques sur le 20<sup>ème</sup> siècle. Les diagrammes calculés à partir de ces séries sont en libre accès sur ce site.

## **Confrontation des modèles aux observations**

Les projections sur la fin du 21<sup>ème</sup> siècle reposent uniquement sur les modèles numériques ARPEGE et LMDZ. Il est essentiel de connaître leur degré de précision dans la reproduction des phénomènes extrêmes du climat présent. Nous avons étudié la densité de probabilité des précipitations, températures minimales et maximales quotidiennes dans les simulations de référence des modèles. Pour chaque saison, nous avons comparé en chaque point de grille les fréquences observées interpolées sur la grille de chaque modèle. On constate que les erreurs systématiques dépendent de la plage de valeur. Le principal défaut commun aux deux modèles est de sous-estimer la fréquence des précipitations nulles. Par contre, ils sont capables de produire des précipitations intenses réalistes en hiver. Les indices proposés par le projet européen STARDEX ont été utilisés pour synthétiser les propriétés statistiques des séries par des cartes sur la France.

Les indices STARDEX ont également été calculés année par année pour les SQR pour évaluer la tendance observée au cours du 20<sup>ème</sup> siècle. L'analyse des résultats permet de mettre en évidence que les indices de température vont tous dans le sens d'un réchauffement marqué sur 1951-2000. Des traces d'augmentation de variabilité sont repérées sur les températures maximales. Pour les précipitations, on trouve des évolutions plus contrastées, hormis certains aspects comme l'augmentation

de la durée des périodes pluvieuses ou l'augmentation des sécheresses estivales. L'étude des températures moyennes dans les différents DOM-TOM montre un réchauffement significatif dans la plupart des régions sur la période 1976-2003.

### **Utilisation directe des sorties de modèle**

La façon la plus simple d'utiliser les modèles de climat est de considérer directement les valeurs quotidiennes issues des simulations. Il faut toutefois s'affranchir des erreurs systématiques des modèles. Cela se fait de manière triviale quand on considère le climat moyen: on calcule la différence entre la simulation perturbée et la simulation de référence. Pour les fréquences de phénomènes extrêmes, il a fallu développer une approche originale. En utilisant les SQR, nous avons calculé les centiles saisonniers de température (minimale et maximale diurne) et de précipitations. Ces valeurs nous ont permis de mettre en place une méthode de correction des sorties de modèle. Ces corrections ont été appliquées aux séries simulées pour la fin du 21<sup>ème</sup> siècle par ARPEGE et LMDZ. Les résultats pour ARPEGE montrent que la fréquence de températures minimales inférieures à -5°C devient négligeable dans un changement de climat, tandis que la fréquence de températures maximales supérieures à 35°C est multipliée par un facteur de 5 à 10. La comparaison avec les scénarios produits par LMDZ, moins pessimistes, se fait avec les mêmes indices que ceux utilisés dans la section précédente pour la validation (indices STARDEX). Pour prendre en compte la contribution atmosphérique complète à l'hydrologie de surface, un modèle de routage a été utilisé pour les quatre principaux fleuves français. On trouve en hiver et au printemps une augmentation des débits potentiels élevés. Pour les autres saisons, le scénario d'ARPEGE indique une diminution.

Deux expériences avec des versions d'ARPEGE à haute résolution sur les Antilles ont été analysées afin de déterminer les changements simulés en terme de nombre de trajectoires, nombre de jours et structures des ouragans de l'océan Atlantique tropical. Un logiciel de suivi des dépressions de moyennes latitudes, développé par Météo-France, a été adapté pour les besoins en détection de cyclones. Le calibrage des paramètres du logiciel a été réalisé de manière à obtenir le nombre d'ouragans climatologique. Les deux expériences diffèrent dans la réponse des ouragans: le nombre de trajectoires sur tout le domaine augmente pour la première expérience et diminue pour la seconde. Elles s'accordent néanmoins sur un affaiblissement de l'activité cyclonique sur le golfe du Mexique. Les résultats obtenus par le comptage direct des ouragans sont confirmés par le calcul indirect, fondé sur un indice de cyclogénèse à partir des variables d'environnement. Les précipitations associées aux systèmes cycloniques augmentent dans les deux expériences.

### **Adaptation statistique des sorties de modèle**

Pour certains paramètres, l'utilisation directe de sorties de modèle est impossible, soit parce qu'ils n'existent pas dans le modèle, soit parce qu'ils sont décrits de façon trop grossière et ne peuvent être corrigés par la méthode ci-dessus. On a alors recours à un modèle statistique pour calculer ce paramètre à partir de paramètres plus fiables fournis par le modèle numérique.

La fréquence des coulées de débris est susceptible d'évoluer dans un changement climatique. Une analyse des données de terrain dans le massif des Écrins a permis de construire un modèle statistique de probabilité de déclenchement des coulées de débris à partir de données lithologiques et atmosphériques. En utilisant les sorties ARPEGE et LMDZ pour le climat présent et le scénario, on trouve une diminution de la probabilité de déclenchement des coulées de débris non glaciaires de l'ordre de 30% et une augmentation de même amplitude pour les coulées de débris glaciaires. Cependant localement les variations peuvent être très différentes dans leur nature et leur intensité.

Un modèle statistique de détection de tendance dans les extrêmes a été construit et appliqué aux températures estivales observées (SQR). Il met en évidence une tendance significative sur le 20<sup>ème</sup> siècle. Des températures centennales peuvent ensuite être estimées en tenant compte de cette tendance. Comparativement, les températures centennales ont été directement évaluées à partir d'ARPEGE et LMDZ. L'extrapolation des observations permet d'atteindre la fourchette basse des températures centennales simulées par les modèles.

La fréquence des épisodes de neige collante est relativement réaliste en climat actuel simulé par les deux modèles. En climat de fin de 21<sup>ème</sup> siècle, la tendance est à la diminution de la fréquence du



phénomène par rapport à l'actuel, sans changement significatif dans la charge sur les lignes électriques lors de ces épisodes. Pour la charge de neige sur les bâtiments, les valeurs extrêmes sont évaluées à partir des observations au sol des hauteurs de neige maximales mensuelles et des sorties d'ARPEGE. La simulation montre pour la charge de neige des valeurs de retour à 50 ans fortement diminuées dans le scénario et des différenciations régionales atténuées.

Deux méthodes statistiques radicalement différentes ont été utilisées pour estimer les valeurs de retour à 50 ans du vent maximum en surface. L'une s'appuie sur une descente d'échelle du phénomène, l'autre sur une identification des perturbations. Elles s'accordent pour montrer aussi bien avec ARPEGE que LMDZ une légère augmentation dans la partie nord du pays et une diminution faible sur le pourtour méditerranéen.

### **Utilisation de paramètres de grande échelle**

Les méthodes statistiques ci-dessus s'appuient sur une relation locale entre les paramètres issus du modèle numérique et les paramètres d'étude. Une autre approche consiste à considérer l'ensemble des résultats du modèle un jour donné sur un grand domaine comme un tout, que l'on caractérise par l'appartenance à un régime de temps. On passe ensuite au paramètre d'étude en considérant les caractéristiques de ce paramètre dans les situations observées de ce régime de temps. L'outil de base de ces méthodes est la classification automatique.

La réanalyse ERA40 a été utilisée pour classer automatiquement les régimes de temps sur le domaine Europe-Atlantique à partir des champs quotidiens de géopotential à 500 hPa. Ces régimes ont été associés à des extrêmes sur la France. Pour l'hiver nous avons considéré les épisodes de jours très froids et les fortes précipitations ; pour l'été nous avons considéré les jours très chauds. On observe dans le scénario en hiver une augmentation de la fréquence relative de deux régimes (zonal et blocage), et une chute d'un troisième (anticyclone Groenlandais). En été, on observe une très forte hausse du régime blocage. Il en résulte qu'en hiver le risque des jours très froids diminue en général dans le pays. La probabilité des fortes précipitations diminue dans le sud, à exception de la région Languedoc-Roussillon. En été, l'augmentation de la fréquence des régimes blocage et zonal entraîne une hausse de la probabilité de températures très élevées.

Cette classification est également utilisée pour les tempêtes. L'algorithme de Météo-France de suivi automatique de systèmes dépressionnaire a été adapté à ERA40. La distribution des événements tempétueux et de leurs caractéristiques comme l'intensité ou la vitesse est calculée en fonction des régimes de temps. A partir de l'évolution des fréquences des régimes dans le scénario d'ARPEGE, il ressort de cette étude une augmentation modérée du risque de tempêtes sur la partie nord de la France. Aucun impact n'est décelable pour les fortes tempêtes touchant la moitié sud du pays, l'ensemble des systèmes ayant même tendance à voir une diminution de fréquence.

# Modelling regional-scale climate change of the Mediterranean\*

*Laurent Li*<sup>1</sup>, *Alexandra Bozec*<sup>2</sup>, *Samuel Somot*<sup>3</sup>, *Michel Crépon*<sup>2</sup>

<sup>1</sup> LMD/IPSL/CNRS, Université P. et M. Curie, Paris, France (li@lmd.jussieu.fr)

<sup>2</sup> LOCEAN/IPSL, Université P. et M. Curie, Paris, France (alexandra.bozec@lodyc.jussieu.fr; mc@lodyc.jussieu.fr)

<sup>3</sup> Météo-France, CNRM/GMGEC/EAC, Toulouse, France (samuel.somot@meteo.fr)

\* Article publié dans "CLIVAR newsletter Exchanges", numéro 37 (vol.11, no.2), avril 2006

## 1. Regionally-oriented climate scenarios

Regional climate changes under global warming context are the most important motivations for the Mediterranean regional climate modelling. It is generally agreed that the Mediterranean region is one of the sensitive areas on Earth in the context of global climate change, due to its position at the border of the climatologically determined Hadley cell and the consequent transition character between two very different climate regimes in the North and in the South.

In terms of global mean surface air temperature, the Globe has experienced a general warming of 0.6°C over the last century. IPCC estimated changes of the global temperature to be between 2 to 5°C at the end of the 21st century. The global mean temperature is only a mean indicator and changes at regional scales can be much larger. Many global and regional models tend to simulate a warming of several degrees (from 3 to 7°C) on the Mediterranean for the end of the 21st century and the warming in Summer is larger than the global average. There is also a general trend of a mean precipitation decrease for the region (especially in Summer), due mainly to the northward extension of the descending branch of the subtropical Hadley circulation.

In the framework of the French national programme GICC-MedWater, two regionally-oriented atmospheric models, LMDZ-Med (developed in IPSL in Paris) and ARPEGE-Med (developed in Météo-France in Toulouse), were used to study the Mediterranean climate change for the end of the 21st century. Both models are global atmospheric GCMs, but with stretched grid and increased spatial resolution over the Mediterranean. Unlike limited-area models, LMDZ-Med and ARPEGE-Med need only the SST and greenhouse gas concentration from global climate models to perform regionally-oriented climate change scenario simulations. We used only one emission scenario - IPCC SRES A2, but three global climate scenarios provided by three institutions (IPSL, CNRM and GFDL) running global ocean-atmosphere coupled models. Both LMDZ-Med and ARPEGE-Med were firstly run for the period 1970/1999 to produce their respective control simulations. LMDZ-Med was run furthermore for the three future scenarios for the period 2070/2099. ARPEGE-Med was run for the future scenario provided by CNRM. Table 1 summarizes the simulations used in the project GICC-MedWater.

The hydrological cycle is an important component of the Mediterranean regional climate. For the four future

scenario runs, Table 2 gives the annual-mean values for changes in E, P and E-minus-P. All the future climate simulations show a decrease of precipitation rate. Evaporation increases for LMDZ/IPSL, LMDZ/CNRM and ARPEGE/CNRM, but there is a very weak, insignificant decrease for LMDZ/GFDL. The net water deficit thus increases in all the four scenarios. The last column of Table 1 shows the gain of total heat flux at the sea surface for the three scenarios compared to the control simulation. We can see that the Mediterranean Sea wins (or loses less) energy from the atmosphere for future climate scenarios. The net gain of heat flux varies from 3.6 to 11.9 W/m<sup>2</sup> for different runs.

Simulation	period	Conditions
LMDZ/CTRL	1970/1999	Control simulation
ARPEGE/CTRL	1970/1999	Control simulation
LMDZ/IPSL	2070/2099	Emission SRES-A2 Global climate IPSL
LMDZ/CNRM	2070/2099	Emission SRES-A2 Global climate CNRM
LMDZ/GFDL	2070/2099	Emission SRES-A2 Global climate GFDL
ARPEGE/CNRM	2070/2099	Emission SRES-A2 Global climate CNRM

Table 1: Different simulations with the corresponding time periods and boundary conditions.

Simulation	E	P	E-P	H
LMDZ/IPSL	39	-57	96	3.6
LMDZ/CNRM	57	-74	131	5.8
LMDZ/GFDL	-7	-20	13	11.9
ARPEGE/CNRM	120	-60	180	4.9

Table 2: Annual-mean changes of evaporation (E: mm/yr), precipitation (P: mm/yr), water deficit (E-P: mm/yr) and gain of heat flux (H: W/m<sup>2</sup>) for the whole Mediterranean Sea and for the four scenarios respectively.

## 2. Sensitivity of the Mediterranean thermohaline circulation to anthropogenic global warming

The Mediterranean Sea is a concentration basin with an evaporation rate much larger than the rainfall rate and river runoff, leading to increase in salt content. It is also a heating source to the atmosphere with annual decrease of temperature for water masses. The Mediterranean Sea is similar to a thermodynamic engine which transforms the inflowing light Atlantic water into dense deep

Mediterranean waters through air-sea coupling. This water transformation process generates thermohaline forcing which drives, in a large proportion, the Mediterranean marine general circulation. Convection can thus be observed in several places of the Mediterranean Sea, particularly, in the Gulf of Lions, Adriatic Sea, Aegean Sea and Levantine basin.

Here we investigate the sensitivity of the Mediterranean thermohaline circulation to global warming. As indicated in Table 2, the simultaneous increase of both surface temperature and water deficit could counteract each other in the possible evolution of the Mediterranean Sea thermohaline circulation (MTHC). A weakening or strengthening of the MTHC due to climate change could have an impact on the Mediterranean sea surface temperature and consequently on the climate of the surrounding areas. Through the Mediterranean Outflow Waters, changes of MTHC can furthermore influence the Atlantic Ocean and then the Atlantic and global thermohaline circulation. The Mediterranean marine ecosystems are also expected to be strongly influenced by the variation of marine circulation.

By using the regionally-oriented climate scenarios, as described in Table 1, Somot (2005) and Bozec (2006) studied the impact of global warming on the Mediterranean Sea thermohaline circulation. The Mediterranean Sea general circulation model is MED8, derived from the OPA oceanic model, with the horizontal resolution at 1/8 degree. Results on water mass properties are reported in Table 3. The increase of temperature and salinity is observed in the whole Mediterranean. In the case of LMDZ-Med, the increase of salinity is quite weak, due to an unrealistic restoring of the salinity to current climate values for the control and scenario runs.

	temperature (°C)			salinity (PSU)		
	total	upper	lower	total	upper	lower
LMDZ/CTRL	13.91	15.33	13.79	38.59	38.43	38.66
ARPEGE/CTRL	13.2	14.2	13.1	38.61	38.27	38.66
LMDZ/IPSL	0.31	1.25	0.15	0.02	0.08	0.00
LMDZ/CNRM	0.43	1.81	0.20	0.02	0.09	0.00
LMDZ/GFDL	0.49	2.13	0.22	0.02	0.07	0.00
ARPEGE/CNRM	1.0	2.0	0.8	0.18	0.31	0.16

Table 3: Temperature (°C) and salinity (PSU) for the control simulations LMDZ/CTRL and ARPEGE/CTRL, and their changes for the four scenario runs (LMDZ/IPSL, LMDZ/CNRM, LMDZ/GFDL and ARPEGE/CNRM).

"total" indicates the whole Mediterranean. "upper" indicates from 0 to 250 m. "lower" indicates from 250 m to the bottom.

Since the Gibraltar Strait is the only connection of the Mediterranean Sea with the global ocean, the water mass

transport and the associated properties can give an integrated indication of climate variation and changes in the Mediterranean basin. Table 4 gives the mass transport, temperature and salinity in the Gibraltar Strait simulated by MED8 using atmospheric forcings from LMDZ-Med and ARPEGE-Med for the control runs and scenario runs. We can see that the water mass transport is diminished when the climate is warmed. This diminution is also larger when the warming is stronger. In the case of LMDZ-Med, the properties of incoming water do not change very much, since the buffer zone in the Atlantic was not allowed to change. For the Mediterranean outflow on the bottom, both temperature and salinity are increased. This conclusion is confirmed in the ARPEGE/CNRM scenario, with the outflow slower, saltier and warmer for the end of the 21st century. Some recent observation-based studies revealed also a warmer and saltier trend for the Mediterranean deep water masses (Bethoux et al. 1990; Potter and Lozier 2004; Rixen et al. 2005), which is probably the manifestation of the ongoing anthropogenic global warming.

	surface inflow			bottom outflow		
	Tr	T	S	Tr	T	S
LMDZ/CTRL	0.656	16.44	36.45	0.656	13.53	38.26
ARPEGE/CTRL	1.18	15.69	36.35	1.18	12.43	38.28
LMDZ/IPSL	-0.070	0.02	0.00	-0.070	1.15	0.15
LMDZ/CNRM	-0.013	0.16	0.00	-0.013	1.57	0.13
LMDZ/GFDL	-0.150	0.25	0.00	-0.150	1.84	0.09
ARPEGE/CNRM	-0.09	1.40	0.19	-0.09	2.01	0.44

Table 4: Mass transport (Tr: Sv), temperature (T: °C) and salinity (S: psu) in the Gibraltar Strait for the control simulations LMDZ/CTRL and ARPEGE/CTRL, and their changes for the four scenario runs (LMDZ/IPSL, LMDZ/CNRM, LMDZ/GFDL and ARPEGE/CNRM). Surface inflow and bottom outflow are presented separately.

### 3. Perspectives and Outlooks

By using a sequential and one-way approach, we show here that, under the global warming context, the Mediterranean Sea will have an increased water deficit and will enter into a stage with a weaker overturning circulation. This may further impact the marine ecosystem. Our study is only a first step toward an integrated study on the Mediterranean climate change and impact. Two important issues can be foreseen for the Mediterranean regional climate modelling in the next few years.

#### 3.1 Toward high-resolution Mediterranean climate modelling

The spatial resolution of future modelling systems will be further increased. It is expected to have regional atmospheric models with resolution around 10 to 20

kilometres in the next few years. Experience with numerical weather forecasting shows that higher spatial resolution usually leads to better prediction, mainly due to improvements in the representation of atmospheric instability which is crucially dependent on the model's spatial resolution. In climate modelling, higher spatial resolution may lead to improvements in some aspects and degradation in others. Climate is in fact more related to the sources and sinks of energy, moisture and momentum. Mechanisms controlling their budgets and evolution at different spatio-temporal scales are thus crucial for climate. In general higher spatial resolution models can provide a more comfortable background to incorporate sophisticated physics and the latter will improve the performance of regional climate models. For the Mediterranean region, high resolution is particularly important, since there is a very complex terrain surrounding the Mediterranean Sea, responsible for intense wind events, such as Mistral and Bora which contribute largely to oceanic convection in the Mediterranean (Gulf of Lions, Adriatic Sea, and Aegean Sea).

The overall studies reported in the current scientific literature seem to show improved model performance with higher spatial resolution, especially in reproducing extreme events, such as strong precipitation episodes and cyclogenesis often related to the specific surface orography. But there is indeed a need to further evaluate and quantify the impacts of spatial resolution on regional climate simulation. Even in the most advanced high-resolution regional climate models, it will be difficult, in some cases, to determine dynamically the hydrological variables, such as run-off. Application of statistical methods will always be necessary to provide appropriate solutions for climate change impact studies.

### 3.2 Development and validation of integrated regional modelling systems

Other components controlling the regional climate will enter interactively into the regional modelling system. They include, through the most important items, the Mediterranean Sea general circulation, basin-scale hydrology, dynamic surface vegetation, land use, atmospheric chemistry, air pollution and man-made or desert-originated aerosols, marine and land-surface ecosystems. It is expected that new climate feedbacks and modes derived from the complex interaction among different components of the Mediterranean climate system might be discovered and quantified. Especially the regional atmosphere and Mediterranean Sea coupled models should receive high priority for their development and utilisation in the Mediterranean climate studies.

