



Environnement et changements globaux : des aléas à la vulnérabilité des sociétés

Michel Vauclin, Patrick Monfray

► To cite this version:

Michel Vauclin, Patrick Monfray. Environnement et changements globaux : des aléas à la vulnérabilité des sociétés : Les cahiers de l'ANR - n°7. 2013. hal-03413085

HAL Id: hal-03413085

<https://hal.science/hal-03413085>

Submitted on 21 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Environnement et Changements Globaux : des aléas à la vulnérabilité des sociétés

Les cahiers de l'ANR - n°7

avril 2013



Les Cahiers de l'ANR traitent de questions thématiques transverses aux différents appels à projets financés par l'ANR. Cette collection met en perspective les recherches, les innovations métrologiques et les avancées technologiques en cours dans un domaine spécifique. Quels sont les enjeux scientifiques, sociétaux, économiques, prospectifs ? Quelles sont les actions de l'ANR ?

Sans prétention d'exhaustivité, l'objectif est d'explicitier les grandes problématiques. Il est fait référence aux différents projets de recherche financés par l'ANR. Une présentation synthétique des projets est proposée.

Chaque Cahier permet donc d'approfondir la connaissance scientifique du domaine suivi. Il s'adresse aux chercheurs et enseignants-chercheurs, aux décideurs mais aussi à un large public. L'importance et la diversité des projets de recherche et des équipes scientifiques sont ainsi mises en lumière.

Les cahiers de l'ANR sont également téléchargeables en ligne : www.agence-nationale-recherche.fr



**Ce cahier n°7 a été conçu par
Michel Vauclin et Patrick Monfray
avec le concours d'Aline Tournier.**

Nous remercions l'ensemble des contributeurs des 118 projets retenus dans ce cahier, et plus particulièrement les rédacteurs des synthèses
Gilles Bergametti, Jean Albergel,
Maurice Imbard, Cyril Moulin, Serge Planton,
Christophe Rabouille, Denis-Didier Rousseau,
Bernard Seguin et Marc Voltz



avant-propos

Les problèmes environnementaux sont souvent appréhendés comme une addition de phénomènes indépendants et aux causes multiples: la croissance démographique, le changement climatique, l'érosion de la biodiversité marine ou continentale, la dégradation des sols, l'usage intensif des ressources hydriques, la raréfaction des ressources énergétiques fossiles ou minérales, la pollution chimique de l'air et de l'eau, etc. Or ces problèmes sont profondément reliés les uns aux autres en partie par le biais des enveloppes superficielles de la planète (air, eau, biosphère, sols...) où ils se déroulent, mais surtout par l'évolution simultanée des activités humaines (niveaux de développement, pression démographique, mondialisation des échanges, évolutions technologiques, modification des comportements sociaux). Ils induisent sur la société de nombreux impacts d'ordre alimentaire, sanitaire et migratoire, ainsi que des changements des modes de vie, paupérisation rurale, urbanisation, bidonvilles, instabilité politique, conflits. Ces changements environnementaux sont désormais clairement perceptibles à grande échelle, voire celle de la planète, d'où le terme souvent réduit au vocable de « *Changements Globaux* » ou « *Changement Global* ».

La prise de conscience de ces changements à grande échelle a abouti à une multiplication de programmes de recherche et/ou de suivi de l'évolution des milieux qui n'ont pas suffisamment favorisé les échanges entre disciplines et entre les différents enjeux environnementaux à l'œuvre. Par exemple, le GIEC¹ (*Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat*) évalue essentiellement le système climatique², ses changements, ses impacts et les stratégies d'adaptation³ et de mitigation⁴, tandis que le *Millenium Ecosystem Assessment*⁵ traite des aspects liés à la vulnérabilité⁶ de la

biodiversité, des écosystèmes et des services associés, aspects qui sont repris maintenant par l'IPBES⁷ (*Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*), créé en 2012.

L'un des enjeux majeurs consiste à faire émerger une approche de recherche plus systémique inter⁸- et trans-disciplinaire⁹, impliquant tant les Sciences de la Vie et de la Terre que les Sciences Humaines et Sociales, ainsi qu'une interaction renforcée entre Science et Société, sur un champ de recherche qualifié de « Science du Système Terre¹⁰ » dont les cinq grands défis ont été déclinés récemment¹¹ par le Conseil International pour la Science (ICSU) et simultanément par le Conseil International des Sciences Sociales (ISSC) :

Prévoir /Projeter :

améliorer l'utilité des prévisions environnementales et de leurs conséquences sur les personnes ;

Observer/Discriminer :

élaborer, améliorer et intégrer les systèmes d'observation pour gérer les changements environnementaux globaux ou régionaux ;

Confiner/Limiter :

déterminer comment anticiper, éviter et gérer les changements environnementaux pouvant conduire à des points de rupture ;

Répondre/Gouverner :

déterminer les changements institutionnels, économiques et sociaux nécessaires à la mise en place de mesures efficaces en matière de développement soutenable ;

Innover/Transformer :

encourager l'innovation et les mécanismes d'évaluation dans les domaines météorologiques, technologiques, politiques et sociaux contribuant au développement soutenable.