It is also necessary to emphasize the perspectives of multi-model ensemble approach for future Mediterranean regional climate modelling activities. This is the only way to assess the uncertainties of numerical

modelling for climate variation and probabilistic estimates for changes at long terms. Any climate impact considerations should take into account this aspect of probability.

In terms of global mean surface air temperature, it is generally agreed that the changes of the global temperature will be between 2 to 5 degrees at the end of the present century. In broad terms, the current thinking attributes about half of this range of uncertainty to uncertainties in the emission scenarios and half to uncertainties in the construction and use of global climate models. The use of regional climate models will further increase the uncertainty range. We need thus to use a hierarchy of global and regional models and to run ensemble simulations. This is just at the limit of our current computing capacity. A close cooperation with computer industry is thus necessary in the future to accomplish this task.

### **Acknowledgements**

This work is supported by the French national programme GICC (Gestion et Impact du Changement Climatique) through the project MedWater. Some more detailed results can be found in Li et al. (2006) and Ulbrich et al. (2006).

### **References**

- Bethoux, J.P., B. Gentili, J. Raunet, and D. Tailliez, 1990: Warming trend in the Western Mediterranean deep water, *Nature*, 347, 660-662.
- Bozec, A., 2006: La circulation thermohaline de la Mer Méditerranée sous des climats présent et futur. Ph.D thesis, LOCEAN, University of Paris, France.
- Somot, S., 2005: Modélisation climatique du bassin méditerranéen : variabilité et scénarios de changement climatique. Ph.D thesis, Météo-France, University of Toulouse, France.
- Somot, S., et al. 2006: Is the Mediterranean Sea Thermohaline Circulation Stable in a Climate Change Scenario ? *Climate Dynamics*, in revision.
- Li, L., et al. 2006: Regional Atmospheric, Marine Processes and Climate Modelling. In *Mediterranean climate variability and predictability* (Ed. P. Lionello), Elsevier, pp. 373-397.
- Potter, R. A., and M. S. Lozier, 2004: On the warming and salinification of the Mediterranean outflow waters in the North Atlantic. *Geophys. Res. Lett.*, 31, 1, L01202, doi: 10.1029/2003GL018161.
- Rixen, M., et al., 2005: The Western Mediterranean Deep Water: A proxy for climate change. *Geophys. Res. Lett.*, 32: L12608, doi:10.1029/2005GL022702.
- Ulbrich, U., et al., 2006: The Mediterranean Climate Change under Global Warming. In *Mediterranean climate variability and predictability* (Ed. P. Lionello), Elsevier, pp. 399-415.

**CONDITIONS DE**  
**L'ADDITIONNALITE DEVELOPPEMENTALE DU MDP**  
**ET**  
**ROLE DE L'AIDE PUBLIQUE AU DEVELOPPEMENT**

Sandrine Mathy, Khalil Hélioui, Christophe de Gouvello

**Sandrine Mathy**

Centre International de Recherche en Environnement et Développement (CIRED)  
UMR CNRS/EHESS/ENPC/ENGREF N° 8568

**Texte de la communication :**

L'étude menée consiste en trois évaluations méthodologiques de projets types MDP dans le secteur de la demande énergétique, pour des sources d'émissions diffuses, selon une progression spécifique : élargissement de l'échelle des projets.

L'objectif de la première étude est d'évaluer, dans le cas du Brésil, un projet MDP type visant à améliorer l'efficacité énergétique des réfrigérateurs. Pour ce faire, nous considérons un projet hypothétique selon lequel le gouvernement brésilien accorderait des remises aux réfrigérateurs sur-performants, c'est-à-dire aux équipements dont la consommation électrique est inférieure à celle du modèle standard (baseline), à hauteur de la valeur des émissions évitées. La baseline est définie de manière « prudente », en tant que technologie socialement optimale, méthode classiquement utilisée pour la détermination des standards d'efficacité énergétique. Afin de tester le projet envisagé, nous développons un modèle de simulation de la demande brésilienne de réfrigérateurs. Les résultats montrent que les distorsions des tarifs électriques, ajoutées aux contraintes financières pénalisant les ménages pauvres, peuvent être à l'origine, d'une part, d'écarts importants entre le scénario du laisser-faire et les baselines théoriques et, d'autre part, d'un taux élevé de *free-riding* ; et celui-ci apparaît d'autant plus prohibitif qu'il bénéficie principalement aux ménages les plus aisés. Ces résultats montrent les limites, pour le secteur résidentiel, d'une application abrupte des modalités du MDP, et les nécessités de l'adapter aux contraintes sociales et institutionnelles des PED par la prise en compte des barrières au développement des projets.

C'est l'approche que nous adoptons dans la seconde étude avec comme champ d'application la diffusion technologique du gaz naturel véhicule dans les transports urbains passagers à Delhi (voitures particulières et bus). L'adoption de cette technologie apparaît pour les particuliers les plus riches comme une option sans-regret (alors que la diffusion spontanée de la technologie n'est pas constatée), mais la contrainte en capital est très forte pour les compagnies de bus. La faible dotation de la ville en réseau de distribution du gaz et la multiplicité des acteurs (technologiques, institutionnels, commerciaux) apparaissent comme les principales barrières freinant la réalisation du projet. L'étude donne lieu à la caractérisation d'un projet MDP pour lequel les crédits obtenus ne sont pas versés sous forme de rabais à l'achat des véhicules, mais permettent de lever les barrières et de financer à la fois un système de

distribution du gaz et un système de contrôle des émissions et rend incitatif l'adoption de politiques et mesures domestiques (taxe sur le diesel).

La troisième étude de cas est plus ambitieuse que les deux précédentes : peut-on considérer dans le cadre du MDP la mise en œuvre de projets plus proches encore des politiques de développement telles que les politiques de développement urbain ou le financement d'infrastructures. Jusqu'alors, les deux études effectuées ne visaient pas des projets entraînant un effet rebond majeur sur la demande de service final et les calculs des réductions d'émissions pouvaient se faire par l'amélioration d'un coefficient d'efficacité énergétique à demande finale fixée. Dans la dernière étude, nous appréhendons l'effet rebond *via* les projets de maîtrise de la demande finale de transports urbains passagers. Pour être éligible au MDP, l'évaluation des gains entraînés par un tel projet pose un problème spécifique aux modélisateurs : anticiper à la fois le transfert modal et l'impact sur le niveau absolu de la demande finale de service transport. Une description des comportements selon les couches sociales de la population de Delhi montre les comportements stratégiques entre localisation résidentielle, coût et temps de transports. Ceci nous conduit à élaborer une architecture de modélisation de la demande modale de transports prenant en compte à la fois les contraintes budgétaires et temporelles des usagers qui nous montre la complexité incontournable de la mesure des réductions d'émissions pour ces projets. Alors que dans l'étude précédente, une fixation conventionnelle de la tonne évitée était possible, dans ce cas, des coûts de transaction même élevés ne permettront pas de s'abstraire d'une forte incertitude. Dans ce cas, du fait de la forte inertie, s'en tenir à la mesure stricte des réductions à l'instant *t* conduit à sous estimer la valeur de long terme des tonnes non émises entraînant des irréversibilités structurelles et modifiant les coûts de réduction futurs. Ceci dépasse largement la notion de projet du MDP, mais la vraie dimension qui apparaît ici est que l'on voit bien que les politiques climatiques ne sont plus séparables des politiques de développement.

Celle-ci conduirait en outre à l'exclusion des pays à faible revenu pour lesquels les investissements notamment dans les infrastructures dépendent en grande partie des financements de l'APD, alors que les grands pays, principaux récipiendaires des investissements directs étrangers, et capables de lever des ressources locales, pourraient eux inscrire le financement des infrastructures dans le MDP. Une opportunité d'articulation des politiques climatiques avec les modes de financement du développement devrait viser la couverture des risques spécifiques au financement de ces projets de manière à rétablir une homogénéité géographique et rendre plus attractifs la venue d'investisseurs étrangers dans les pays ayant d'importants besoins en investissements.

## RECHERCHE SUR LES DROITS D'EMISSION : GESTION JURIDIQUE ET NEGOCIATION ECONOMIQUE DU CLIMAT

**Marie-Angèle HERMITTE**

### **Texte de la communication :**

Spécialiste de droit des biotechnologies, commencer à travailler sur la convention sur le changement climatique était pour moi à la fois difficile et stimulant. Après une première phase de recherche très ouverte, j'ai pu à mi-parcours présenter des pistes de recherches en relativement grand nombre, depuis le droit de la concurrence jusqu'à la nature juridique des quotas. C'est ce thème que le comité de pilotage m'a demandé de travailler de manière approfondie. Le résultat de cette recherche vient d'être publié dans le premier numéro des Annales de la régulation (vol.1-2006) dans le cadre de la quatrième partie, portant sur « La régulation des réseaux énergétiques ». L'article (42 pages) porte le titre : La nature juridique de quotas de gaz à effet de serre : une histoire intellectuelle.

Pourquoi cette expression, peut-être inattendue, « d'histoire intellectuelle » ?

Tout d'abord parce que ce sont les régions du monde, à l'origine réticentes au système des permis transférables qui les ont finalement imposés à la suite d'un *apprentissage*, tandis que l'Etat américain est resté à l'extérieur du modèle qu'il avait construit. Ensuite parce que l'organisation juridique qui fut nécessaire pour articuler des contraintes et des mécanismes de marché appelait l'élaboration de catégories inattendues comme l'idée d'une comptabilité des matières aussi bien que le recours aux plus anciennes catégories comme celle de police, devenue ici une police interétatique originale. Enfin parce que la doctrine juridique, partie de l'idée d'une qualification comme autorisation administrative, a été dépassée par les textes qui ont fait du quota un bien de droit privé.

L'article se divise donc en \*\* paragraphes

Le premier raconte l'invention d'une comptabilité des matières comme premier moment de la police interétatique des émissions de GES, avec le passage d'une liberté illimitée d'émettre, situation a-juridique à une liberté limitée, dans le cadre de l'énonciation de principes généraux du droit.

Le deuxième reprend la construction logique nécessaire à la mise en place du marché : unité de compte, quantité attribuée et droits d'émission.

Le troisième montre le passage du terme droit d'émission au terme quota et insiste sur l'existence scripturaire du quota et de ses mouvements.

Le quatrième permet de proposer une analyse de la nature et du régime juridique des quotas, en droit européen et en droit interne. C'est en droit européen que l'étude apporte sans doute l'essentiel des avancées concrètes par rapport à ce qui s'était écrit en la matière. En effet, la doctrine semblait assez hésitante ou muette, selon les auteurs, sur des points essentiels, en particulier le caractère discrétionnaire du pouvoir d'imposer des quotas, l'absence de droits acquis des titulaires de droits ou les caractères de la libre circulation des quotas une fois émis. Pourtant, la jurisprudence européenne en matière de quotas laitiers, de droits à planter ou de quotas de pêche est extrêmement abondante. Il s'agissait donc, en observant les ressemblances et les différences entre les situations, d'évaluer les possibilités et les limites de la transposition d'un secteur à l'autre.

En droit français, les choses sont apparues à la fois plus étranges car c'était le premier cas de qualification de bien mobilier ce qui était apparu jusque là comme une autorisation administrative, et plus simple car les achats et les ventes de ces choses matérialisées par une inscription en compte ne présentent pas de spécificité marquante. Un point reste mystérieux, celui du régime juridique des quotas dont dispose l'Etat avant de les avoir attribués.

## **UNE ANALYSE MULTIDISCIPLINAIRE DE L'ACCEPTABILITE DU PEAGE URBAIN**

Frédéric Deroubaix, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Matthieu Glachant, CERNA, Ecole des Mines de Paris

**Matthieu Glachant**

Depuis les travaux de Vickrey, la tarification de la circulation est considérée comme une voie d'intervention publique prometteuse du point de vue de l'efficacité économique pour limiter les externalités négatives liées à la circulation routière urbaine (émissions de gaz à effet de serre, pollutions atmosphériques locales, nuisances sonores, congestion urbaine). Mais le péage urbain pose des problèmes d'acceptabilité par le public, les élus ou les groupes d'intérêt concernés. Le projet consiste à mobiliser des analyses économiques, sociologiques et de science politique pour identifier les causes de ces difficultés dans le contexte français et analyser la relation entre efficacité économique et acceptabilité de la tarification de la circulation urbaine.

L'approche est multidisciplinaire et combine analyse économétrique des effets redistributifs de différentes formules tarifaires (tarification d'axes, de zones, à la durée, à l'accès,...), étude de cas (l'expérience difficile du péage urbain sur le périphérique nord de Lyon), analyse comparative (L'expérience londonienne par opposition à celle de Paris) et enquête de perception (organisation de "focus groups"). Dans cette intervention, nous avons choisi de nous limiter à la présentation des résultats de deux modules concernant l'analyse économétrique des effets redistributifs de quatre scénarios de péage urbain sur la ville de Paris et l'organisation des focus group.

### **1 Simulation des effets redistributifs de quatre scénarios de péage urbain à Paris**

Les arguments sur l'(in)équité sociale du péage urbain sont récurrents dans le débat public. Cette solution serait régressive en ce sens qu'elle imposerait les coûts les plus élevés aux individus à faibles revenus. A l'aide d'estimations économétriques du choix modal sur un échantillon de 3 300 déplacements domicile-travail en Ile de France, nous simulons l'effet de quatre scénarios de péage urbain pour caractériser la relation entre le revenu des automobilistes concernés et leur surplus. Nous montrons que l'instauration d'un péage urbain de zone réduisant de 20% le trafic, qu'il couvre Paris ou les dix premiers arrondissements, suscite une perte nette pour tous les automobilistes concernés d'environ 1 euro par déplacement. Le niveau de cette perte ne varie pas avec le niveau de revenu. Un péage de zone simple est donc neutre socialement à Paris.

Par rapport à ce scénario de référence, un péage cordon tarifant l'entrée dans Paris présente deux inconvénients : il augmente le niveau de la perte moyenne jusqu'à 1,4 euros, ce qui rend le scénario moins acceptable politiquement, et cette perte est plus élevée pour les bas revenus ; ce péage est donc régressif. Enfin, un péage de zone offrant une exemption partielle de 90% aux résidents comme à Londres est lui aussi régressif. Mais la perte moyenne des automobilistes est plus faible que celle suscitée par un péage de zone simple.



## 2 Analyse prospective des perceptions d'un péage urbain à Paris

Après avoir envisagé les effets redistributifs d'un péage urbain à Paris, il est intéressant d'analyser les rapports qui existent entre la perception des politiques actuelles de déplacement et les représentations que se font divers groupes sociaux de ces effets redistributifs.

Nous avons procédé à cette analyse en envisageant, dans le cadre de groupes de discussion, la reproductibilité de l'expérience du péage londonien à Paris. Nous avons choisi de construire ces groupes de discussion sur la base de groupes sociaux et professionnels préconstitués mais non directement concernés<sup>1</sup> : des élus locaux, des techniciens territoriaux, des représentants d'entreprises, des représentants d'associations d'usagers de différents modes de transports et des représentants du « grand public ».

Il faut tout d'abord insister sur les représentations très hétérogènes de la congestion qui émergent de ces groupes de discussions. Très peu de participants établissent de liens explicites entre congestion et effet de serre (et par conséquent décongestion et lutte contre l'effet de serre).

L'instrument tarifaire est loin d'être considéré comme illégitime et inopérant mais si la taxation des automobiles à l'arrêt est considérée par une majorité de groupes comme un outil possible et souhaitable, la taxation des déplacements apparaît encore pour une extrême majorité des acteurs comme un instrument diabolique.

Instrument diabolique tout d'abord parce qu'aux effets pervers incontrôlables. Le principal grief du péage urbain de zone serait ainsi d'accroître une coupure existante entre Paris et sa banlieue. Peut-être faut-il y voir un effet du dispositif d'enquête (une partie importante des enquêtés font partie de l'Est parisien), mais force est de reconnaître que la vision de l'équité des participants est une vision territoriale qui ne recouvre que très partiellement l'équité sociale qui est celle des économistes.

Instrument diabolique ensuite parce que définitif dans sa forme et exclusif de tous les autres outils des politiques de déplacement et notamment des politiques de rationnement par l'espace et des politiques de développement des transports collectifs existantes.

Il est dès lors très difficile pour les participants (exception faite des élus et de certains participants associatifs) de jouer le jeu de la transposition de Londres à Paris et de discuter des dispositifs envisageables, des niveaux de taxation et des exonérations possibles. Paradoxalement, l'aversion des participants pour la tarification des déplacements se conjugue avec une préférence très marquée pour un péage de zone dont le périmètre s'étend à Paris intra-muros ou à Paris intra-muros et son périphérique. Une formule conjuguant plusieurs zones n'est « en pratique » pas envisageable. Enfin si les participants saisissent bien la contrainte « économique » du prix permettant de réaliser un équilibre entre recettes recyclables dans les transports collectifs et limitation du trafic, en revanche ils considèrent que l'exonération des riverains de la zone ne soit pas une disposition socialement inéquitable.

---

<sup>1</sup> Nous avons fait le choix de ne pas retenir les représentants de groupes de pression d'une part, parce qu'on peut s'attendre à ce qu'ils aient des opinions préconstituées dont ils ne se défassent pas ou peu en raison de leur rôle de représentant, d'autre part parce que l'on connaît d'ores et déjà leurs positions Cf. *Tarifification des déplacements automobiles urbains, la question de l'acceptabilité*, décembre 2001, CERTU..

## BIODEGRADATION DES LITIÈRES ET SEQUESTRATION DU CARBONE DANS LES ECOSYSTEMES CULTIVES ET PERENNES

S. Recous<sup>1</sup>, J. Balesdent<sup>2</sup>, F. Barrois<sup>1</sup>, F. Coppens<sup>1</sup>, E. Dambrine<sup>3</sup>, P. Garnier<sup>1</sup>,  
E. Grehan<sup>1</sup>, P. Loiseau<sup>4</sup>, E. Personeni<sup>4</sup>, B. Zeller<sup>3</sup>

### P. Garnier

- 1 – INRA Unité d'Agronomie Laon-Reims-Mons,  
2 - UMR 6191 CNRS-CEA-Univ.de la Méditerranée, Laboratoire d'Ecologie Microbienne de la Rhizosphère Saint-Paul-lez-Durance  
3 - INRA Unité Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers, Nancy  
4 – INRA, Unité d'Agronomie, Clermont-F

L'objectif général scientifique du projet est de contribuer à l'évaluation des effets des modes d'occupation des sols et de leur gestion sur la séquestration du carbone, et les autres impacts environnementaux (notamment du point de vue de l'azote). Le mode d'occupation des terres (présence et nature des peuplements végétaux) et la gestion des sols (par exemple modalités d'apport de matières organiques fraîches –MOF– en provenance des peuplements ou exogènes, modalités de travail du sol, modalités de fertilisation N) sont des facteurs essentiels des processus de transformation des matières organiques (MO) des sols, et en particulier déterminent la minéralisation du C et de N (émissions de gaz à effet de serre, lessivage) ou sa rétention dans le sol (stockage de MO).

Cette étude est abordée d'une manière concertée par 4 équipes sur 3 situations « types » correspondant aux grandes zones agricoles (cultures annuelles incluant des cultures intermédiaires en période d'inter culture), forêts et prairies permanentes. Il s'agit de mieux comprendre les mécanismes initiaux qui déterminent le devenir des matières organiques entrant dans les sols, sous forme de litières végétales soit épigées soit racinaires. Dans ce projet les facteurs dont l'étude est privilégiée sont les caractéristiques chimiques initiales des résidus végétaux et leur localisation et ce pour l'ensemble des situations. Cette étude est innovante parce qu'elle met en œuvre le développement et l'utilisation de techniques d'enrichissement ou d'appauvrissement artificiel en isotope <sup>13</sup>C des litières végétales, y compris forestières, afin de déterminer à court et moyen terme le devenir du carbone introduit dans les sols. Elle associe la quantification des flux d'azote (du sol et des litières) à celle des flux de carbone, afin d'analyser les interactions entre les deux éléments, mais aussi quantifier et/ou simuler les impacts environnementaux liés à la dynamique de l'azote. Ce programme doit aboutir à une meilleure compréhension des mécanismes qui conduisent au stockage du carbone dans les sols. Il comporte un volet « modélisation » qui consiste à améliorer, sur les fonctions étudiées dans le projet (qualité des litières, type de sol et localisation notamment), le paramétrage du modèle ROTH-C de prévision des stocks de carbone des sols et du modèle PASTIS de prévision de la dynamique de l'eau, du carbone et de l'azote dans le sol

Ce projet a aussi eu pour vocation de mieux fédérer les concepts et les méthodes de communautés scientifiques jusqu'à présent relativement cloisonnées en raison des spécificités des agro-écosystèmes étudiés. Ce cloisonnement n'est absolument pas justifié en ce qui concerne le

fonctionnement des cycles biogéochimiques du carbone et de l'azote comme l'ont montré les résultats obtenus sur la qualité des litières végétales et leur biodégradation des trois agro-écosystèmes..

Le programme a été composé de programmes expérimentaux réalisés sur 3 situations correspondant aux trois agro-écosystèmes (cultures annuelles, prairie, forêt mettant en jeu des litières végétales (feuilles de hêtre, racines de Lolium et Dactyle, résidus de colza, jeunes plants de seigle) et des conditions de décomposition variées. Une expérimentation commune a été élaborée afin de préciser la biodégradabilité intrinsèque des cinq résidus ainsi que l'effet du type de sol sur les cinétiques de décomposition. Elle a permis de distinguer l'effet spécifique du mode d'occupation des sols (type d'espèce et type de litières retournant au sol) de celui du type de sol et des autres facteurs contrôlant la dynamique des matières organiques dans les sols (par exemple disponibilité de l'azote minéral). Basé sur ces résultats expérimentaux, le modèle ROTH-C a été utilisé avec succès, sans paramétrage spécifique pour simuler l'évolution des compartiments du carbone dans les sols.

En ce qui concerne la localisation initiale de la matière organique, soit en surface soit incorporée, notre étude montre qu'elle est très importante en condition de cycles d'infiltration-évaporation puisqu'elle conditionne les flux hydriques à la surface du sol et donc les conditions d'humidité des résidus végétaux. Les résidus localisés en mulch sont soumis à l'influence des cycles. Ils peuvent se dessécher plus rapidement et cela limite leur décomposition. La décomposition est plus rapide lorsque les résidus sont incorporés car ils restent plus humides. L'effet localisation dépend également de la qualité biochimique des résidus. Pour des résidus de colza, riche en fractions hémicellulosiques et lignines, l'effet de la localisation est très fort. Pour des résidus de seigle riche en carbone soluble et en azote, la localisation initiale n'a qu'un effet transitoire. Le module Mulch de Pastis a pu être calibré et testé avec ces expérimentations. Des scénarios avec le modèle Pastis, simulant une pluie en continue à la place de cycles d'infiltration-évaporation, ont montré que la localisation n'avait pas d'impact sur la décomposition. Cette étude montre donc que la localisation n'a d'influence sur la décomposition que par le biais des flux hydriques qu'elle peut modifier.

## Impact des dépôts azotés sur les changements de productivité des forêts : apports de la dendroisotopie

Elhani S.<sup>\*</sup>, Dupouey J.L.<sup>\*</sup>, Fernández Lema B.<sup>\*</sup>, Zeller B.<sup>\*\*</sup>,  
Brechet C.<sup>\*</sup>, Chabbert B.<sup>\*\*\*</sup>, Nys C.<sup>\*\*</sup>, Guehl J.M.<sup>\*</sup>

\* : UMR Ecologie et Ecophysiologie Forestières, INRA - Nancy

\*\* : Unité Cycles biogéochimiques, INRA - Nancy

\*\*\* : UMR-FARE, Equipe Parois et Matériaux Fibreux, INRA - Université de Reims

**communication présentée par Jean-Luc Dupouey, mail : dupouey@nancy.inra.fr**

Un résultat majeur obtenu au cours des dernières années dans le domaine de la recherche forestière consiste en la mise en évidence d'une augmentation de la productivité forestière depuis le début du XX<sup>ème</sup> siècle, ou même lors des dernières décennies, dans différentes parties de l'Europe. Cependant les causes précises de telles observations ne peuvent pas être clairement identifiées parmi les différentes composantes des changements environnementaux (CO<sub>2</sub> atmosphérique, dépôts azotés...), notamment parce que l'on manque encore de méthodes opérationnelles (par exemple indicateurs environnementaux simples, modèles de croissance) permettant de séparer les effets sylviculturaux et environnementaux dans l'analyse des tendances à long terme de la croissance.

Dans le présent projet nous avons cherché à développer des outils pour des approches rétrospectives dendro-écologiques, non seulement pour l'évaluation des changements de productivité passés ou en cours, mais également pour analyser les causes de ces changements. En particulier nous avons analysé l'apport potentiel des outils isotopiques, en combinaison avec les analyses classiques de largeur de cernes d'accroissement. Cette extension constitue une voie peu explorée à ce jour mais prometteuse car les signatures isotopiques naturelles peuvent être associées à des caractéristiques fonctionnelles à l'échelle de l'arbre ou à celle de l'écosystème, offrant ainsi la possibilité de définition de nouveaux indicateurs environnementaux fiables. Nous avons mis en œuvre une approche isotopique duale :

- Composition isotopique en azote ( $\delta^{15}\text{N}$ ). L'intensité des dépôts azotés atmosphériques peut affecter l'évolution du signal  $^{15}\text{N}$  des arbres à travers un effet direct de composition isotopique de la source azotée des arbres et à travers des effets indirects de discrimination isotopique liés aux processus aboutissant à des pertes en azote du sol (dénitrification, drainage...). L'interprétation de ces signatures  $^{15}\text{N}$  est compliquée par le fait qu'une partie de l'azote du bois est extrêmement mobile à l'échelle interannuelle, réduisant la résolution interannuelle du signal. Une phase de validation méthodologique restait nécessaire.

- La composition isotopique en carbone de la matière végétale ( $\delta^{13}\text{C}$ ) est un indicateur de l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE, rapport photosynthèse/transpiration). L'analyse rétrospective du  $\delta^{13}\text{C}$  des cernes a été effectuée sur fraction cellulose (carbone immobilisé) selon une procédure éprouvée et validée depuis plusieurs années dans l'unité EEF de l'INRA de Nancy.

Dans une première phase du projet, nous avons mis au point et testé l'approche  $^{15}\text{N}$  dans les cernes en nous focalisant sur le hêtre (*Fagus sylvatica* L.) et en mettant à profit une expérimentation de marquage artificiel fort préexistante. Plus précisément, il s'agissait de déterminer si l'élimination par extraction chimique de composés non liés aux structures pariétales, donnant accès à une fraction de composés azotés pariétaux 'immobilisés', permet d'améliorer l'analyse de la résolution temporelle du signal  $^{15}\text{N}$  dans les cernes successifs. La concentration [N] et la composition isotopique ( $\delta^{15}\text{N}$ ) de l'azote ont été mesurées dans les cernes annuels d'arbres d'un jeune peuplement du Nord-Est de la France, âgés de 16 ans. Les analyses ont été effectuées sur des échantillons de bois avant et après l'extraction des composés labiles par des solvants organiques. Les arbres ont été soumis à un enrichissement en  $^{15}\text{N}$  par une solution d'urée pulvérisée sur les feuilles. L'enrichissement a été effectué durant trois années

successives: 1993, 1994 et 1995. Les arbres ont été échantillonnés en 2001. Le  $\delta^{15}\text{N}$  du bois de l'arbre non marqué variait entre  $-4$  et  $-7$  ‰. Le marquage a conduit à une augmentation significative de  $\delta^{15}\text{N}$  dans le bois brut pour les années 1994, 1995 et 1996. On a également trouvé des valeurs élevées de  $\delta^{15}\text{N}$  dans les cernes formés avant et après la période de marquage. Cela traduit une forte mobilité de N entre les cernes. L'extraction a éliminé 36 % de l'azote total et 14 % du carbone. Cette procédure a permis d'améliorer la résolution inter-annuelle de [N] et  $\delta^{15}\text{N}$ . Son application autorise l'utilisation de ces variables en dendroécologie pour détecter les modifications isotopiques au niveau des sources de N utilisées par les arbres.

Dans une seconde phase, nous avons entrepris une validation plus affinée de l'approche  $^{15}\text{N}$  dans les cernes en exploitant une situation de marquage artificielle plus proche des conditions naturelles, liée à une expérimentation de fertilisation dans un peuplement âgé de 82 ans de hêtre en Forêt de Fougères (Bretagne). La résolution temporelle était étudiée ici par comparaison des cernes formés avant ou après fertilisation. Des analyses conjointes de largeur des cernes (croissance en diamètre) et de  $\delta^{13}\text{C}$  ont été effectuées. Quatre traitements de fertilisation (N, Ca, NPKCa et témoins non fertilisés) ont été considérés. La fertilisation a eu lieu au cours de deux années successives (1973 et 1974) vingt ans avant l'échantillonnage des carottes de bois. Dans le cas du traitement témoin non fertilisé, une diminution continue de  $\delta^{15}\text{N}$  était notée au cours du temps. Une nette divergence du signal  $\delta^{15}\text{N}$  était notée pour les traitements avec fertilisation (augmentation de  $\delta^{15}\text{N}$ ) comparativement au témoin (diminution de  $\delta^{15}\text{N}$ ) à partir du début de la fertilisation (1973). Ainsi nous avons pu détecter rétrospectivement de façon précise l'intervention de la nouvelle source azotée liée à la fertilisation. Le traitement NPKCa a eu l'effet le plus important sur la croissance radiale (+29% par rapport au témoin), cependant que le traitement N n'a pas affecté la croissance. Dans le cas du traitement N on a également noté une diminution de WUE par rapport au témoin durant 6 années après fertilisation alors que pour le traitement NPKCa aucun effet significatif n'était noté.

En conclusion, l'utilisation conjointe de différents isotopes ( $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$  et probablement aussi  $^{18}\text{O}$ ) en association avec les outils dendro-écologiques classiques s'avère potentiellement très pertinente pour l'interprétation causale environnementale des évolutions de productivité forestière. Il est possible maintenant de passer à la phase réellement opérationnelle concernant l'utilisation des isotopes stables comme indicateurs environnementaux dendro-écologiques. Nous nous attachons à rechercher les moyens et situations permettant d'aborder cette phase avec la considération de gradients géographiques dans le cadre de réseaux d'observations à grande échelle au niveau européen. Dans une perspective plus à long terme, il nous paraît nécessaire d'intégrer également une dimension modélisatrice dans une telle approche.

# FONCTIONNEMENT D'UNE COMMUNAUTE VEGETALE SOUMISE A UN RECHAUFFEMENT ATMOSPHERIQUE ET A UNE SECHERESSE EDAPHIQUE

Isabelle Chuine, Xavier Morin, Jacques Roy, Jean-Louis Salager, Laurette Sonié et M. Staudt

## Isabelle Chuine

Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive, CNRS, 1919 route de Mende, 34293 Montpellier cedex 5

### Texte de la communication :

Notre projet, intitulé ICCARE « Impact des changements climatiques sur la phénologie et l'évolution des aires de répartition d'espèces végétales ligneuses et herbacées » avait pour but

- de mesurer expérimentalement les changements de phénologie de différents types fonctionnels de plantes à une augmentation de température et une diminution du régime des précipitations ;
- de mesurer expérimentalement les conséquences de ces changements sur la survie, la croissance et le succès reproducteur des espèces et populations, ainsi que certaines composantes fonctionnelles des communautés ;
- à l'aide de ces résultats expérimentaux, développer le modèle d'aire de répartition, PHENOFIT, pour les trois espèces ligneuses du projet (chêne pédonculé, chêne pubescent, chêne vert).

Ce projet a été motivé par plusieurs études qui ont montré que l'impact du changement climatique était déjà perceptible, notamment au niveau de la répartition géographique des espèces animales et végétales et de leur phénologie, i.e. de l'apparition de certains événements biologiques cycliques en relation avec les variations saisonnières du climat (ex : période de floraison, de migration, etc). La méta-analyse de Parmesan et Yohe (2003), basées sur des études menées ces dernières années sur 1600 espèces animales ou végétales, montre qu'au cours du dernier siècle les répartitions géographiques des espèces (animales et végétales) se sont déplacées en moyenne de 6.1 km/décennie vers le nord ou de 6.1 m/décennie en altitude et que les événements phénologiques printaniers ont avancés de 2.3 j/décennies. La phénologie est donc un caractère qui est très affecté par le changement climatique et l'on peut se poser la question de savoir jusqu'à quel point sa plasticité lui permet de s'adapter à ce changement et quelles conséquences cela peut avoir sur les aires de répartition des espèces et le fonctionnement des communautés puisqu'il s'agit d'un caractère hautement adaptatif impliqué dans les aires de répartition des espèces (Chuine & Beaubien 2001) et le fonctionnement des écosystèmes.

Au cours de notre exposé nous ne présenterons que les deux premières parties du projet car le développement du modèle PHENOFIT pour les trois espèces de chêne est encore en cours de réalisation.

Nous avons étudié l'impact d'un réchauffement atmosphérique (+1.5° et +3°C) combiné à une sécheresse édaphique (-30% précipitation de mars à septembre) sur la phénologie, la croissance, la fécondité, la survie, et les émissions gazeuses d'une communauté végétale composée de ligneux au stade juvénile et d'espèces herbacées annuelles et pérennes, C3 et C4, monocotylédones et dicotylédones. La communauté était composée de 8 espèces herbacées, soit 4 couples d'espèces congénériques, l'une pérenne (P) l'autre annuelle (A) : *Setaria parviflora* (P), *S. viridis* (A), *Lolium perenne* (P), *L. rigidum* (A), *Amaranthus retroflexus* (A), *A. deflexus* (P), *Artemisia vulgaris* (P), *A. annua* (A) ; et de 3 espèces ligneuses : *Quercus robur*, *Q. pubescens* et *Q. ilex*. Chaque espèce était représentée par 2 à 4 populations d'origines géographiques très contrastées allant d'Estonie au Portugal. La communauté a été implantée sur un dispositif expérimental en plein champ au CEFE-CNRS (Montpellier) en 2002, composé de 30 placettes de 1.5 m<sup>2</sup> disposées selon 5 blocs de 6 traitements (3

niveaux de température x 2 niveaux de précipitation). Le réchauffement a été réalisé à l'aide de deux radiateurs infra-rouge (Vulcanic® Paris, 80 cm, 800 W) par placette suspendu à 1 m du sol et le traitement -30% de précipitation a été obtenu à l'aide d'un dispositif de gouttières couvrant 30% de la surface et se déployant lors de précipitation grâce à un capteur de pluie (12V Kemo® Germany).

Nos résultats montrent des différences significatives et importantes de phénologie, croissance et fécondité entre les populations d'une même espèce à de très rares exceptions près. Seule la température a eu des effets significatifs sur ces traits au cours des 4 années d'expérience mais la réponse des espèces-populations à la température n'a pas été linéaire. La phénologie est globalement avancée par la température, d'environ 4 à 5 j en moyenne par degré de réchauffement par rapport au témoin. Les espèces en C4 répondent davantage au réchauffement que celles en C3. La durée de végétation diminue avec la température pour les espèces annuelles de 2 à 3 jours par degré de réchauffement alors qu'elle augmente chez les ligneux décidus de 5 à 11 jours par degré de réchauffement. En revanche la durée de la période de reproduction diminue quelque soit le type d'espèce. Ces changements de phénologie ont des conséquences en termes de croissance et de fécondité. L'effet de la température sur la croissance et la fécondité est moins fort que celui sur la phénologie et il est positif et significatif chez les graminées C4 (+50%) mais négatif et non significatif chez les autres espèces. Parmi ces espèces, ce sont surtout les populations les plus méridionales qui montrent les plus fortes baisses de croissance et fécondité en réponse au réchauffement.

Nos résultats montrent que la réponse au réchauffement n'est pas linéaire. En particulier, pour la phénologie, nos résultats suggèrent que le degré de précocité de la feuillaison ou de la floraison observée chez les espèces au cours des dernières décennies ne devrait pas augmenter linéairement avec le réchauffement, et qu'à partir d'un certain degré de réchauffement (probablement entre 1°C et 1.5°C) cette tendance à la précocité devrait se ralentir. Ceci s'expliquerait d'après nos résultats de modélisation par la dualité du rôle de la température dans le développement des organes et par le fait qu'à partir d'un certain niveau de réchauffement la levée de dormance des organes à la sortie de l'hiver ne soit plus optimale (car elle requière des températures plutôt froides) et retarde le développement, alors que des températures plus élevées accélèrent le développement une fois la dormance levée.

Les mesures de production potentielle de composés organiques volatils (COV) montrent qu'à court et moyen termes, les émissions augmenteront si le stress hydrique reste limité. L'augmentation de température intensifiera les émissions foliaires, directement en augmentant le taux réel de formation de COV ainsi que la capacité potentielle à produire des COV, et indirectement en augmentant la période végétative. A long terme, les émissions de COV baisseront probablement du fait du stress hydrique, qui inhibera la production de COV diminuera la biomasse émettrice.

Des mesures de teneur en eau et de respiration du sol, et de photosynthèse nette ont été réalisées sur l'ensemble des placettes. L'augmentation de température diminue très légèrement l'humidité du sol, et stimule la photosynthèse à certaines périodes, avec un optimum à +1.5°C. Le résultat le plus intéressant actuellement concerne la respiration du sol qui est identique pour les trois niveaux de température, que ce soit en été ou en hiver. L'absence de stimulation de la respiration par l'augmentation de la température peut s'expliquer par l'effet négatif observé du traitement thermique sur l'humidité du sol, par la réduction du substrat carboné disponible pour la respiration (on a mesuré une diminution de la productivité primaire en condition de réchauffement) ainsi qu'éventuellement par une acclimatation des populations microbiennes à la température.

Chuine, I., et E. Beaubien. 2001. Phenology is a major determinant of temperate tree distributions. *Ecology Letters* 4:500-510.

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

Mots clés : changement climatique, phénologie, fonctionnement, VOC, espèces ligneuses, espèces herbacées

## Le projet GICC-Rhône

### Synthèse présentée par Etienne Leblois (coordinateur)

du projet mené par

E. Ledoux(1) , P. Viennot(1), D. Thiéry(2) , C. Golaz(2),  
N. Amraoui(2), N. Lamouroux(3), E. Leblois(4), J.M. Grésillon(4),  
J.C. Maihol(5), J.M. Gonzalez-Camacho(5), B. Lacaze(6) , N. Katiyar(6),  
C. Ottlé(7), S. Le Hégarat(7), L. Li(8), G.M. Saulnier(9),  
F. Hendrickx(10) , J. Gailhard(10), R. Garçon(10), A. Boone(11) ,  
P. Etchevers(11) , J. Noilhan(11), F. Habets(11) , T. Pellarin(11)

(1) CIG-ENSMP, (2) BRGM Service Eau, (3-5) Cemagref, (6) UMR5600,  
(7) CETP, (8) LMD, (9) LTHE, (10) EDF-DRD, (11) CNRM

### **Texte de la communication**

#### Résumé du projet

Le projet GICC-Rhône (1999-2004), qui a impliqué environ 25 personnes de plusieurs laboratoires, s'est intéressé aux impacts à prévoir sur la partie française du bassin du Rhône, dans le cas d'un changement climatique revenant à un doublement du CO<sub>2</sub> atmosphérique. Cette situation correspond approximativement à l'échéance 2050.

La voie retenue a été celle de la modélisation hydrologique déterministe du bassin versant du Rhône, complétée par une caractérisation des impacts associés. Les principales étapes ont été :

- d'évaluer le changement climatique global susceptible d'intervenir sous ce scénario 2 x CO<sub>2</sub>, à l'aide des sorties de plusieurs modèles de circulation générale atmosphérique ;
- de désagréger les indications météorologiques globales qui en résultent vers les échelles détaillées nécessaires à la modélisation hydrologique ;
- d'appliquer les forçages climatiques obtenus à plusieurs modèles hydrologiques de la partie française du bassin versant du Rhône ou d'affluents d'intérêt particulier ;
- d'analyser les résultats issus de ces modèles, afin d'évaluer l'effet du changement relatif à l'hydrosystème étudié.