C'est dans ce contexte scientifique et sociétal que l'ANR a pris sa place à partir de 2005, en cohérence avec les grandes priorités ministérielles, le Plan Climat 2004-2012, la Stratégie Nationale d'Adaptation au Changement Climatique et la Stratégie Nationale de Développement Durable, et plus récemment avec l'Alliance nationale de recherche pour l'environnement, AllEnvi. Après avoir lancé plusieurs programmes de recherche thématiques dans ce domaine, dont certains sont décrits dans ce cahier, l'ANR a créé successivement deux Comités Scientifiques Sectoriels (CSS) touchant aux changements globaux : i) le premier francophone en 2010 sur « Ecosystèmes et Développement Durable », focalisé sur l'adaptation des ressources biologiques, des écosystèmes gérés, de l'alimentation et de la santé, et ii) le second international en 2011 sur « Sciences du Système Terre », dédié aux interactions d'échelles régionales et globales à l'interface entre environnement et développement des sociétés.

Ce Cahier contribuera à éclairer les lecteurs sur la diversité et la qualité des travaux menés par les équipes françaises et leurs partenaires métropolitains, ultramarins, européens et étrangers pour développer une meilleure compréhension des grands changements environnementaux passés, présents et à venir. Il esquisse aussi le renforcement de la collaboration européenne, notamment via des programmations conjointes, et internationales vers la mise en place d'une grande plateforme commune 2014-2024 « Future Earth¹², Research for Global Sustainability ». Lancée à Rio+20, cette action est destinée à faire converger les grands programmes internationaux actuels (WCRP, IGBP, DIVERSITAS et IHDP)¹³ et à impulser des actions orientées vers des recherches de solutions pour faire face à ces nouveaux défis complexes, à l'interface entre environnement et développement.

Ghislain de Marsily,

*Président du CSS ANR « Sciences du Système Terre »,
Membre des Académies des Sciences, des Technologies,
et d'Agriculture de France.*

Jean-François Soussana

*Président du CSS ANR
« Ecosystèmes et Développement Durable »,
Directeur scientifique environnement, INRA.*

¹ www.ipcc.ch

² Système constitué de ses cinq composantes principales : l'atmosphère, l'hydrosphère, la cryosphère, la surface continentale, la biosphère (incluant la pédosphère) et évoluant dans le temps sous l'effet de sa propre dynamique interne, de causes naturelles externes (influence astronomique, volcanisme...) et de forçages anthropiques (modifications de la composition de l'atmosphère et des eaux, de l'utilisation des terres, de l'urbanisation, etc..)

³ Capacité d'ajustement d'un système face aux changements auxquels il est soumis afin d'en atténuer les effets potentiels, d'exploiter les opportunités, ou de faire face aux conséquences.

⁴ Mise en œuvre d'approches technologiques et/ou politiques permettant la réduction des impacts des changements environnementaux dans un contexte de développement soutenable (voir par exemple www.un.or.esa/dsd/agenda21).

⁵ www.millenniumassessment.org/fr/index.aspx

⁶ Degré auquel un système est susceptible d'être affecté négativement par les effets des changements globaux (d'origine climatique ou anthropique). La vulnérabilité dépend du caractère, de l'importance et du rythme des changements auxquels le système est exposé, mais aussi de sa sensibilité et de sa capacité d'adaptation face à ces changements. Le concept de « Danger » est considéré dans ce contexte comme un synonyme de vulnérabilité.

⁷ www.ipbes.net

⁸ L'interdisciplinarité permet l'échange de concepts, règles, méthodes et outils entre différentes disciplines afin de parvenir à une compréhension globale d'un thème commun.

⁹ La transdisciplinarité vise à étudier les processus d'interaction science-société impliquant les parties prenantes (acteurs des secteurs publics et privés, de la société civile) utilisateurs de la science pour une compréhension plus complète d'un monde complexe.