Ont été examinés l'hydrologie générale des cours d'eau, préalable nécessaire à toute étude d'aléa hydrologique et de ressource en eau, ainsi que les impacts relatifs à divers domaines physiques, biologiques et socio-économiques : interactions entre eaux de surface et eaux souterraines, évolutions quantitatives et qualitatives possibles de la végétation, relation entre la ressource en eau et les systèmes agricoles irrigués, et enfin réaction des communautés ichtyologiques sous régime hydrologique modifié.

Le thème des incertitudes a fait l'objet d'une préoccupation constante ; l'idée générale a été au moins d'exprimer et si possible de quantifier ces incertitudes, par des moyens techniques eux-même objet de recherche. Pour permettre une telle étude le projet a eu recours à plusieurs modèles, tant au niveau des scénarios atmosphériques qu'à celui de la modélisation hydrologique.

#### Résultats de méthode

Les travaux de modélisation entrepris montrent que si on dispose d'un scénario atmosphérique :

- il est possible d'en décliner certaines conséquences hydrologiques ;



- la variabilité engendrée par la variété des processus en œuvre dans les différents bassins et par les méthodes de désagrégation temporelle et spatiale est telle que les conclusions peuvent différer profondément d'un bassin à un autre, et dépendent fortement de la grandeur hydrologique étudiée ;
- l'étude statistique des résultats hydrologiques permet cependant de dégager des tendances ;
- la mise en œuvre de représentations adaptées (diagramme de sensibilité) permet de montrer de façon ramassée combien les conclusions dépendent des caractéristiques propres des bassins concernés et du choix précis de la variable étudiée (nature de la variable, mais aussi support temporel (saison, durée, ...) et statistique (moyenne, quantile)). Certaines conclusions seront fermes, d'autre pas : la dispersion des scénarios atmosphériques dans le diagramme de sensibilité donne image de ce degré de fermeté ;
- la mise en œuvre de techniques d'exploration numérique des incertitudes adaptées (modélisation multi-objectif) permet de montrer que l'incertitude de calage des modèles hydrologiques n'est pas de nature à empêcher d'énoncer des conclusions relativement précises (ce qui suggère que si les modèles hydrologiques sont perfectibles, et certainement ils le sont, ce sera dans leur structure et non pas dans leurs algorithmes de calage).

La dispersion des « images du futur » que l'on obtient est principalement due à celle des scénarios atmosphériques de forçage censés représenter ces futurs possibles. Les incertitudes de calage des modèles hydrologiques distribués ne paraissent pas d'un ordre de grandeur suffisant pour que la substitution d'un jeu de paramètres de calage à un autre équivalent, ou la substitution d'un modèle à un autre, soient de nature à remettre en cause cette conclusion.

#### Résultats relatifs au bassin versant du Rhône

Pour la Saône, l'Ardèche et le Rhône dans son ensemble, les hauts débits tendent à augmenter, les eaux moyennes et les étiages à diminuer. Pour la Durance, au régime nival, on observe une diminution du pic de fonte et un débit plus soutenu en hiver, les deux aspects étant évidemment liés.

Ces conclusions dépendent fortement du scénario : si les crues augmentent d'environ 12% dans le scénario CNRM-HR, elles diminuent quelque peu dans le scénario LMD-HR. Par contre, l'évolution ne dépend guère du modèle hydrologique sous-jacent. Le contraste entre la Durance et de la Saône montre que l'impact est différenciée selon les processus dominants dans les bassins. L'évolution en diminution de la composante nivale est la plus nette conclusion que l'on puisse tirer pour ce qui est de l'eau en tant que ressource.

La simulation du manteau neigeux sur le bassin versant du Rhône fournit des résultats validés par comparaison avec les observations de hauteurs de neige et de débits. L'impact du réchauffement est une diminution générale des hauteurs de neige, de l'accumulation maximale et de la durée de l'enneigement. Cette diminution est forte à basse et moyenne altitude (réduction de 50 % du manteau neigeux, voire parfois disparition) et moins sensible en haute montagne (-20% pour l'accumulation maximale). Les surfaces enneigées pendant l'hiver diminuent en moyenne de 25 à 40 % suivant les scénarios. La fonte du manteau neigeux se produisant plus tôt et les précipitations neigeuses diminuant, les forts débits printaniers sont généralement réduits et ils apparaissent plus tôt (1 mois avant). Les débits hivernaux augmentent sensiblement (davantage de pluies hivernales), alors que les débits estivaux sont réduits de 50 % (assèchement plus marqué des sols). Ces tendances générales sont reproduites par tous les scénarios, à des degrés divers. Deux familles principales se distinguent : quatre scénarios « modérés » et deux « extrêmes » (dans le sens d'une réduction plus forte du manteau neigeux).

Quant à la biologie des écosystèmes aquatiques : si l'on considère comme plausible une réduction des débits mensuels secs sur le bassin de l'ordre de 30% - 40 % (plusieurs scénarios s'accordant là-dessus), une réduction moyenne de la proportion des espèces d'eau courante de 20% semble plausible. Elle pourrait concerner le nord-nord-est du bassin en particulier. Cette évolution pourra renforcer la régression générale de ces espèces en Europe (en particulier hotu, ombre commun, vandoise, barbeau), due à l'aménagement des cours d'eau.

Quant à la production agricole irriguée : le réchauffement climatique induit des doses d'arrosage plus élevées et moins variables. Une date précoce permet de décaler la période d'arrosages et de réduire la dose d'arrosage en août, période où la disponibilité en eau de la rivière est la plus faible. Une réduction de la dose de 45 % en moyenne, induit des pertes en rendement de 26 %, pour le climat présent et de 32 %, pour le climat futur. La variabilité du rendement passe de 4 % en conditions de satisfaction en eau optimales à 22 % en absence d'irrigation. L'augmentation de la demande en eau d'irrigation environ de 14 % ne peut qu'augmenter la fréquence des déficits en eau.

L'hypothèse d'une végétation potentielle qualitativement constante apparaît en soi manifestement fautive. Malgré cela, nous estimons que les évaluations d'hydrologie quantitative faites sur le bassin versant du Rhône dans le cadre de GICC-Rhône, avec l'hypothèse d'une végétation invariante, peuvent être considérées comme une approximation satisfaisante au premier ordre. Les arguments majeurs sont liés à la part relativement faible du territoire occupée par une végétation « spontanée », et surtout le fait que l'évolution de la végétation se fera sur une durée probablement plus longue que l'horizon 2050 étudié.

Le CNRM a évalué l'apport de la prise en compte d'une végétation interactive via l'utilisation du module ISBA A-gs. Dans les simulations en temps présent, bien que l'évolution de la végétation varie d'année en année et présente des maximums d'indice foliaire variables, les résultats d'ISBA A-gs ont montré une faible sensibilité aux variations de l'indice foliaire, et la variation inter-annuelle de la végétation ne modifie que faiblement le bilan hydrique simulé.

### Discussion des incertitudes

C'est la notion même de modèle qu'il convient de bien garder en mémoire pour ne pas faire dire à notre étude plus qu'elle ne prétend dire.

Un point sensible limite notre modélisation des variables hydrologiques en climat futur et notamment de leurs extrêmes. On peut le résumer comme suit : les MCG sont reconnus comme imparfaits ; on pense cependant que leur sensibilité au doublement de CO<sub>2</sub> (tendance des différents champs) est correcte ; ceci a induit une méthodologie de désagrégation particulière, la méthode des perturbations. Or, cette stratégie limite la pertinence du dispositif pour l'évaluation des extrêmes. Seules les fluctuations des valeurs moyennes mensuelles sont imprimées dans les champs des variables atmosphériques aux pas de temps tri horaires ou journaliers.

Un autre aspect à garder en mémoire est celui de l'équifinalité de calage des modèles hydrologiques, à savoir que toute une famille de jeux de paramètres peut rendre compte à un même degré des observations, pour un modèle dont la structure (géométrie et présentation des processus) est fixée. Un traitement possible de l'équifinalité est de considérer l'incertitude sur les paramètres comme ressortant d'un modèle mathématique qui reste à préciser compte-tenu des données (approche bayésienne). Moins contrainte mathématiquement, la méthode multi-objectif adoptée ici permet de bien montrer l'ordre de grandeur des incertitudes impliquées par l'équifinalité et, notamment, qu'elle est inférieure à la dispersion entre les scénarios atmosphériques.

La question de l'erreur de structure des modèles est plus délicate, en particulier elle n'est pas évaluable par de simples manipulations quantitatives. Nous l'avons abordée sous l'angle très pragmatique de la confrontation entre différents modèles, qui fournit une première vision de la dispersion des résultats attribuable à différentes formulations des phénomènes hydrologiques.

Les incertitudes de modélisation, réelles, sont très variables d'un bassin à l'autre et selon les variables étudiées. Cependant, les pires incertitudes ne concernent peut-être pas l'hydrologie, et toute amélioration des scénarios atmosphériques du futur aura des répercussions immédiates sur la précision et la fiabilité des projections hydrologiques.

## INFLUENCE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE ET BIOGEOCHIMIQUE DU BASSIN DE LA SEINE

Ducharne A<sup>1</sup>, Théry S<sup>1</sup>, Billen G<sup>1</sup>, Benoit M<sup>2</sup>, Brisson N<sup>3</sup>, Garnier J<sup>1</sup>, Kieken H<sup>4</sup>, Ledoux E<sup>5</sup>,  
Mary B<sup>6</sup>, Mignolet C<sup>2</sup>, Poux X<sup>4,7</sup>, Schott X<sup>2</sup>, Viennot P<sup>5</sup>

**Nom de la personne présentant la communication :**  
**Agnès Ducharne (Agnès.Ducharne@ccr.jussieu.fr)**

- 1 Laboratoire Sisyphe, CNRS / Université Pierre et Marie Curie, Paris
- 2 INRA, SAD, Mirecourt
- 3 INRA, Unité Climat, Sol et Environnement, Avignon
- 4 ENGREF, Groupe Recherche en Gestion sur les Territoires et l'Environnement, Paris
- 5 Laboratoire Sisyphe, Centre d'Informatique Géologique, ENSMP, Fontainebleau
- 6 INRA, Unité d'Agronomie Laon-Reims-Mons, Laon
- 7 AscA, Paris

### Texte de la communication :

L'objectif du projet GICC-Seine est d'étudier l'influence du changement climatique (CC), en relation avec les changements des contraintes anthropiques directes, sur la ressource en eau dans le bassin de la Seine. Ce projet ne se limite pas aux aspects hydrologiques du CC. Il vise aussi à analyser les conséquences directes et indirectes des modifications climatiques sur la qualité biogéochimique de l'hydrosystème (nutriments dont nitrates, oxygène, eutrophisation...).

Ce travail repose sur une démarche analytique, qui commence par découpler les différentes composantes du système, avant d'analyser leurs réponses croisées. Le seul élément qui fait l'objet d'une modélisation explicite est l'hydrosystème Seine. Nous avons utilisé un ensemble de 4 modèles, articulés au cours de la dernière décennie dans le cadre du programme PIREN-Seine pour simuler le fonctionnement hydrologique et biogéochimique de l'hydrosystème Seine (réseau hydrographique de surface, bassin versant hydrologique, système agricole et aquifères). Ces modèles permettent d'explorer et de quantifier l'impact croisé de 3 familles de scénarios portant sur les forçages de l'hydrosystème :

- scénarios de CC, basés sur 12 simulations du CC au cours du XXI<sup>ème</sup> siècle par des MCG, afin de couvrir une large gamme des incertitudes liées à ces simulations,
- scénarios d'évolution du bassin versant agricole et des rejets ponctuels aux cours d'eau, à l'horizon 2050-2100, par la méthode prospective des scénarios. Nous avons choisi de construire des scénarios contrastés, susceptibles d'avoir des impacts importants sur l'hydrosystème. Leur comparaison avec ceux du CC nous a ainsi permis de mieux cerner l'importance de ces derniers quant à l'évolution future du bassin.

Nous avons d'abord évalué les impacts directs du CC. En ce qui concerne l'hydrologie du bassin, nous avons montré une intensification des contrastes saisonniers du débit de la Seine qui se traduit par une diminution très robuste des débits d'étiages. L'évolution des débits de crue est en revanche moins

certaine. L'humidité de la zone racinaire diminue de manière systématique, mais les variations de niveau piézométrique des nappes aquifères restent généralement faibles. Nous avons aussi montré que les impacts directs du CC sur la production agricole du bassin de la Seine sont globalement positifs (cycles culturaux réduits, ce qui facilite la maturité complète des cultures ; augmentation du rendement des cultures). Le CC entraîne aussi une minéralisation accrue de l'azote du sol. Celle-ci s'accompagne d'une augmentation du flux de nitrates vers les nappes et des concentrations associées, qui dépassent à l'horizon 2100 la norme de potabilité dans une large fraction des aquifères.

Le scénario d'agriculture raisonnée permet en revanche de réduire notablement la concentration nitrique moyenne de l'eau infiltrée et dans les aquifères à l'horizon 2100. Les impacts de l'agriculture raisonnée et du CC sont du même ordre de grandeur mais opposés, et leur impact croisé indique que le CC annihile en large part l'influence positive de l'agriculture raisonnée sur la pollution azotée des aquifères du bassin.

Nous avons enfin simulé l'impact des 3 familles de scénarios des contraintes de l'hydrosystème (CC, agriculture, rejets ponctuels) sur la qualité biogéochimique de la Seine. L'impact le plus marquant est l'amélioration drastique de la qualité des cours d'eau par la réduction générale des rejets ponctuels dans les 3 scénarios construits à l'horizon 2050. A l'exception notable des nitrates, l'impact du CC est du même ordre de grandeur que celui des différences entre les 3 scénarios de rejets ponctuels, et donc très marginal par rapport à celui de la réduction générale des rejets selon ces 3 scénarios. Cet impact est largement dominé par celui du réchauffement de l'eau sur la dynamique des populations biologiques ; les rejets ponctuels étant réduits, il se traduit par une diminution accrue de l'eutrophisation. En ce qui concerne les concentrations en nitrate dans les cours d'eau, les trois familles de scénarios sont associées à des impacts du même ordre de grandeur (10 mgNO<sub>3</sub>/l environ). Par son influence sur les apports diffus en nitrates depuis les nappes et les sols agricoles, le CC augmente la teneur en nitrates dans les cours d'eau, alors que l'agriculture raisonnée comme la réduction des rejets ponctuels la diminuent.

En conclusion, l'impact du CC sur le bassin de la Seine, dessiné à l'horizon 2100 par l'ensemble de ces résultats, est loin d'être catastrophique. Cette image ne prétend bien sûr pas être une projection de l'état du bassin, car elle ignore nombre de facteurs de changements, liés ou non au CC, et qui constituent autant de perspectives à notre travail.

# **Impact de la variabilité climatique sur les ressources pélagiques et la distribution des prédateurs marins de l'Océan Austral (Terres Australes et antarctiques Françaises)**

Auteurs de la communication

**C.A. Bost<sup>1</sup>, J.B. Charrassin<sup>2</sup>, C. Cotté<sup>1</sup>, F. Bailleul<sup>1</sup>, L. Dubroca<sup>3</sup>, & C. Guinet<sup>1</sup>**

Nom de la personne présentant la communication

**C.A. Bost**

Affiliation des auteurs

**1 : Centre d'Etudes Biologiques de Chizé, CNRS , 7960 Villiers en Bois**

**2 : USM 402 - Equipe "Physique de l'Océan Austral", Département Milieux et Peuplements Aquatiques  
Muséum National d'Histoire Naturelle, 43 rue Cuvier, 75231 Paris Cedex 05**

**3 : Stazione Zoologica Anton Dohrn, Villa Comunale, 80121 Naples, Italie**

## **Texte de la communication :**

L'océan austral recèle des stocks considérables de ressources pélagiques encore peu exploités (poissons pélagiques, crustacés). En termes de biomasses et de diversité spécifique, l'importance de ces ressources est remarquable dans les eaux entourant les Terres Australes et antarctiques Françaises (DOM-TOM). Elles assurent une partie importante du transfert d'énergie de la production secondaire vers les niveaux supérieurs des chaînes trophiques et constituent la base de la nourriture pour de très importantes populations de prédateurs (oiseaux, pinnipèdes). Si les conséquences de l'ENSO sur les ressources marines tropicales sont bien documentées, son impact sur les ressources et les chaînes alimentaires de l'océan austral est beaucoup moins connu. A long terme, l'impact de la variabilité climatique reste une inconnue. Ces difficultés sont en partie liées à l'immensité des zones océaniques concernées et les difficultés logistiques dans l'échantillonnage in situ.

L'objectif de ce projet pluridisciplinaire a été d'évaluer l'impact des changements climatiques à court et à long terme sur l'abondance, la distribution de ressources pélagiques de l'océan Austral, par l'intermédiaire d'une approche originale, basée sur l'utilisation des principaux prédateurs (oiseaux marins, pinnipèdes, cétacés) comme auxiliaires océanographiques. Ces prédateurs intègrent spatio-temporellement l'ensemble des modifications intervenant dans les composantes physiques et trophiques de l'océan à plusieurs niveaux trophiques et sont très sensibles aux variations environnementales. Le principal site d'étude a été la partie indienne de l'océan Austral, notamment les Terres Australes et Antarctiques Françaises (T.A.A.F., DOM-TOM).

Trois axes de recherche ont été développés :

- I) Une analyse rétrospective des séries temporelles de distribution spatiale des prédateurs marins i) à moyen terme (15 ans) issues du suivi télémétrique de leurs déplacements pélagiques et ii) à long terme (données distributions de cétacés de la commission baleinière).
- II) Une simulation de l'abondance et de la distribution spatio-temporelle des ressources marines (du niveau trophique secondaire).

III) Une confrontation des séries de données prédateurs bio-indicateurs et des séries climatiques et océanographiques afin de déterminer dans quelle mesure les variations des paramètres bio-indicateurs peuvent être mises en relation avec les anomalies à moyen terme du système océan-atmosphère.

Un quatrième axe est encore en développement. Il concerne une approche prédictive de l'effet du changement climatique, basé sur un modèle intégré évoluant sous différents niveaux de forçages du système océan-climat.

Les informations bio-indicatrices des prédateurs ont été obtenues grâce à l'étude détaillée de leurs trajets alimentaires en haute mer, à partir de l'utilisation d'émetteurs miniaturisés et de capteurs. Les analyses de ces suivis (saisonniers et interannuels), ont permis d'évaluer la répartition spatiale des ressources en poissons pélagiques (myctophidés), à différents niveaux d'échelle et d'estimer l'abondance relative de ces poissons, via la mesure de l'effort de pêche des prédateurs étudiés (données de type "Catch Per Unit Effort"). Les analyses relatives à la production primaire sont issues des données hebdomadaires SeaWifs et ont été extraites sur l'austral global. La distribution des proies des poissons considérés a été établie au moyen des modèles développés par le laboratoire du LODyC ("modèle transfert trophique "forage"). Des index de production secondaire ont été développés en modélisant la transformation et le transport de la production secondaire par les champs de courants superficiels. Ces index de production secondaire sont paramétrés selon les caractéristiques des premiers stades de développement du krill antarctique *Euphausia superba*.

La variabilité climatique dans les zones océaniques concernées a été analysée à partir des données de télédétection spatiale et des stations hydrologiques de références. La circulation superficielle (intégrée jusqu'à la profondeur de la couche euphotique), a été calculée à partir des mesures de hauteur de la mer pour la composante géostrophique (données Topex-Poseidon) et à partir des mesures de vent pour la composante d'Ekman (données ERS et Quikscat). Localement le calcul d'un coefficient de corrélation a permis de mesurer l'association entre index de production secondaire et paramètres observés. Pour déterminer l'échelle spatiale de ces associations, les covariogrammes entre l'index de production secondaire et chacune des distributions observées ont été calculés. Les échelles spatiales caractéristiques des éventuelles associations ont été déterminées à partir de la portée du (ou des) variogramme(s) théorique(s).

Par rapport à l'axe 2, les principaux résultats montrent que malgré les processus de transports, production primaire et secondaire restent liées localement. Au-delà de 7000 km les processus ne sont plus liés. En dessous de cette valeur, 2 échelles spatiales structurent la covariance des 2 processus, à 1400 km et 4500 km.

Le zoom sur le site atelier de Kerguelen (échelle régionale) met en évidence une distribution relativement différente entre la concentration en chlorophylle *a* et l'index de production secondaire, suivant la circulation ouest-est dominant le secteur. L'index de production secondaire et la concentration en chlorophylle *a* restent corrélés positivement sur cette fenêtre. Le calcul du covariogramme met en évidence l'existence de deux échelles spatiales structurant les processus: 400 et 2400 km. Si la plus grande échelle relève des 2 secteurs productifs centrés à l'est et à l'ouest de Kerguelen, la première portée caractérise le rayon de décorrélation entre production primaire représentée ici par la concentration en chlorophylle *a* et l'index de production secondaire.

Par rapport à l'axe 3, les aspects méthodologiques ont concerné l'étude des relations entre la distribution en mer des prédateurs marins suivis par télémétrie et les conditions océanographiques, notamment les méthodes d'identification des échelles d'études pertinentes et de la géométrie spatiale (ou la forme) de ces relations.

Nous avons ensuite vérifié si les zones de production secondaire modélisées correspondaient aux zones de pêche des prédateurs marins supérieurs. Les sorties du modèle « forage » ont été confrontées à (1) la distribution de la chlorophylle *a* de surface, (2) la climatologie de la distribution des prises de 3 espèces de baleines (données IWC), (3) la distribution de l'otarie à fourrure antarctique et la distribution du manchot royal. Les travaux effectués ont permis de montrer que, malgré une forte variabilité inter-annuelle, la distribution dans le temps et dans l'espace des ressources marines accessibles aux prédateurs est relativement prévisible à grande échelle (centaine de km).

Les données bio-indicatrices des prédateurs montrent une grande cohérence avec les données des pêches scientifiques disponibles notamment au niveau des zones frontales.

-A grande échelle (océan austral, données cétacés), il n'existe pas de relation forte entre l'index de production secondaire (« forage ») et la distribution de grands cétacés (comme l'indique les coefficients de corrélation et la variographie.

A l'échelle régionale (Kerguelen, données otaries à fourrure), même si la relation n'est pas significative numériquement, les fortes concentrations en macro-zooplancton (données « forage ») se surperposent avec les zones préférentielles de pêche aux poissons pélagiques des prédateurs, à l'inverse des zones où la concentration en chlorophylle *a* est élevée.

Par rapport à l'axe 1 : A l'échelle du site de Crozet-Kerguelen, a été étudiée en détail l'évolution des relations entre hydrologie régionale et ressources lors de variabilité climatique à moyen terme. Les analyses des séries temporelles de distribution en mer des prédateurs (manchots, otaries) indiquent clairement un fort impact de la variabilité climatique (anomalies des températures de surface) sur les stocks de poissons pélagiques.

A long terme (>40 ans) et à très grande échelle spatiale (zone antarctique), l'analyse des données de la commission baleinière indique que les changements environnementaux en termes de couverture des glaces ont eu un impact majeur sur l'écosystème antarctique, particulièrement en mer de Weddell (qui contribue à la moitié de la production primaire associée à la glace de mer en Antarctique, et qui abrite également la majorité de la population de krill). Le retrait important de la glace mis en évidence a eu des conséquences très marquées sur la distribution des grands cétacés consommateurs de krill.

Sur le plan de la conservation, les analyses réalisées ont permis aussi d'identifier des habitats critiques pour la conservation des populations de prédateurs clés de ces écosystèmes marins (oiseaux, phoques, baleines).

Dans les perspectives de l'étude, il est prévu le développement d'un modèle prédictif évoluant sous différents niveaux de forçages du système océan austral - climat et concernant la zone d'étude des T.A.A.F.

-----

## QUANTIFICATION DES EMISSIONS DES PRECURSEURS DE L'OZONE PAR MODELISATION INVERSE

Claire Granier, Gabrielle Pétron et Aude Mieville  
Service d'Aéronomie/IPSL  
Paris

Philippe Ciais et Philippe Bousquet  
Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement/IPSL  
Gif-sur-Yvette

### Communication présentée par Aude Mieville

Les modifications des distributions des différents gaz à effet de serre depuis le début du siècle ont conduit à une augmentation significative du forçage climatique. Environ 62% de l'effet de serre anthropique est dû à l'augmentation des concentrations en CO<sub>2</sub>, 20% est dû à l'augmentation des concentrations en méthane, 4% et 14% de ce forçage étant dus aux augmentations respectives des concentrations du protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) et des différents chlorofluorocarbures. De plus, l'augmentation de la concentration d'ozone dans la troposphère due à l'augmentation des émissions du méthane (CH<sub>4</sub>) et des autres hydrocarbures, du monoxyde de carbone (CO) et des oxydes d'azote a conduit à un forçage supplémentaire de 10 à 15% depuis le début du XX<sup>ème</sup> siècle, lié à la production d'ozone dans la troposphère. Ces chiffres montrent que l'ensemble des perturbations directes et indirectes liées à l'augmentation des concentrations des gaz à effet de serre direct et de l'ozone dans la troposphère doit être pris en compte dans les évaluations des changements climatiques et dans les propositions de réduction des émissions des gaz à effet de serre. Dans ce cadre, l'objectif de notre projet était de quantifier les émissions de deux précurseurs de l'ozone troposphérique, le monoxyde de carbone (CO) et le méthane (CH<sub>4</sub>). La détermination précise des émissions de ces gaz aux échelles régionales et globales pourra alors servir de référence pour l'établissement de mesures de limitation de leurs émissions.

Nous présenterons ici nos travaux sur la quantification des émissions de monoxyde de carbone. CO joue un rôle important dans la chimie atmosphérique pour plusieurs raisons. En présence d'oxydes d'azote et de rayonnement ultraviolet, les réactions d'oxydation de ce gaz conduisent à la formation d'ozone. Dans la troposphère, CO est responsable d'environ 60% de la destruction du radical hydroxyle (OH), l'oxydant le plus efficace de l'atmosphère. L'oxydation par OH représente le principal puits pour de nombreux composés dont le CO, le CH<sub>4</sub>, et de nombreux autres gaz à effet de serre émis à la surface. CO a donc un rôle essentiel dans la détermination de la durée de vie du méthane et de nombreuses autres espèces. CO est émis directement à la surface de la terre par les activités industrielles, l'utilisation des combustibles fossiles, et la combustion de la biomasse. Des émissions de CO sont aussi dues à la végétation et à la photooxydation de la matière organique océanique. Environ un tiers de la concentration troposphérique de CO provient de plus de l'oxydation du méthane et des autres hydrocarbures émis soit par la végétation (isoprène, terpènes, etc...), soit lors des activités liées à l'industrialisation ou au transport. La durée de vie moyenne du CO dans la troposphère est d'environ 2 mois, et CO peut donc être transporté sur de grandes distances loin de ses zones d'émissions. Par contre, cette durée de vie est trop courte pour que ce gaz soit uniformément réparti dans la troposphère.

Les sources et les puits de CO sont bien connus qualitativement. Toutefois, le bilan quantitatif de CO aux échelles régionale et globale est toujours incertain. Les émissions de ce composé sont très variables dans l'espace et dans le temps, ce qui rend leur quantification à l'échelle globale difficile, et ne permet pas le développement d'inventaires précis et représentatifs. Depuis quelques années, des



mesures effectuées à la surface de la terre ou par des instruments embarqués sur avions ont permis de connaître les principales caractéristiques de CO dans la troposphère. Les instruments embarqués sur satellites fournissent depuis quelques années des informations sur les distributions quasi-globales de quelques espèces chimiquement actives. Le nombre croissant d'observations disponibles, ainsi que les récents développements des modèles globaux rendent désormais possible l'application des techniques de modélisation inverse visant à optimiser les bilans des espèces chimiquement actives. Notre projet avait pour but d'utiliser cet ensemble d'observations, de développer et de mettre en œuvre des méthodes de modélisation inverse pouvant être utilisées pour optimiser les émissions du CO.

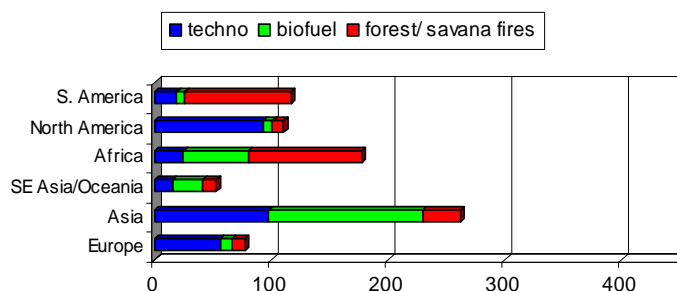
Les modèles de chimie-transport atmosphériques sont couramment utilisés pour l'étude de l'évolution des propriétés physico-chimiques de l'atmosphère à l'échelle globale. Ces modèles utilisent des inventaires d'émissions à la surface de gaz en trace et de particules comme conditions à la limite, et les distributions des composés chimiques pris en compte dans les modèles sont calculées en résolvant les équations de continuité. La composante du modèle résolvant le transport utilise des données provenant des analyses météorologiques pour des années spécifiques ou des données climatologiques. Dans le cadre de la modélisation inverse, les distributions calculées pour un composé sont comparées aux observations disponibles et les différences entre les deux distributions sont utilisées pour optimiser les paramètres les plus incertains, qui sont dans cette étude les émissions de monoxyde de carbone à la surface du globe.

La qualité des mesures de la composition de l'air ainsi que celle des modèles de chimie et transport atmosphériques ont stimulé la mise en œuvre de techniques inverses visant à utiliser les observations pour estimer les paramètres les plus incertains des modèles, et en particulier les émissions de gaz en trace et de particules à la surface du globe. Suivant l'exemple des développements effectués en météorologie en matière d'assimilation de données et les premières applications à la modélisation inverse du cycle du CO<sub>2</sub> dans la troposphère, nous avons développé des outils pour réduire les incertitudes sur les émissions à la surface du monoxyde de carbone. L'approche inverse choisie considère une variable d'état ou inconnue formée par une partition des émissions du gaz. Cette variable d'état est reliée au vecteur contenant les observations par un opérateur linéaire, appelé matrice d'observation. Cette matrice contient les fonctions-réponses aux différents sites d'observations pour chacun des flux de la partition d'émissions choisie. Le problème de la détermination des sources globales d'un traceur à partir d'observations de sa distribution dans l'atmosphère est un problème sous-contraint. Pour pouvoir déterminer une solution unique, la solution du problème inverse est cantonnée dans un voisinage autour d'une estimation *a priori* de la variable d'état. On parle alors d'inversion bayésienne. Des incertitudes ou erreurs sur l'estimation *a priori* et sur les observations sont fixées. L'étendue du voisinage dans lequel la solution se trouve est directement reliée à l'incertitude sur l'estimation des émissions *a priori*. Plus cet *a priori* est incertain et plus les erreurs sur les observations sont faibles, plus l'inversion pourra établir une estimation optimale «éloignée» de l'*a priori* afin de rapprocher les grandeurs simulées des observations.

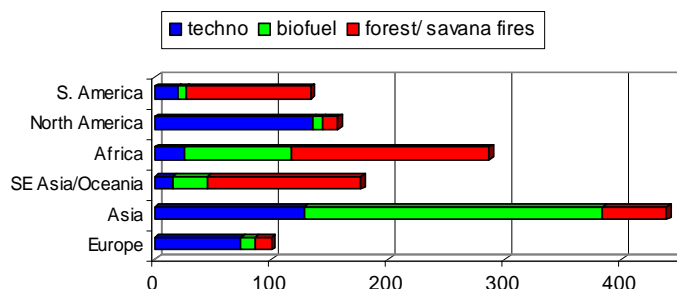
Dans le cadre de ce travail, nous avons développé des méthodes de modélisation inverse que nous avons appliquées à deux types d'observations. Nous présenterons les premiers résultats que nous avons obtenus, en utilisant dans un premier temps, des observations climatologiques recueillies par un ensemble de stations de surface, avec lesquelles nous avons optimisé les moyennes mensuelles des émissions des composés observés.

La deuxième étape du projet a consisté à adapter notre méthode pour qu'elle puisse utiliser le grand nombre d'observations fournies par les observations satellitales. Nous avons pour cela étudié les récentes distributions du monoxyde de carbone par l'expérience MOPITT embarquée sur la plateforme spatiale TERRA. Nous avons pu valider nos résultats par un ensemble d'observations indépendantes. La figure montre par exemple les émissions *a priori* et les émissions optimisées en utilisant les observations de MOPITT pour différentes régions du monde, sur la période avril 2000 – mars 2001.

### sources de CO a priori



### sources de CO a posteriori



Bilan des émissions de CO *a priori* (haut) et *a posteriori* (bas). La source anthropique directe de CO est de 874 Tg CO/an *a priori* et de 1214 Tg CO/an *a posteriori*.

Les résultats que nous avons obtenus ont ainsi contribué à une meilleure quantification des émissions à la surface du CO, sur lesquelles existent de grandes incertitudes. Nous avons ainsi mis en évidence par exemple une sous-estimation des émissions anthropiques en Asie, et déterminé des émissions plus précises des émissions dues à la combustion de la biomasse. En utilisant les émissions déterminées par modélisation inverse, nous avons de plus obtenu un bien meilleur accord entre les résultats des simulations effectuées au moyen d'un modèle de chimie-transport et les observations.

**Inventaire d'émissions d'aérosol carboné de 1860 à 2100**  
OU  
**Quelles émissions d'aérosol carboné**  
**pour un impact climatique régional/global significatif ?**

Auteurs : C. Liousse (1), C. Junker (1), B. Guillaume (1), R. Rosset (1), C. Michel (1), H. Cachier (2),  
B. Guinot (2), P. Criqui (3), S. Mima (3) et J.M. Grégoire (4)

**Nom de la personne présentant la communication : R. Rosset**

- (1) : Laboratoire d'Aérodologie, CNRS/OMP, Toulouse
- (2) : Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, CNRS/CEA, Gif sur Yvette
- (3) : LEPII-EPE, Grenoble
- (4) : JRC, Ispra, Italie.

Même s'il est sensiblement plus complexe à évaluer que celui des gaz à effet de serre (GES), le rôle climatique des aérosols est maintenant nettement avéré. De plus, il est au centre de nombreux débats, depuis qu'Hansen et al. (2000) ont montré que pour réduire le réchauffement climatique, l'effort devrait porter à la fois sur les réductions des émissions de GES mais également, des aérosols carbonés. Une étude plus récente encore a même suggéré qu'il serait plus efficace de réduire les émissions d'aérosol carboné que celles des gaz à effet de serre (Jacobson, 2002), car le temps de vie des aérosols est sensiblement plus court que celui des GES. Malheureusement, les énergies les plus propres en GES sont actuellement parmi les plus émettrices en particules carbonées. On comprend alors l'inquiétude des politiciens et des industriels à qui l'on avait conseillé de transformer les énergies « essence » en énergie « diesel », afin de limiter les émissions de GES, et qui réalisent aujourd'hui que la conséquence de cette transformation serait d'augmenter les émissions particulaires! Lors du workshop « Pollution- Climat » organisé par J. Hansen (Mai 2002), ces mêmes conférenciers s'étonnaient de cette complexité, renvoyant les scientifiques dans leurs laboratoires pour valider ces hypothèses.

Le but de notre programme s'inscrit dans cette thématique générale, puisque notre objectif est de construire un inventaire d'émission des particules carbonées de 1860 à 2100. La stratégie adoptée est, dans un premier temps, d'améliorer et de développer les inventaires actuels (1950 à 2003) des émissions par les fuels fossiles et les biofuels (feux à base de bois, charbon de bois, déchets agricoles etc.), de construire ceux du passé (1860-1949) et du futur (projection 2030-2100), puis d'étudier les émissions des feux de savane et de forêts à l'aide de l'imagerie satellitale.

Les résultats obtenus à partir d'une méthodologie se situant à l'interface entre expérimentation et modélisation sont le fruit d'une coopération active entre les principaux laboratoires participants (LA, LSCE, IEPE et JRC-Ispra). En voici les principales lignes.

- a) Révision et mise à jour des algorithmes permettant de calculer les distributions spatiales et temporelles des émissions par les fuels fossiles et les feux domestiques. Etablissement des inventaires d'émissions pour les fuels fossiles (trafic, industries..) et les feux domestiques (bois, charbon..), pour le carbone suie (BC), le carbone organique primaire (OCp) et le carbone organique total (OCtot), de **1950 à 2003**. Ces travaux ont permis de réviser les valeurs de facteurs d'émissions à partir des données récentes de la littérature et des échanges internationaux (cf parag. f) . Ils ont également mis en évidence l'importance des feux domestiques sur le bilan global des émissions de particules carbonées, tout particulièrement dans les pays en voie de développement (Junker et Liousse, 2006a).
- b) Etablissement des inventaires d'émission des fuels fossiles et des feux domestiques pour BC, OCp et OC tot, de **1860 à 2003**, en tenant compte des variations au cours du temps des consommations en fuels, du type d'activité et des facteurs d'émission (Junker et Liousse, 2006a). Pour la période 1860-1950, une nouvelle méthodologie a été mise en place à partir des données d'Etamad et al., 1991 et Mitchell et al. 1995 pour l'estimation de l'évolution des consommations de fuels, des données de la base de données UNSTAT pour l'évolution de l'utilisation des fuels et

des données de Pertuisot (1997) pour l'évolution des facteurs d'émission. Des comparaisons ont été menées sur les années communes 1950-1985, entre l'inventaire basé sur UNSTAT (cf parag. a) et l'inventaire basé sur Etemad et al., 1991 et Mitchell et al. 1995. Par ailleurs, nous avons pu montrer l'intérêt de prendre en compte des valeurs de facteurs d'émissions évolutives au cours du temps.

- c) Etablissement des inventaires d'émission pour les feux de biomasse à partir des surfaces brûlées détectées par imagerie satellitale, pour l'Afrique (1981-1991 et 2000, Lioussé et al., 2004, Lioussé et al., in preparation) et l'Asie (2000 et 2001, Michel et al., 2005). Ces résultats montrent l'importance de l'utilisation de la télédétection des surfaces brûlées dans le calcul des émissions, au lieu de statistiques moyennes, jusqu'ici communément employées. Ils montrent également une première comparaison d'inventaires établis à partir de deux méthodologies basées sur l'imagerie satellitale : respectivement, les méthodologies « surfaces brûlées » et « cartes de pixels de feux ». Au vu de ces conclusions, il est aujourd'hui important de favoriser le rapprochement des groupes qui travaillent sur ces deux types de méthodologies. Ce travail est en cours pour les projections passées et futures dans le cadre du programme GICC animé par Claire Granier.
- d) Etablissement d'inventaires d'émissions pour les fuels fossiles et les feux domestiques pour des projections futures. Des premiers inventaires d'émissions pour les fuels fossiles ont été réalisés pour l'horizon 2100, pour des scénarios « catastrophes » (scénario A2) et des scénarios « idéaux » (scénario B1), à partir des données IPCC (Lioussé et Cachier 2006). Compte tenu des nombreuses hypothèses avancées pour dériver les inventaires 2100, et de l'absence des feux domestiques, nous avons développé de nouveaux inventaires pour 2030, à partir de critères socio-économiques plus réalistes que ceux invoqués avec les données IPCC, et incluant de plus les sources de fuels fossiles et de feux domestiques (Junker et Lioussé, 2006b). Pour la période 1990-2030, les données de consommations de fuels par activité ont été obtenues à partir des données du modèle POLES de l'équipe de Criqui pour 2 scénarios (un scénario de référence « ref » de type business as usual et un scénario « ccc » répondant aux critères du protocole de Kyoto). Cette étude fait ressortir l'importance des contrôles d'émissions effectués entre les différents scénarios. Suivant le scénario ref ou ccc, les estimations des émissions de BC sont comprises dans une gamme entre 5.8 et 13.7 TgC (rappelons que le budget de BC est compris entre 0.6-100 TgC pour les scénarios 2100 B1 et 2100 A2 (Lioussé et Cachier, 2006)).
- e) Caractérisation des particules d'aérosol carboné à l'émission. Il s'est agi ici d'organiser une campagne expérimentale dans la chambre de combustion du LA, afin d'obtenir les caractéristiques physicochimiques des émissions de combustions méconnues (feux domestiques indiens et chinois à partir de charbons divers, de bois, de bouses d'animaux, etc..) et de les quantifier. Nous nous sommes particulièrement intéressés aux valeurs de facteurs d'émission des particules carbonées, ainsi qu'à leur taille. Il est important de noter que contrairement à nos attentes, les combustions de charbon émettent des particules carbonées de taille plutôt submicronique. Par ailleurs, les valeurs d'EF, plus élevées que celles citées dans la littérature, sont représentatives de combustions domestiques non contrôlées, typiques des pays en voie de développement. Dans un souci de meilleure intégration de ces données ( littérature et expériences récentes), nous avons déterminé une formulation théorique permettant d'obtenir les valeurs d'EF, ainsi que le rapport BC/OC, en fonction de paramètres permettant de décrire le type de combustion (par le biais du rapport généralement connu CO/CO<sub>2</sub>) . Cette relation a pu être validée au cours de notre expérience pour les feux domestiques.
- f) Mise à jour des différences entre les inventaires existant au niveau international et recherche de leurs causes. Il s'est agi d'organiser un atelier de travail international en juin 2002, où les spécialistes du domaine étaient rassemblés afin de mettre en évidence les raisons pour lesquelles les inventaires existants sont si différents, que ce soient sur la définition de l'aérosol, le choix des facteurs d'émission ou les méthodes de prélèvement et d'analyse utilisées. Les inventaires récemment développés (Bond et al., 2004, Lioussé et al., 2004, Junker and Lioussé, 2006ab, Guillaume et Lioussé, 2006, chapitre du livre IASAG en préparation) se sont appuyées sur les comparaisons effectuées pendant cet atelier. Lioussé et al., 2004 ont par exemple mentionné cet effort de coordination et de révision au niveau international pour le choix des EF des feux de savane et de forêts. Cependant, des recommandations claires sont aujourd'hui nécessaires compte tenu des disparités qui continuent d'exister entre les inventaires. Pour mieux comprendre ces différences nous avons par ailleurs développé des inventaires régionaux (échelle Europe 25kmx25km pour années 1995-2010, échelle France et région Marseille pour 2000 et à 10km et 1km de résolution respectivement) (Guillaume et Lioussé, 2006).