¹⁰ Le système Terre représente l'ensemble des composantes physiques, biologiques et sociales des processus et des interactions (atmosphère /eau/sol/biosphère/ technologiques/socio-économiques), qui déterminent ensemble l'état et la dynamique de la planète, incluant les biotopes et l'Homme. La science du système Terre a plus particulièrement trait à l'observation, la compréhension et la prédiction des changements environnementaux.

¹¹ Reid *et al.*, Science, Vol. 330, pp 916-917, 12 November 2010.

¹² Lancé en juin 2012 à la Conférence de l'ONU Rio+20, www.icsu.org/future-earth

¹³ Voir www.wcrp-climate.org, www.igbp.net, www.diversitas-international.org, www.ihdp.unu.edu

résumé

Ce cahier est basé sur 110 projets financés par l'ANR, ainsi que sur 8 projets du programme GICC (Gestion et Impacts du Changement Climatique) abondés par le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie. Les principaux programmes ANR 2005-2009 ayant contribué au cahier sont : VMCS (Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés), CEPS (Changements Environnementaux Planétaires et Sociétés), JCJC (Jeunes Chercheurs, Jeunes Chercheuses) et Blanc dans le domaine « Sciences de l'univers et géo-environnement ». Les disciplines majeures concernées sont les sciences physiques, mathématiques, chimiques, biogéochimiques, biologiques et écologiques ainsi que pour partie, les sciences humaines et sociales en émergence. Ce cahier couvre à la fois des aspects fondamentaux des recherches et des travaux à visée plus finalisée. Il présente également l'évolution de la programmation de 2005 à 2012 de l'ANR et esquisse son évolution future.

La première partie du Cahier fournit aux lecteurs les clés des enjeux et des défis auxquels sont confrontés les changements globaux et ce, selon les huit thèmes suivants :

- ◆ Les approches paléoenvironnementales, historiques et prospectives du climat
- ◆ Les approches physiques, chimiques et biologiques des milieux polaires
- ◆ Les approches physiques, chimiques et sociétales des milieux océaniques et côtiers
- ◆ Les approches physico-chimiques de l'atmosphère

- ◆ Les phénomènes hydro-climatiques extrêmes

- ◆ La vulnérabilité des agro-écosystèmes aux changements globaux et leur adaptation

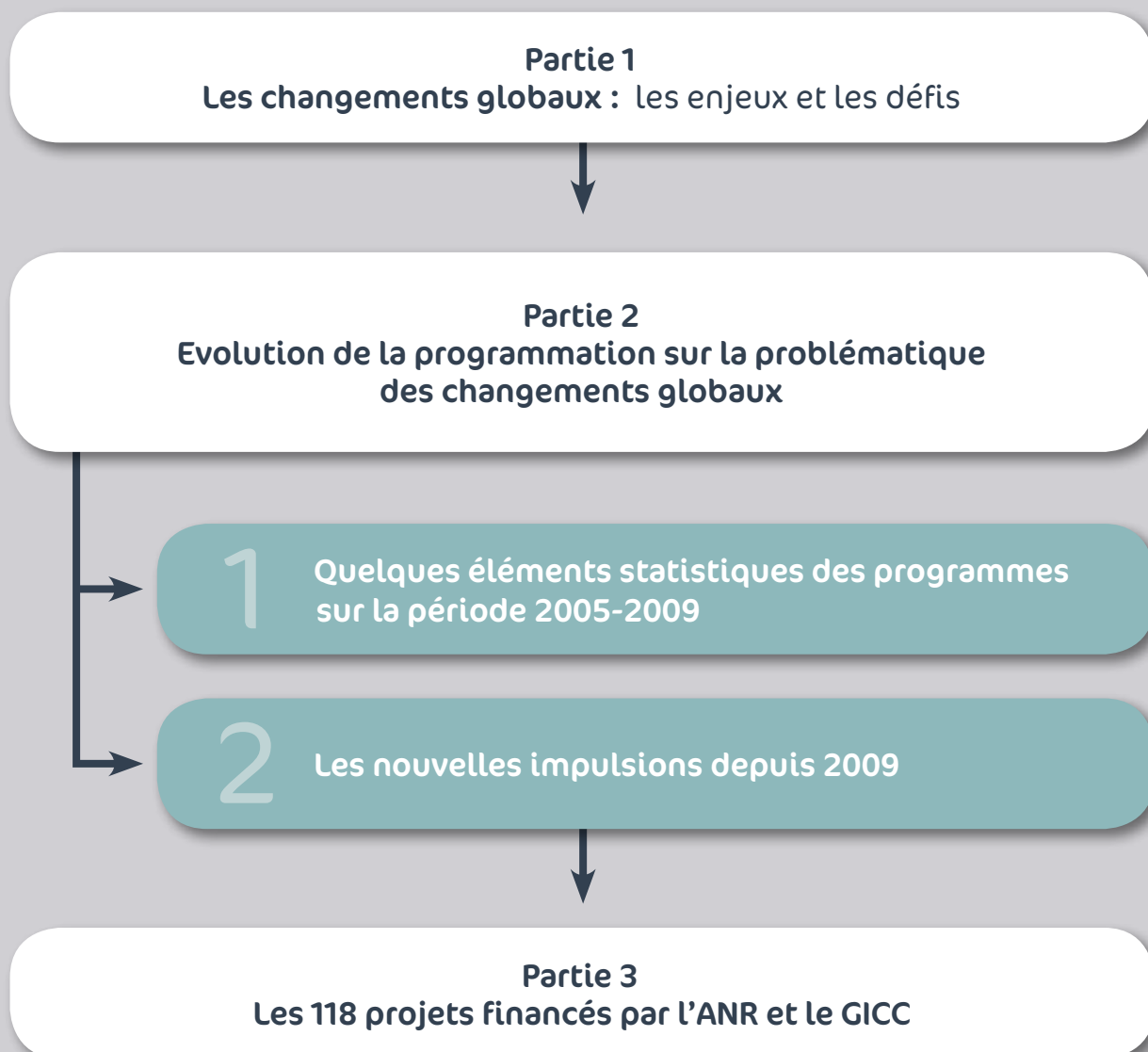
- ◆ La vulnérabilité des hydrosystèmes continentaux aux changements globaux : le cas des ressources en eau et leur adaptation