*NB : La construction de ces inventaires a été réalisée sous un format « base de données » avec l'aide technique de MEDIAS (CAPEDB : Database of Carbonaceous Aerosol Particle Emission), afin d'être facilement exploitables et accessibles. Ce travail s'est effectué en lien avec un programme financé par l'ADEME, centré sur le développement d'inventaires d'émissions régionaux et continentaux. La base de données sera accessible dès la publication d'articles sur ces différents travaux.*

## **Émissions de NO par les sols. Mesures, modélisation...**

Dominique Serça<sup>1</sup>, Patricia Laville<sup>2</sup>, Matthias Beekmann<sup>3</sup>, Catherine Hénault<sup>4</sup>, Benoît Gabrielle<sup>2</sup>, François Ravetta<sup>3</sup>, Jérôme Cortinovis<sup>1</sup>

### **Dominique Serça**

<sup>1</sup>LA Laboratoire d'Aérodologie, Toulouse

<sup>2</sup>INRA-EGC Environnement et Grandes Cultures, Grignon

<sup>3</sup>SA Service d'Aéronomie, Paris

<sup>4</sup>INRA-LMS Microbiologie des Sols, Dijon

Ce projet porte sur les échanges biosphère-atmosphère des NO<sub>x</sub> (NO+ NO<sub>2</sub>) en tant que gaz à effet de serre indirects (précurseurs O<sub>3</sub> troposphérique). Il s'appuie sur quatre laboratoires spécialisés à la fois dans les études à l'interface sol-plante-atmosphère, et dans les études de chimie de l'atmosphère. La méthodologie employée repose sur un ensemble de mesures in situ et en laboratoire destinées à améliorer les paramétrisations des émissions existantes, ainsi qu'à définir de nouvelles paramétrisations adaptées aux agro-écosystèmes rencontrés dans notre pays. Cette étude est complétée avec des outils de modélisation pour évaluer l'impact des émissions sur la chimie de l'atmosphère. Le principal résultat attendu étant l'inventaire des émissions à l'échelle du territoire national.

Les mesures in situ ont permis d'étudier la phénologie des émissions en relation avec les paramètres environnementaux (météorologiques, pédologiques, culturaux) pertinents. Les principaux développements réalisés pendant les deux premières années du projet (2002-2003) ont porté sur les développements méthodologiques des mesures in situ. Deux systèmes complémentaires et intercomparés des mesures de flux de NO ont été développés par le LA et l'INRA-EGC. Ces deux systèmes de mesures ont permis de constituer deux bases de données (deux sites et deux cultures, blé et maïs) d'émissions de NO et de données complémentaires pour la modélisation. Des résultats complets ont été obtenus permettant de dégager des paramétrisations des émissions en fonction de données telles que la température du sol, avec la mise en évidence d'un effet seuil à 10°C, l'humidité du sol, avec des effets de déclenchement des émissions pour des précipitation importantes (>10 mm) suivant les apports d'engrais. Les pertes totales suivant les apports d'engrais ont été estimées, et sont de l'ordre de grandeur (compris entre 0.3 à 2.7%) des pourcentages relevés dans la littérature. Les mesures en laboratoire ont permis d'établir un algorithme des émissions de NO en fonction des trois paramètres principaux que sont la température, l'humidité et la teneur en azote ammoniacal des sols. Cet algorithme adapté et simplifié a été utilisé dans la spatialisation des émissions de NO à l'échelle de la France. Cette spatialisation a été effectuée à l'aide de variables environnementales spatialisées et directement accessibles dans diverses bases de données (ECMWF) ou indirectement à partir d'enquêtes agricoles (quantités d'azote apportées, itinéraires techniques, occupation des sols par type de culture et par région). L'extrapolation spatiale et temporelle des émissions a permis d'aboutir au principal résultat attendu, à savoir l'inventaire des émissions à l'échelle du territoire national pour une année de référence (2002). Cet inventaire a permis de déterminer la contribution des NO<sub>x</sub> émis par les sols par rapport aux NO<sub>x</sub> totaux, et la proportion de NO<sub>x</sub> émis par les sols directement liés à l'utilisation d'engrais. A partir de notre étude portant sur 57% de la SAU en France, et en extrapolant les résultats à l'intégralité des surfaces arables, on trouve que les sols émettraient environ 5% du total des émissions de NO<sub>x</sub>. Sur ces 5%, seuls 20%, une quantité relativement faible au final, seraient liés à l'épandage d'engrais. L'impact de ces émissions sur la chimie de l'atmosphère a été évalué à l'aide du modèle de chimie-transport –CHIMERE. On a trouvé que les émissions biogéniques de NO<sub>x</sub> étaient presque partout minoritaires par rapport aux émissions industrielles, d'un facteur 10 en moyenne sur la France. En conséquence, l'impact de ces émissions sur les maxima journaliers d'ozone est relativement limité à l'échelle de l'Europe au mois de juin, mais peut atteindre de 2 à 3 ppb dans certaines régions du centre de la France pour cette même période.

# Sources et puits de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) en prairie pâturée et stratégies de réduction Projet GES prairies

*J-F Soussana<sup>1</sup>, V Allard<sup>1</sup>, R Falcimagne<sup>1</sup>, E Ceschia<sup>1</sup>, P Berbigier<sup>2</sup>, C Hénault<sup>3</sup>, P Cellier<sup>4</sup>, P Laville<sup>4</sup>, C Martin<sup>5</sup>, C Pinares-Patino<sup>5</sup>, P Dhour<sup>6</sup>, J-L Fiorelli<sup>7</sup>, N Vuichard<sup>8</sup>, N Viovy<sup>8</sup> et P Ciais<sup>8</sup>*

1. INRA, Clermont-Ferrand, UR 0874, équipe Fonctionnement et Gestion de l'Ecosystème Prairial
2. INRA Bordeaux – UMR EPHYSE
3. INRA Dijon – Microbiologie des Sols (UR 29-111)
4. INRA Grignon – Environnement et Grandes Cultures (UR 11-1091)
5. INRA Theix – Unité de Recherches sur les Herbivores (URH - UR 23-1053)
6. INRA Domaine des Mont Dore (UR 23-1053)
7. INRA Mirecourt – Systèmes Agraires et Développement (UR 12-55)
8. UMR CEA-CNRS Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE)

## **Introduction**

Dans le cadre du protocole de Kyoto sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES), divers écosystèmes dont les prairies peuvent jouer un rôle important pour la séquestration du carbone dans les sols. En effet, ce type d'écosystème utilisé par l'élevage couvre plus de 20 % du territoire métropolitain français. Dans le cadre des politiques environnementales post-Kyoto, une stratégie de conservation des prairies françaises et d'adaptation de leur gestion pourrait permettre de favoriser le stockage de carbone dans les sols, mais elle pourrait également s'accompagner d'émissions accrues de CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> (par les ruminants au pâturage) et de N<sub>2</sub>O (par les sols).

L'expertise collective réalisée par l'INRA à la demande du MEDD sur le stockage de carbone dans les sols agricoles français a permis de montrer que la conversion de cultures en prairies s'accompagnait d'un stockage de carbone moyen dans les sols de l'ordre de 0,5 tC ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> durant 20 ans. Toutefois, comme le soulignait cette expertise, de nombreuses incertitudes persistent en ce qui concerne le bilan de gaz à effet de serre des surfaces prairiales et des systèmes d'élevage. Trois gaz à effet de serre interviennent dans les échanges avec l'atmosphère dans une prairie pâturée : CO<sub>2</sub> (échangé avec les animaux, le sol et la végétation), N<sub>2</sub>O (émis par le sol), CH<sub>4</sub> (émis par les ruminants au pâturage). L'amplitude de ces flux dépend de nombreux facteurs, qu'ils soient liés au climat, au sol, à la végétation, à la gestion, ou à l'environnement global.

*Le projet **GES-Prairies** avait deux objectifs* : 1° Réduire les incertitudes concernant les flux de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O des prairies françaises et évaluer le bilan de gaz à effet de serre de ces surfaces. 2° Analyser les émissions nettes de fermes d'élevage bovin, puis construire et évaluer des scénarios de gestion permettant de réduire ces émissions nettes. Ce projet comprend trois volets aux échelles de la parcelle, de la ferme et de la région.

Ce projet a ensuite été intégré dans le projet européen FP5 'GreenGrass' (EC FP5 EVK2-CT2001-0105) coordonné par l'INRA (J-F Soussana). Nous résumons ici les principaux résultats obtenus.

## **Volet parcelle**

A l'échelle de la parcelle, les flux de CO<sub>2</sub> ont été mesurés en continu par la méthode des fluctuations turbulentes, les émissions de N<sub>2</sub>O par des chambres au sol et par des campagnes de mesures par diode

laser, le CH<sub>4</sub> éructé par les bovins au pâturage grâce à un traceur SF<sub>6</sub>. Ces mesures ont été réalisées durant au moins deux ans en 9 sites européens, dont le site de Laqueuille (UE des Mont-Dore). Le bilan de gaz à effet de serre (GES) a été calculé en considérant pour le CH<sub>4</sub> et le N<sub>2</sub>O un pouvoir de réchauffement global à l'horizon de 100 ans (IPCC, 1996). A Laqueuille (63, 1000 m alt.), les mesures des flux de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O ont été réalisées durant trois ans sur une prairie permanente préalablement gérée de manière intensive par la fauche et le pâturage. Depuis Avril 2002, cette prairie a été pâturée par des bovins en comparant deux traitements contrastés : pâturage intensif avec fertilisation azotée (1,0 Unité Gros Bétail UGB ha<sup>-1</sup> et 170 kg N ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>) et pâturage extensif (0,5 UGB ha<sup>-1</sup>) sans fertilisation.

Le bilan des trois premières années de mesures montre que les prairies pâturées représentent un puits net de carbone (NEE de -0,99 et -0,75 t C ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> dans les traitements intensif et extensif, respectivement). L'extensification (réduction du chargement animal et arrêt de la fertilisation azotée) a permis de stocker plus de carbone dans la prairie lors de la première année suivant la mise en place des traitements (NEE de -0,50 et -1,12 t C ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> dans les traitements intensif et extensif, respectivement) mais cet effet s'est inversé par la suite avec une NEE de -1,55 et -0,64 t C ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> dans les traitements intensif et extensif, respectivement, lors de la troisième année de mesure. Ces tendances ont également été simulées par le modèle PASIM, qui indique une forte activité de puits de carbone durant la première année après extensification par réduction du chargement animal mais aussi que le stockage de carbone obtenu dans la prairie gérée de manière extensive tend à décroître dans la durée aucune fertilisation azotée n'est apporté. L'extensification n'a pas entraîné d'augmentation significative par kilogramme de poids vif des émissions de méthane dues à la fermentation entérique des ruminants. Une faible activité d'oxydation de méthane par les sols a été mesurée. Les émissions de N<sub>2</sub>O ont présenté une forte variabilité spatiale (distribution log-normale) et temporelle. Les mesures indiquent des flux moyens faibles, correspondant à un facteur d'émission du N<sub>2</sub>O (selon la méthodologie IPCC) de 0,50% dans le traitement fertilisé. En moyenne sur trois ans de mesures, les deux traitements constituent un puits net de GES - 0,1 et -0,31 t équivalent C-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> dans les traitements intensifs et extensifs, respectivement).

En moyenne des 9 sites Européens, les échanges nets avec l'atmosphère (NEE) montrent que les prairies étudiées étaient des puits de CO<sub>2</sub>, d'une intensité (-2,5 tC-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>) comparable à celle de forêts tempérées.

- Les exportations de C organique (récoltes) étaient plus fortes que les apports (fumiers), le stockage net de carbone dans la prairie (NBP) était donc réduit de 63% par rapport au puits atmosphérique (0,9 tC-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>).
- Les émissions de N<sub>2</sub>O et de CH<sub>4</sub> (dans les sites pâturés) représentaient, respectivement, 6 et 20 % de la NEE.
- Au total, le bilan de GES attribué aux prairies correspond à un puits modéré (-0,4 tC-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>), avec une forte variabilité entre sites et entre années.

### **Volet ferme**

Un modèle (FARMSIM, couplé à PASIM) permettant de simuler le bilan de GES d'une ferme d'élevage a été mis au point et a été testé sur une ferme Lorraine d'élevage bovin mixte (lait et viande, chargement annuel moyen de 1,3 UGB ha<sup>-1</sup>) de 100 ha de SAU (dont 76 ha de prairies et 21 ha de cultures annuelles). Les résultats indiquent une émission nette annuelle de 175 t équivalent C-CO<sub>2</sub> pour cette ferme. Le bilan annuel de GES s'élève à 1,34 t équivalent C-CO<sub>2</sub> par UGB, ou encore à 0,54 kg C-CO<sub>2</sub> par kg de lait produit. Le stockage de carbone par les prairies (simulé par le modèle PASIM) constitue le seul puits de carbone de l'exploitation. Sans ce puits de 56 t équivalent C-CO<sub>2</sub>, le bilan de GES de la ferme simulée serait alourdi de près de 30 %. Les émissions directes du bétail (méthane éructé et CO<sub>2</sub> respiré) constitueraient le poste le plus lourd des émissions de la ferme (142 t équivalent C-CO<sub>2</sub>), le méthane



représentant un peu plus de la moitié de ce total. Plus de la moitié des émissions de N<sub>2</sub>O sur cette ferme seraient liées au stockage des déjections animales produites en stabulation. Malgré leur faible superficie, les 21 ha de cultures annuelles émettraient presque autant de N<sub>2</sub>O que les prairies. Plusieurs scénarios de réduction du bilan de GES ont été étudiés pour cette ferme.

Le bilan de 7 fermes d'élevage bovin en Europe indique, en moyenne, une source de GES pour le bilan au portail de la ferme des émissions directes. Cette source est plus forte (1,3 tC-CO<sub>2</sub> par hectare) quand on considère les émissions indirectes liées aux intrants (engrais, fuel, aliments concentrés) consommés par la ferme.

### **Volet régional**

Le modèle PASIM a été utilisé pour simuler les prairies européennes avec une résolution spatiale de 10' (environ 20\*20 kms). Pour chaque maille, l'analyse de sensibilité du modèle a permis de calculer un apport d'azote qui correspond à 30 % de la fertilisation qui maximiserait la croissance annuelle de la prairie. Les apports calculés varient en France de 150 à 300 kg N ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>, ce qui correspond assez bien aux pratiques agricoles sur les prés de fauche.

Des apports moindres sont simulés en pâture (le pâturage s'accompagnant d'un recyclage élevé d'azote) et dans le mode mixte où l'on combine sur un pixel des prairies fauchées et pâturées, au prorata des besoins alimentaires hivernaux et estivaux des troupeaux. La productivité végétale varie pour la France entre 4 et 6 t C ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>, soit de 10 à 15 tMS ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>. Les simulations réalisées sur le mode mixte fauche/pâture montrent que près de la moitié de la superficie en prairie est en moyenne consacrée à la fauche.

Les simulations indiquent des coefficients d'émission de N<sub>2</sub>O assez stables pour les différentes mailles en Europe, avec des valeurs qui sont de l'ordre de 1-2 % en fauche (apport d'azote minéral) et de 3-4 % en pâture (apport d'azote organique à partir des déjections animales). En régime de fauche, les simulations prédisent un stockage de carbone annuel important, dont l'amplitude varie de 0,5 à 6 tC ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>. Toutefois, une partie importante de ce stockage intervient dans le fourrage récolté (parties aériennes fauchées). Le stockage de carbone des prairies pâturées (0,3 à 2 tC ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>) est donc plus faible que celui des prairies fauchées.

Les simulations indiquent que les prairies fauchées constituent un important puits net pour les GES étudiés, l'amplitude de ce puits varie en France de 2,5 à 6 t équivalent C ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>. En revanche, les prairies pâturées à leur chargement animal potentiel constitueraient une source nette de GES, avec des flux variant en France de 0,5 à 2 t équivalent C ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>. Les simulations associant prairies fauchées et pâturées, au prorata des besoins créés par l'alimentation hivernale des troupeaux, indiquent pour la France un puits nets de GES avec des flux annuels de 2 à 3 t équivalent C ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>, qui correspondent toutefois à un stockage de carbone dans un pool labile (les fourrages récoltés).

### **Conclusions**

Le projet GES-Prairies a permis de réduire les incertitudes sur le bilan de gaz à effet de serre des prairies et des élevages bovins français. Ce projet a également facilité le lancement d'un projet européen FP5 qui a étendu nos connaissances à l'échelle du continent. Actuellement, les recherches se poursuivent dans le cadre de deux projets FP6 (CarboEurope IP et NitroEurope) dans lesquels la composante prairie est significative.

## CONSEQUENCES POTENTIELLES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES BIOCENOSSES AQUATIQUES ET RIVERAINES FRANÇAIS (2001-2003)

Pont D.<sup>1</sup>, Bady P.<sup>2</sup>, Boët P.<sup>3</sup>, Carrel G.<sup>1</sup>, Combe P.M.<sup>4</sup>, Doledec S.<sup>2</sup>, Dutartre A.<sup>5</sup>, Gorge G.<sup>6</sup>, Olivier J.M.<sup>2</sup>, Lamouroux N.<sup>7</sup>, Plante-Tabacchi A.M.<sup>8</sup>, Poirel A.<sup>9</sup>, Rogers C.<sup>1</sup>, Tabacchi E.<sup>8</sup>

### Présentation orale par PONT Didier

1 : CEMAGREF, UR Hydrobiologie. Grpt Aix en Provence. 3275, Route de Cézanne, CS 40061, 13182 aix en Provence Cedex 5, tel : 33 (0)4 42 66 99 75. e-mail : didier.pont@aix.cemagref.fr

2 : CNRS UMR 5023 Ecologie des Hydrosystèmes Fluviaux. Université Lyon 1

3 : CEMAGREF, UR Écosystèmes estuariens et Poissons migrateurs amphihalins. Grpt Bordeaux

4 : CNRS UMR 5601 Laboratoire d'Economie et de Gestion. U. de Bourgogne

5 : CEMAGREFUR Qualité eaux. Grpt Bordeaux

6 : CEMAGREF, UR Qualité et fonctionnement hydrologique des systèmes aquatiques. Grpt Antony

7 : CEMAGREFUR Hydroécologie Quantitative. Grpt Lyon

8 : CNRS UMR C5171 LABORATOIRE DYNAMIQUE de la BIODIVERSITÉ, U. P. Sabatier (Toulouse)

9 : EDF. DTG Grenoble

### RESUME DE LA COMMUNICATION

Les conséquences des changements climatiques planétaires sont susceptibles d'affecter de façon significative la plupart des écosystèmes. A l'échelle régionale, les modifications du climat auront de profondes répercussions sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes aquatiques et riverains.

L'objectif de notre programme de recherche est d'analyser dans quelle mesure les changements climatiques tels qu'actuellement attendus en France sont susceptibles :

- de favoriser la propagation des espèces végétales exotiques dans les milieux riverains et aquatiques, parfois au détriment des taxons autochtones,
- de modifier les peuplements de macro-invertébrés et de poissons des cours d'eau français,
- de générer de multiples enjeux socio-économiques

Les résultats attendus sont :

- de mettre en évidence les types d'habitats et/ou les zones géographiques pour lesquels les conséquences biologiques du réchauffement climatique seront les plus marquées,
- de préciser la sensibilité potentielle des espèces ou des taxons face aux changements climatiques à l'échelle de leurs aires de répartition sur le territoire national,
- d'analyser les conséquences liées à la perte d'habitats favorables sur des réseaux hydrographiques test,
- d'évaluer les risques d'expansion des espèces végétales exotiques,
- d'élaborer un cadre pour une réflexion cohérente autour des enjeux halieutiques et associés.

Notre méthodologie privilégie la modélisation à partir de l'exploitation de grandes bases de données existantes et la combinaison d'approches à différentes échelles (nationales et régionales). Ces objectifs sont accessibles dans la mesure où nous pourrions nous appuyer sur les scénarios et prévisions climatiques établis par les autres projets GICC et en particulier le programme GICC-Rhône (E. Leblois, prévisions hydrologiques) et le programme de Y. Polcher (scénarios globaux).

Le programme est structuré en 7 Actions :

Action 1 : Spatialisation des données thermiques à l'échelon national. UMR 5600, UMR 5023

Action 2 : Analyse des réponses biologiques à la variabilité climatique par l'examen de chroniques temporelles. UMR 5023, CEMAGREF Aix et Antony

Action 3 : Modélisation des réponses biologiques à l'échelon national. UMR 5023

Action 4 : Chantier « Adour-Garonne » : Typologie des réponses des espèces végétales exotiques. UMR 5576, CEMAGREF-Bordeaux

Action 5 : Chantier « Bassin du Rhône ». Réponses à la variabilité hydrologique et fragmentation des habitats dans un réseau hydrographique. UMR 5023 CEMAGREF Lyon

Action 6 : Chantier « Bassin de la Seine ». Sensibilité à la température des arbres de décision pour la prédiction des peuplements piscicoles. CEMAGREF-Anthony et Clermont-Ferrand

Action 7 : Enjeux halieutiques et associés. Réponses des acteurs. UMR 5601

Les méthodologies utilisées dans le cadre de cette étude relèvent :

- de l'usage des Systèmes d'Information Géographique en relation avec des techniques relevant de la géostatistique (Actions 1 et 6)
- de l'analyse exploratoire des données par des outils d'analyse multivariée (analyse de co-inertie multiple, Action 2), des procédures de lissage (Action 1,2 et 3), de la technique du hierarchical partitioning (Action 3)
- de la modélisation : modèles non linéaires mixtes (Action 5), modélisation logistique (Actions 3 et 4), arbre de décision (Action 4)
- du couplage de modèles décrivant des processus hydrologiques, hydrauliques et biologiques
- et, plus secondairement, de techniques d'enquêtes et d'expérimentation (Actions 4 et 7).

Seuls certains résultats du projet seront présentés lors de cette communication, et plus particulièrement ceux relatifs aux réponses des populations piscicoles

### **Spatialisation des données thermiques à l'échelon national.**

La création d'une base d'estimations des températures moyennes mensuelles 1980-99, soit 240 couvertures, présente un intérêt majeur : la possibilité de disposer d'une base homogène au niveau national, commun aux différents chantiers régionaux, et à partir de laquelle il a été possible d'élaborer des paramètres optimisés pour la modélisation écologique. L'interpolation a été effectuée à partir d'observations de 534 postes de la Météorologie Nationale, par le krigage des températures réduites au niveau de la mer en fonction du coefficient moyen du gradient thermique d'altitude en France. Les estimations furent ensuite transformées en estimations des températures vraies d'après les altitudes d'un M.N.T. kilométrique (EROS Data Center, USGS). Le contrôle indépendant sur une sélection aléatoire de 120 postes montre une erreur moyenne de  $\pm 0,59$  °C et de  $\pm 1,84$  °C à un intervalle de confiance à 95%, tandis que l'analyse par station de contrôle relève que certaines d'entre elles présentent des erreurs fortes, systématiquement positives ou négatives (situations atypiques). L'ensemble des estimations mensuelles a été constitué en base de données géoréférencée, diffusée aux équipes participant au programme AQUABIO.

Cinq simulations climatiques ont été prises en compte pour l'évaluation des impacts des changements thermiques sur les biocénoses aquatiques et riveraines. Quatre simulations à base résolution ont été mises à disposition par le Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD) du ISPL, Paris (modèles LMD6 A (Sechiba) et B (Bucket) et CNRM A et B). Une cinquième simulation à Haute résolution (simulation ARPEGE+ISBA sous HadCM3, à résolution variable) a été obtenue directement auprès du CNRM, Toulouse pour affiner la représentation spatiale. Alors que les anomalies thermiques des simulations à basse résolution ont été appliquées telle qu'elles au niveau des mailles de simulation (200 à 300 km de côté), les anomalies à haute résolution ont fait l'objet d'une interpolation régularisée (fonction Spline) pour assurer une certaine continuité spatiale. Les anomalies mensuelles ont été calculées par soustraction des valeurs de référence aux valeurs de simulation, puis appliqués aux températures actuelles du S.I.G.

### **Analyse des réponses piscicoles à la variabilité climatique par l'examen de chroniques temporelles.**

Sous nos latitudes, le succès de la reproduction des poissons des eaux courantes est largement contrôlé par la réalisation de conditions physiques favorables ; interaction complexe entre des variables environnementales périodiques et hautement prédictives telles que la durée du jour et la température, et d'autres facteurs abiotiques, nettement moins prévisibles, dépendants de l'hydrologie. La variabilité inter-annuelle du succès de la reproduction des poissons Cyprinidae a été étudiée à partir des données piscicoles collectées depuis 20 ans (1982 et 2001) au droit des sites nucléaires de la vallée du Rhône. Elle est mise en parallèle avec les données thermiques acquises dans le cadre de l'auto-contrôle de ces installations industrielles. L'analyse du régime thermique printanier et estival du Rhône à l'aval de Lyon a été réalisée à partir de 21 descripteurs de 4 chroniques journalières de températures enregistrées par Electricité de France depuis 25 années (1977-2001). Des modifications sensibles du régime sont intervenues depuis la fin des années 1980, traduites par un réchauffement, une précocité des différents seuils thermiques, une réduction de la durée de la période froide et une prolongation de la durée de la période la plus chaude. Si la température apparaît déterminante quant au succès de la reproduction des espèces étudiées, d'autres facteurs abiotiques tels que ceux associés à la variabilité hydrologique ne peuvent être ignorés dans l'étude de cette chronique piscicole.

### **Modélisation des distributions piscicoles à l'échelon national**

L'objectif est d'évaluer les conséquences potentielles du changement climatique sur les espèces de poissons dans les cours d'eau français en se focalisant plus particulièrement sur les aspects liés au réchauffement. De façon plus précise, il s'agit d'évaluer les modifications introduites par les différents scénarios thermiques dans la disponibilité en habitat favorable. Cette approche ne prend donc pas en compte les modifications hydrologiques, les influences des processus de dispersion et des interactions trophiques. Nous avons eu recours, en collaboration

avec le Conseil Supérieur de la Pêche, aux données du Réseau Hydrobiologique et Piscicole pour construire des modèles probabilistes prenant en compte la température de l'air au droit des stations, mais également le contexte hydro-morphologique et régional du tronçon de cours d'eau considéré.

Dans une première étape, et à l'aide de la méthode du Hierarchical Partitioning, nous avons évalué, pour les 13 espèces les plus communes, leur sensibilité relative à l'hydro-morphologie locale (pente et largeur mouillée), à la moyenne thermique annuelle et à l'appartenance à l'un des 4 grands bassins français (unité régionale limitant la dispersion). Pour la plupart des espèces, la pente locale du tronçon de cours d'eau est un paramètre majeur et induit une succession des taxons le long de ce gradient écologique. Pour toutes les espèces peuplant préférentiellement l'aval, on observe une réponse positive à l'accroissement de la superficie du bassin drainé, en accord avec la théorie d'un accroissement continu de la richesse le long du gradient longitudinal. La température est un facteur contributif important pour certaines espèces (Chabot, Truite et Ablette en particulier). Enfin, l'unité hydrographique est le facteur prépondérant pour le Chabot. Les faibles contributions observées pour l'amplitude thermique laissent à penser que ce paramètre n'est pas un excellent descripteur de la variabilité thermique intra annuelle et qu'il y a nécessité de recourir à une prise en compte plus fine de cette dernière (variabilité mensuelle).

Sur la base de ces premiers résultats, nous avons cherché à calibrer et à valider des modèles prédictifs de l'occurrence des espèces incluant en tant que variables explicatives, une description de l'habitat physique des espèces et des descripteurs de la variabilité thermique inter-saisonnière. En fonction de la biologie des espèces, nous avons défini quatre saisons biologiques. Par ailleurs, nous avons déterminé que la période optimale de calcul des moyennes thermiques saisonnières à associer à chaque pêche correspondait à une période de cinq ans précédant l'échantillonnage, soit la durée de vie de la plupart des espèces. Les optimums thermiques saisonniers simples ont été calculés pour les 25 taxons. Puis, des modèles de régression logistiques multiples incluant les descripteurs environnementaux les plus significatifs ont été calibrés et validés (matrices de confusion, Indice de Kappa). 22 espèces sont finalement correctement modélisées.

Nous avons alors simulé les réponses de ces taxons aux 5 scénarios de variabilité climatique disponibles afin d'évaluer les conséquences potentielles d'un doublement du CO<sub>2</sub> atmosphérique. En moyenne sur les 5 scénarios, 5 espèces présentent des réductions potentielles fortes de leurs occurrences sur les 792 stations concernées. Il s'agit de 4 espèces cryophiles (Truite, Chabot, Loche franche, Lamproie de Planer) et d'une espèce introduite, la Perche soleil. Pour la Truite, la Lamproie et la Loche, l'impact s'accroît progressivement en fonction de l'accroissement de l'anomalie thermique annuelle, avec des réductions d'occurrence nettes pour des anomalies supérieures à 2°C. Pour le Chabot, seul le scénario *ModMétéo* affecte de façon importante la distribution de cette espèce. A l'inverse, de nombreuses espèces de cyprinidés sont affectées positivement, et de façon continue avec l'accroissement de l'anomalie : Chevaine, Ablette, Perche, Hotu, Barbeau commun et Barbeau méridional. L'épinochette montre également une réponse similaire. Les modifications potentielles d'occurrence pour toutes ces espèces apparaissent importantes, en particulier pour les scénarios présentant des anomalies élevées, supérieures à 2°C (*ModCnrmA*, *ModMétéo*). Enfin, les modifications à attendre des aires de distribution sont fournies par bassin hydrographique et à l'aide de représentations cartographiques.

Les tendances décrites précédemment auraient ainsi des répercussions fortes sur les peuplements piscicoles avec de façon générale, une raréfaction des espèces actuellement caractéristiques des zones amont des réseaux et une extension des espèces de cyprinidés les plus rhéophiles vers ces zones amont. Pour de nombreuses espèces, les anomalies d'occurrence les plus faibles se situeraient dans les bassins côtiers de la Manche et en Bretagne. A l'inverse, l'occurrence de la truite serait gravement affectée sur le bassin de la Seine en raison de l'absence de zone d'altitude refuge.

#### **Facteurs climatiques et densité-dépendance.**

A l'échelle populationnelle, les fluctuations d'abondance des juvéniles de gardon (*Rutilus rutilus*) ont été étudiées sur une période de 11 années (1987-1997) au niveau de quatre secteurs du Bas-Rhône. La reproduction apparaît comme un événement synchrone sur tout l'axe rhodanien, indépendant de la distance entre les populations, et directement liée aux facteurs hydro-climatiques. Les températures moyennes de l'eau en juin expliquent ainsi 55 % de la variabilité du recrutement en fin de période de croissance. A l'inverse, l'analyse de la survie apparente des juvéniles durant leur premier hiver (conditions défavorables) met en évidence une liaison significative entre ce taux de survie et leur densité à la fin de leur première année de vie, soit un mécanisme de régulation de type densité-dépendant. Ces résultats peuvent expliquer la disparition du synchronisme inter-sites chez les juvéniles de un an. Ces résultats démontrent que les interactions biotiques peuvent atténuer de façon significative les conséquences de la variabilité climatique sur le stock d'individus reproducteur chez cette espèce.

#### **Sensibilité écologique des poissons aux anomalies hydrauliques**

Cette contribution est ciblée uniquement sur l'impact des changements hydrauliques (vitesses, hauteurs d'eau ...) sur les poissons. L'hydraulique est une caractéristique majeure de l'habitat des espèces aquatiques, qui guide leur

choix d'habitat comme leur stratégie évolutive à plus long terme. Une raison supplémentaire du choix de se focaliser sur les changements hydrauliques liés au climat est qu'il existe sur ce bassin des modèles quantitatifs validés reliant les peuplements aux conditions hydrauliques, modèles dont on peut estimer l'incertitude. Notre démarche se base sur le couplage d'une série de modèle reliant les anomalies biologiques aux anomalies hydrauliques, d'une part, et les anomalies hydrauliques aux anomalies hydrologiques mise en évidence par le GICC Rhône en réponse à des scénarios de doublement du CO2 atmosphérique.

La première leçon de cet exercice de modélisation est que nous sommes maintenant capables de réaliser des exercices quantitatifs de modélisation d'impacts biologiques de modification de débits à large échelle. Ce n'était pas possible il y a quelques années où les modèles d'habitat nécessaires pour cet exercice étaient trop complexes et trop peu validés. Répétons toutefois que l'utilisation de modèles d'impact biologiques 'agrégés' ne doit pas faire oublier qu'il impliquent un fonctionnement non-altéré de mécanismes biologiques, à l'échelle des individus, qui peuvent également être sujets à anomalies. C'est le côté 'dangereux' des modèles d'habitat simplifiés que nous utilisons à l'échelle des tronçons de cours d'eau.

Si l'on considère comme plausible une réduction des débits mensuels secs sur le bassin de l'ordre de 30% - 40 % (plusieurs scénarii s'accordant la dessus), une réduction moyenne de la proportion des espèces d'eau courante de 20% est également plausible. Elle pourrait concerner le nord-nord-est du bassin en particulier. Sans être 'catastrophique', cette évolution pourra renforcer la régression générale de ces espèces en Europe (en particulier hotu, ombre commun, vandoise, barbeau), due à l'aménagement des cours d'eau.

**Quantification des risques d'émergence d'épidémies à choléra  
dans le bassin méditerranéen en relation avec le changement  
climatique (CholClim)**

**Jean-François Guégan [pour le groupe CholClim]**

**Equipes participantes :** UMR IRD-CNRS 2724, Montpellier ; US IRD 140, Montpellier ; UMR 5119 CNRS - Université Montpellier II, Montpellier ; UMR 7625 CNRS - ENS, Paris ; IFREMER – Laboratoire de Microbiologie, Brest ; CERMICS, Ecole Nationale des Ponts-et-Chaussées, Marne La Vallée ; Medias-France, Toulouse.

Le choléra, dû aux souches pathogènes de la bactérie *Vibrio cholerae*, est une maladie très contagieuse, avec en 2004 au moins 100000 cas déclarés, principalement sur le continent africain. La nature autochtone de *V. cholerae* dans le milieu aquatique rappelle que cette bactérie, avant d'être pathogène pour l'homme, joue un rôle écologique dans son écosystème. Cette dernière propriété implique une influence directe des conditions environnementales et climatiques sur la présence, la persistance et l'abondance de la bactérie dans l'écosystème aquatique et donc indirectement sur l'émergence du choléra chez l'homme.

Cette relation choléra/environnement a déjà été étudiée en Asie (Bangladesh) et en Amérique du Sud (Pérou) mais aucune étude ne s'est intéressée à ce jour, à la situation de cette maladie en Mer Méditerranée et sur le continent le plus affecté, l'Afrique. Dans ce contexte, nous avons d'abord étudié les dynamiques de choléra dans différents pays d'Afrique du Nord et de l'Ouest par les analyses d'ondelettes. Ensuite, nous avons testé l'existence d'un lien entre ces dynamiques et différents paramètres caractérisant la variabilité climatique et environnementale globale et locale. Enfin, nous avons réalisé un *modèle épidémiologique* de type *SIR* intégrant des paramètres environnementaux de type océanographique pour expliquer la dynamique du choléra. L'application directe a été la mise en place d'un *premier outil de prédiction* des épidémies de choléra grâce à la surveillance de l'environnement par satellite.

Les résultats ont montré en dehors du cycle saisonnier déjà bien connu, pour les dynamiques de choléra un cycle compris entre 3 et 4 ans, ainsi qu'un synchronisme des épidémies de choléra entre différents pays. Ces résultats sont tout à fait similaires à ce qui était déjà connus pour le Pérou et le Bangladesh. De plus, des corrélations ont été détectées entre ces dynamiques et les variations climatiques et environnementales. Enfin, le développement d'un modèle mathématique a servi à l'élaboration d'un premier système d'alerte basé sur le suivi des conditions environnementales par télédétection spatiale, et ce afin de répondre à un meilleur contrôle de la maladie.

# MATECLID

## Modélisation des Arboviroses Tropicales Emergentes CLImato-Dépendantes

Equipe MATECLID (CEA, CNRS, INRA, IRD, Université), compte-rendu présenté par :

### Marc A. DUBOIS

Service de Physique de l'Etat Condensé  
CEA Saclay –Orme des Merisiers  
91191 Gif sur Yvette cedex France  
mail : [mad@cea.fr](mailto:mad@cea.fr)  
Tf : (33) (0) 1 69 08 74 18

Un des effets prévisibles du changement climatique est l'émergence de pathologies nouvelles dans des endroits où elles n'existaient pas. Une des causes possibles est l'extension des zones de viabilité pour les vecteurs de parasites ou de virus, comme dans le cas des arboviroses, qui sont le sujet premier du programme MATECLID.

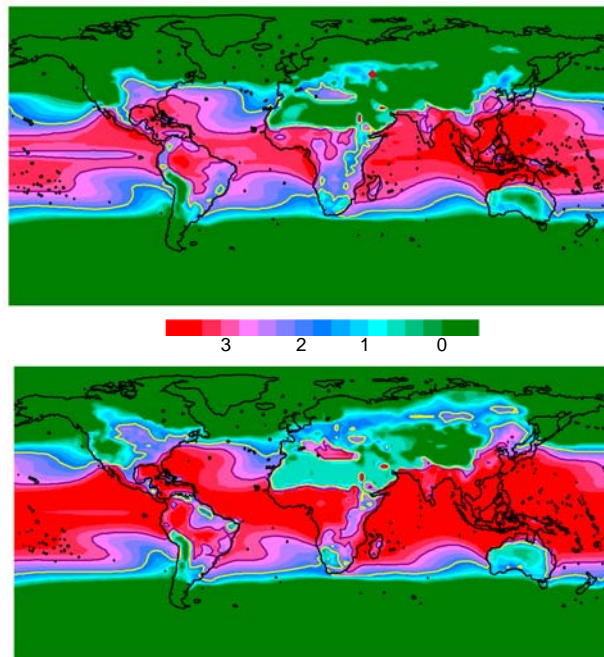
Pour aborder ce problème dans une perspective réunissant compréhension scientifique et prévision afin d'aider à la décision en stratégie sanitaire préventive et prophylactique, nous avons constitué une équipe pluridisciplinaire qui aborde tous les maillons, du climat à l'individu, en passant par le virus, les vecteurs, la structure de l'habitat etc.