- ◆ La vulnérabilité des hydrosystèmes continentaux : le cas des ressources en sol et de leur évolution face aux changements globaux

Dans une deuxième partie, les principaux programmes nationaux 2005-2009 ayant contribué au Cahier sont présentés de manière synthétique et statistique : programmes thématiques « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés, VMCS » et « Changements Environnementaux Planétaires et Sociétés, CEPS », et non thématiques « Blanc » et « Jeunes Chercheurs, Jeunes Chercheuses, JCJC ».

Les nouvelles impulsions depuis 2009 et les perspectives sont ensuite abordées dans un contexte international en forte évolution sur les enjeux « Science-Société ».

La troisième partie présente les principales avancées relatives aux 110 projets financés par l'ANR, ainsi que les 8 projets du programme « Gestion et Impacts du Changement Climatique, GICC » abondés par le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie.



sommaire

PARTIE 1 : Les changements globaux : les enjeux et les défis

• Les approches paléoenvironnementales, historiques et prospectives du climat	6
• Les approches physiques, chimiques et biologiques des milieux polaires	7
• Les approches physiques, chimiques et sociétales des milieux océaniques et côtiers	9
• Les approches physico-chimiques de l'atmosphère	12
• Les phénomènes hydro-climatiques extrêmes	14
• La vulnérabilité des agro-écosystèmes aux changements globaux et leur adaptation	15
• La vulnérabilité des hydrosystèmes continentaux aux changements globaux : le cas des ressources en eau et leur adaptation	16
• La vulnérabilité des hydrosystèmes continentaux : le cas des ressources en sol et de leur évolution face aux changements globaux	17

PARTIE 2 : Evolution de la programmation sur la problématique des changements globaux

1. Quelques éléments statistiques des programmes sur la période 2005-2009 :	
• Les programmes thématiques	19
• Les programmes non thématiques de l'ANR	21
• Un bref bilan	21
2. Les nouvelles impulsions depuis 2009	
• Les Ateliers de Réflexion Prospective	22
• Les Investissements d'Avenir	25
• Le renforcement des liens de l'ANR avec les agences et les structures étrangères de financement dans le domaine couvert par le Cahier	27

PARTIE 3 : Les 118 projets financés par l'ANR et le GICC

• Les approches paléoenvironnementales, historiques et prospectives du climat	30
• Les approches physiques, chimiques et biologiques des milieux polaires	47
• Les approches physiques, chimiques et sociétales des milieux océaniques et côtiers	63
• Les approches physico-chimiques de l'atmosphère	99
• Les phénomènes hydro-climatiques extrêmes	113
• La vulnérabilité des agro-écosystèmes aux changements globaux et leur adaptation	128
• La vulnérabilité des hydrosystèmes continentaux aux changements globaux : le cas des ressources en eau et leur adaptation	149
• La vulnérabilité des hydrosystèmes continentaux : le cas des ressources en sol et de leur évolution face aux changements globaux	171