Nous avons obtenu au cours de ce travail un bon nombre de résultats, en particulier : 1) une prévision de l'extension des zones à risque de dengue au cours des prochaines décennies, 2) un modèle spatialisé d'épidémie de dengue au niveau d'une localité (ville ou village), montrant bien la nécessité absolue de prendre en compte l'espace même aux petites échelles, et 3) une base de données spatialisée en SIG des cas de Dengue au Pérou.

Le but ultime du programme, non encore atteint, est de modéliser la dynamique des arboviroses à l'échelle de la planète. Le travail qui continue après la fin de ce financement GICC 2003 porte sur l'intégration de la structure hiérarchisée de l'espace par agrégation des variables aux petites échelles, et la prise en compte de la structure de contacts distants (transports modernes par exemple).

**Figure 1. Carte du potentiel climatique de transmission avec les sorties du modèle de CGCM de l'IPSL. Haut : moyennes 1970-2000. Bas : Moyenne 2070-2100 pour le scénario A2 (émissions élevées). La ligne jaune représente la zone d'incidence potentielle, la ligne violette la zone à risque élevé. Les extensions de la zone potentielle concernent essentiellement des régions où les épidémies ne peuvent se développer à cause de l'environnement anthropique.**

**Par contre, l'extension des de la zone à risque élevé est quasiment générale, excepté au nord de l'Amérique du Sud.**

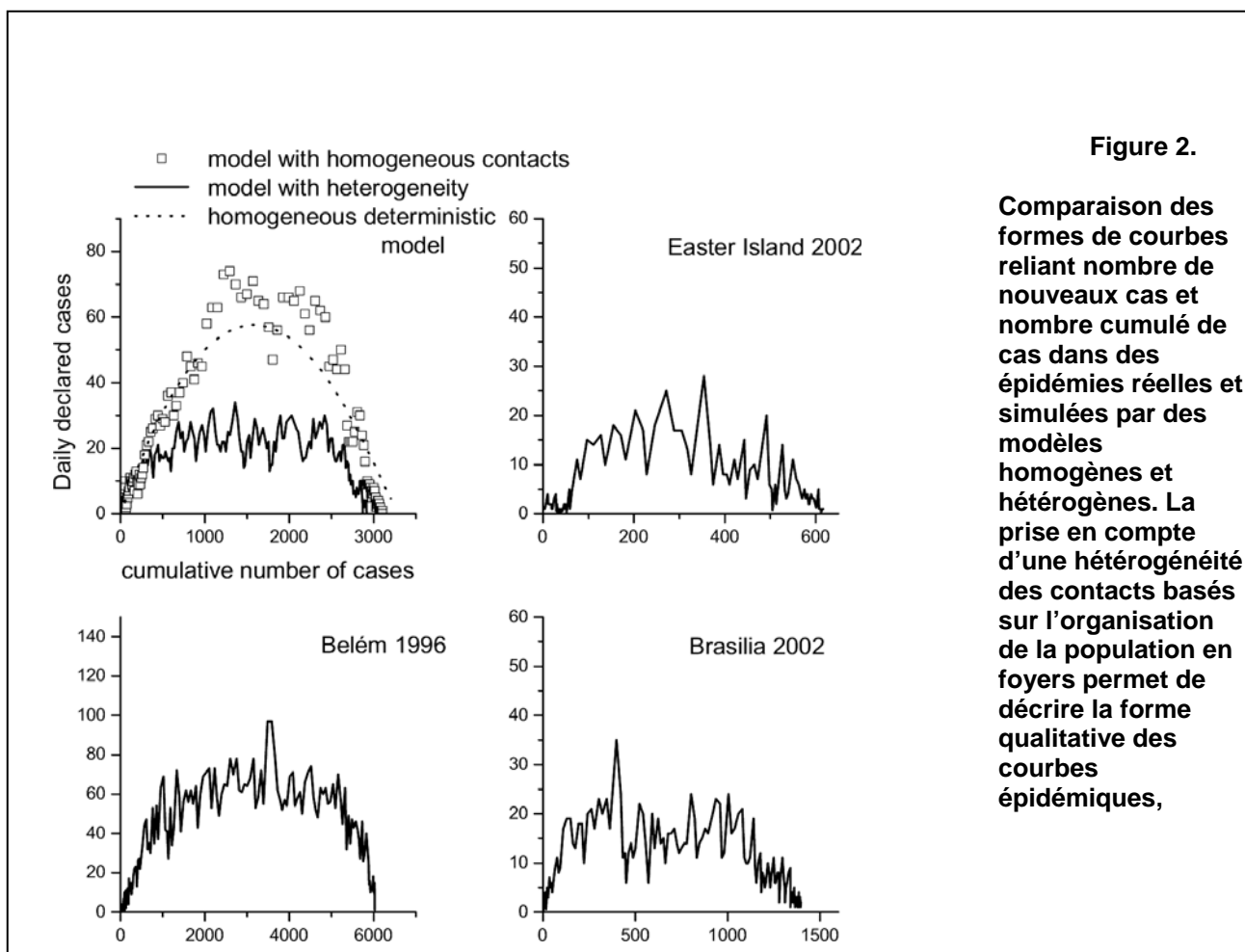


**1) Effets du changement climatique sur l'extension des zones à risque :** La figure 1 montre l'impact du changement climatique sur l'aire de répartition de la dengue : les sorties de différents modèles climatiques (UKMO, MPI, IPSL\*\*\*) suivant différents scénarios d'évolution de la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère ont été utilisés

pour calculer les indices de risques. Les résultats convergent vers deux conclusions majeures. D'abord, les changements climatiques ne seront certainement pas moteurs d'une extension latitudinale de la dengue. En effet la limite évolue peu au Sud sur les continents. Au Nord la limite n'est actuellement pas atteinte malgré la faible extension de la zone potentielle, seul un changement des conditions environnementales anthropiques peut conduire à l'émergence de la dengue. En revanche, la plupart des régions touchées actuellement voient leur risque augmenter, ce qui nécessitera une adaptation des politiques de prévention. En Amérique du Sud, la zone à risque va connaître un déplacement vers l'ouest. Finalement, l'évolution prévisible de la zone de répartition est loin d'être aussi évidente que le prévoient les précédentes études, qui négligeaient une partie des processus ou des paramètres.

**2) Importance de la spatialisation des modèles épidémiologiques :** Les travaux que nous avons menés sur la modélisation d'une épidémie ont montré l'importance extrême de la prise en compte de l'hétérogénéité spatiale au niveau local (au niveau d'une ville). Sur la figure 2 nous comparons les caractéristiques de courbes épidémiologiques réelles (épidémies sur l'île de Pâques et dans différentes villes du Brésil) avec des courbes issues de deux modèles :

1. Un modèle avec contacts homogènes entre les populations d'hôtes et de vecteurs ;
2. Un modèle hôte-centré qui tient compte de la structuration de la population en maisons, individu-centré du point de vue des hôtes. Un paramètre définit le degré d'hétérogénéité du réseau : la probabilité de passage d'un hôte d'une maison à une autre.



Pour le modèle homogène, les caractéristiques statiques temporelles (durée de l'épidémie, jour du pic) et épidémiologiques (prévalence finale, hauteur du pic) des épidémies synthétiques sont liées de façon très forte. Du point de vue dynamique également, la forme de la courbe est également relativement fixée, de forme sigmoïdale où la phase de saturation succède rapidement à la phase initiale de croissance exponentielle. Les caractéristiques

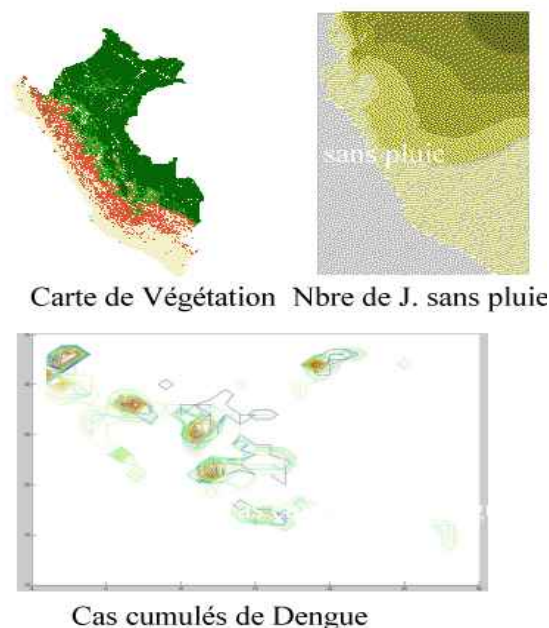


des courbes épidémiologiques réelles sont incompatibles avec les caractéristiques des modèles homogènes : il n'est pas possible de reproduire la forme des courbes épidémiologiques réelles avec ces modèles.

Dans le modèle hétérogène, selon la valeur du paramètre d'hétérogénéité, on observe une transition analogue aux transitions de percolation. Pour les valeurs inférieures à une valeur seuil, on a l'impossibilité d'une épidémie, caractérisée par un nombre moyen de malades par jour proche de zéro (extinction rapide ou persistance à bas bruit pendant un temps plus ou moins long). Au-dessus de ce seuil, il y a la possibilité d'une épidémie, avec un pic clairement défini et un nombre moyen de malades par jour non proche de zéro. Pour les valeurs les plus importantes, on retrouve la situation homogène. Pour les valeurs intermédiaires, les épidémies sont plus longues avec une phase de croissance linéaire du nombre cumulé de cas entre la phase de croissance exponentielle initiale et la phase finale de saturation.

L'introduction de ce type d'hétérogénéité permet donc de retrouver les caractéristiques qualitatives des courbes épidémiologiques réelles. D'autre part, il est possible de reproduire la courbe épidémiologique de l'île de Pâques en introduisant ce type d'hétérogénéité, mais sur trois niveaux. Les hôtes sont regroupés en maisons, elle-même regroupées en quartiers. Les contacts entre maisons sont favorisés pour les maisons d'un même quartier. Comme dans la situation réelle, on a considéré qu'un quartier seulement était infesté. Ces hypothèses permettent de reproduire les caractéristiques statiques et la forme de la courbe épidémiologique.

**3) Constitution d'une base de données Dengue sur SIG au Pérou :** Dans le cadre de MATECLID, en partenariat avec la société EKODES et l'Office Epidémiologique du Ministère de la Santé du Pérou, une base de données des facteurs de risque (nature de l'habitat, données climatiques etc.) et des cas de Dengue au Pérou. Cette base est en cours de couplage avec le modèle spatialisé ci-dessus.



**Conclusion :** Ces résultats ne montrent qu'une fraction des travaux réalisés dans ce programme. Il faudrait aussi mentionner entre autres un mode de calcul original du  $R_0$  qui permet de diagnostiquer une épidémie dès son apparition, des suivis de gîtes larvaires (longitudinal à Brasilia, extensif en Thaïlande et à Lima), un modèle épidémique influencé par le climat avec prise en compte de la dynamique du vecteur, ainsi que des travaux sur la fièvre de la vallée du Rift et sur la fièvre West Nile.

Le réseau constitué avec MATECLID garde une cohérence après la phase de financement GICC 2003, tant en tant que tel que par son insertion dans d'autres programmes (ANR Epidengue etc.).

# L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES MALADIES A TRANSMISSION VECTORIELLE EN AFRIQUE DE L'OUEST : LE CAS DE LA BORRELIOSE A TIQUES ET DU PALUDISME

Jean-François Trape<sup>1</sup>, Georges Diatta<sup>1</sup>, Laurence Vial<sup>1</sup>, Jean-Marc Duplantier<sup>2</sup>,  
Patrick Durand<sup>3</sup>, Jean-Louis Camicas<sup>4</sup>, Gil Mahé<sup>5</sup>, Laurent Granjon<sup>6</sup>, Didier  
Fontenille<sup>7</sup>, François Renaud<sup>3</sup>

## Présenté par Jean-François Trape

<sup>1</sup> IRD 77 Paludologie Afrotropicale, Dakar

<sup>2</sup> IRD 22 Biologie et gestion des populations, Dakar

<sup>3</sup> UMR 165 IRD-CNRS, Centre de Recherche sur le Polymorphisme des  
Micro-organismes, Montpellier

<sup>4</sup> IRD 34 Maladies émergentes et systèmes d'information, Montpellier

<sup>5</sup> UM2-IRD 050-CNRS Hydrosociences, Montpellier

<sup>6</sup> IRD 22-MNHN, Centre IRD de Bamako

<sup>7</sup> IRD 16 Caractérisation et contrôle des vecteurs, Montpellier

Le paludisme et la borreliose à tiques constituent les deux premières causes de morbidité par maladie vectorielle dans une grande partie de l'Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne. Elles constituent aussi les deux maladies tropicales dont l'épidémiologie a été le plus affectée ces dernières années par le changement climatique.

Dans le cas de la borreliose à tiques (fièvre récurrente à *Borrelia crocidurae*), il a été montré au Sénégal que la persistance du déficit pluviométrique depuis le début des années 1970 avait été associée à une extension considérable de la distribution géographique de la maladie et de la tique vectrice *Ornithodoros sonrai*, espèce autrefois limitée aux régions sahariennes et sahéliennes. Cette tique, qui vit habituellement dans les terriers des petits mammifères constituant le réservoir de la maladie, pique occasionnellement l'homme et lui transmet ainsi la borreliose. Au Sénégal, cette maladie est maintenant présente en zone de savane soudanienne où elle constitue en zone rurale la seconde cause de consultation en dispensaire pour une maladie à transmission vectorielle. Peu de données sont disponibles pour les autres pays d'Afrique occidentale et centrale et les limites de répartition du vecteur dans ces pays ne sont pas connues.

Les recherches sur la borreliose à tiques conduites dans le cadre du programme GICC ont associées six équipes françaises et des équipes nationales de huit pays africains : Sénégal, Mauritanie, Mali, Burkina-Faso, Bénin, Niger, Cameroun et Tchad. Elles constituent la première étude à vaste échelle jamais réalisée sur cette maladie en Afrique occidentale et centrale. Un total de 4919 terriers de rongeurs dans 198 stations de 70 sites d'études de ces huit pays a été exploré pour rechercher la présence de *O. sonrai* et mettre en évidence une infection par *B. crocidurae*. Des séances de piégeage de micro-mammifères ont été organisées dans 27 sites de ces huit pays et ont permis la collecte de 1087 rongeurs et insectivores chez lesquels une infection par *B. crocidurae* a été recherchée. De nombreux paramètres climatiques et environnementaux ont été testés pour tenter d'expliquer les limites de répartition du vecteur. Des méthodes nouvelles de génétique

moléculaire ont pour la première fois été appliquées à l'étude de *O. sonrai* et de *B. crocidurae*.

Les grandes lignes de la répartition géographique de la borréliose apparaissent clairement à l'issue du projet. Le vecteur et l'agent pathogène sont massivement présents au nord de l'isohyète 750 mm dans toute la moitié ouest de l'Afrique occidentale (Sénégal, Mauritanie, Mali). La limite sud de la progression de la borréliose peut être établie sur le terrain avec une grande précision car la prévalence de terriers colonisés y est immédiatement élevée. En zone saharienne, le vecteur et l'agent pathogène remontent dans les zones très arides du nord de la Mauritanie et il existe probablement une continuité territoriale avec les stations du sud marocain où la présence de *O. sonrai* a été rapportée dans les années 1950. Pour la moitié ouest de l'Afrique occidentale, l'hypothèse de base du projet -l'extension généralisée en zone soudanienne de la borréliose sous l'effet de la persistance de la sécheresse depuis 1970- apparaît ainsi confortée par les résultats de cette étude.

En revanche, dans la moitié est de l'Afrique occidentale et en Afrique centrale (Burkina-Faso, Niger, Bénin, Cameroun, Tchad), le vecteur de la borréliose semble rare ou absent, ceci à la fois en zone soudanienne, en zone sahélienne et en zone saharienne. Ces résultats sont inattendus dans la mesure où *O. sonrai* avait été autrefois signalé de Niamey et de Ndjaména. De plus, il semble exister au niveau du bassin du Niger une zone de transition où le vecteur se maintient au nord de l'isohyète 750 mm uniquement à proximité du lit majeur du fleuve Niger et ses principaux affluents. La répartition du vecteur au Sénégal, en Mauritanie et dans l'ouest du Mali est au contraire indépendante du réseau hydrographique.

De nombreux paramètres climatiques et autres paramètres environnementaux - pédologie, végétation, orohydrographie, géomorphologie, hydrogéologie, agriculture, population, faune associée- ont été testés pour tenter d'expliquer la limite est de répartition du vecteur. La plus grande hygrométrie de saison sèche et la plus grande fréquence des pluies d'hiver qui sont observées au Sénégal, en Mauritanie et dans l'ouest du Mali sont actuellement les seuls facteurs identifiés susceptibles d'expliquer les différences de répartition de *O. sonrai* au nord de l'isohyète 750 mm en Afrique occidentale et centrale. L'humidité de saison sèche associée au delta central du Niger pourrait expliquer le maintien localisé du vecteur dans la partie centrale de l'Afrique de l'Ouest au nord de l'isohyète 750 mm.

Dans le cas du paludisme, la sécheresse a fortement réduit dans ces mêmes régions d'Afrique la répartition, l'abondance et le taux d'infection des anophèles vecteurs sans pour autant être associé à une diminution significative du poids du paludisme pour la plupart des populations concernées. L'apparition de résistances aux médicaments antipaludiques explique seulement une partie de ce phénomène. La perte d'immunité des populations nord-sahéliennes les rend plus vulnérables à l'infection et est susceptible d'occasionner des phénomènes épidémiques de grande ampleur et gravité, notamment en cas d'événement climatique extrême (pluies diluviennes). De plus, la multiplication récente des aménagements hydro-agricoles en zone sahélienne et dans les oasis du Sahara pour lutter contre les conséquences de la sécheresse crée des conditions favorables à l'introduction et au maintien permanent de populations d'anophèles vecteurs du paludisme, en premier lieu *Anopheles gambiae* et *An. arabiensis*. Il existe ainsi un risque de pénétration de ces espèces à forte capacité vectorielle en Afrique du nord.

Trois régions de Mauritanie ont été retenues pour des prospections systématiques à la recherche d'une colonisation récente par des anophèles : (a) le massif de l'Adrar,

dans le nord de la Mauritanie, où il existe de nombreuses oasis et gueltas permanentes, (b) les environs d'Akjoujt, ville située sur l'axe principal de circulation vers le nord de la Mauritanie, où la présence d'un oued important avec des aménagement hydro-agricoles récents (digue de retenue) présente un risque de colonisation par des anophèles, et (c) le massif du Tagant, dans le centre du pays, où il existe de nombreuses oasis, mares et gueltas permanentes et où un programme de création de petits barrages financé par l'Union Européenne est en cours de réalisation.

Un total de 19 stations a été étudié dans ces trois régions de Mauritanie. Les larves d'anophèles ont été systématiquement recherchées dans les différents types de collections d'eau observés et les imagos ont été échantillonnés lors de séances de captures de nuit sur homme ou en utilisant des pièges lumineux. Notre enquête a montré l'abondance des anophèles dans la plupart des sites étudiés de l'Adrar et du Tagant, dont trois des espèces connues comme vecteurs possibles du paludisme : *An. dthali* (Adrar et Tagant), *An. pharoensis* (Tagant) et *An. arabiensis* (Tagant). Les deux premières espèces sont de très mauvais vecteurs du paludisme en raison de leur forte zoophilie et de leur courte durée de vie et ne sont pas susceptibles de permettre l'épidémisation de la maladie. *An. arabiensis* est en revanche un très bon vecteur du paludisme qui représente ainsi un risque élevé d'épidémie dans le Tagant les années de forte pluviométrie.

L'absence de *An. arabiensis* lors de notre enquête dans l'Adrar suggère que cette espèce ne s'est pas encore adaptée aux nombreux gîtes potentiels, dont beaucoup sont récents, que nous avons observés dans cette région de Mauritanie. Toutefois, seule une petite partie des nombreuses oasis de l'Adrar a pu être étudiée lors de notre enquête et cette espèce est suspectée d'avoir été responsable de la forte épidémie de cas de fièvre présumés d'origine palustre qui est survenue en mars 2004 à Wokchida, à la suite des pluies exceptionnelles de l'automne 2003 qui ont été responsables de nombreuses inondations persistantes dans l'Adrar.