Glossaire	186
-----------	-----

Partie 1

Les changements globaux : le contexte et les enjeux

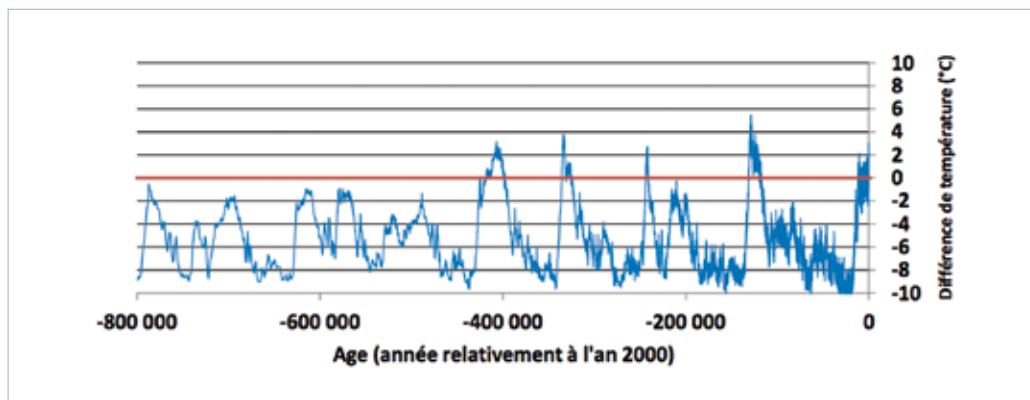
1 LES APPROCHES PA- LÉOENVIRONNEMEN- TALES, HISTORIQUES ET PROSPECTIVES DU CLIMAT

La connaissance des conditions paléoclimatiques a permis de faire d'énormes progrès dans la compréhension du changement climatique qui affecte de nos jours la planète Terre. Les succès de l'étude des carottes de glace prélevées dans les calottes groenlandaise et antarctique ont permis de dresser un cadre aussi bien chronologique que contextuel permettant le développement d'outils de modélisation débouchant sur une meilleure compréhension des mécanismes et des forçages en cause. La qualité des enregistrements glaciaires a ainsi permis de remonter aussi loin que les derniers 800 000 ans et de fournir un enregistrement avec une précision remarquable de la variation des gaz à effet de serre et du deutérium de la glace, ce dernier permettant d'estimer la température.

A l'inverse, la précision des prélèvements et la qualité des diverses archives analysées ont également permis d'étudier plus en détail les périodes récentes dites pré-industrielles.

Ces succès tant méthodologiques que scientifiques ont eu tendance à laisser croire aux décideurs que tout était désormais clair en ce qui concerne les paléoclimats et leur dynamique et que financer de telles études devenait dépourvu de sens, la priorité devant être portée sur l'actuel et les variations futures.

Or, il s'avère que si le cadre général semble maintenant bien connu, puisqu'il s'agit du contexte des variations astronomiques du climat, le raffinement des études, les changements d'échelles, tant chronologiques que spatiales, démontrent qu'une compréhension parfaite des paléoclimats est loin d'être connue. Une première difficulté réside donc dans le contexte temporel puisque si des efforts importants ont été portés sur le dernier million d'années ou la période récente, d'autres périodes clés s'avèrent d'un grand intérêt, qu'elles soient glaciaires ou interglaciaires durant les derniers 2.6 Ma du Quaternaire. L'accroissement de la résolution temporelle permet ainsi d'aller plus au cœur des processus et mécanismes en jeu dans lesquelles interactions et rétroactions jouent un rôle primordial, impliquant une plus grande adéquation des modèles climatiques.



Estimation de la température sur les 800 000 dernières années au forage glaciaire EPICA Dome C, d'après Jouzel J. *et al.*, Science, 2007. Les différences de température sont relatives à la moyenne du dernier millénaire.

Par contre, aborder les climats plus anciens du pré-Quaternaire nécessite aussi bien de nouvelles observations avec une qualité égale à ce qui est obtenu pour le plus récent, que des développements de modèles mécanistes intégrant d'autres forçages, principalement internes à la Terre.

humaines. Or, les changements globaux (climatique et anthropique) affectent la plupart des secteurs polaires. En touchant directement au facteur essentiel de l'organisation des milieux et leurs dynamiques qu'est la glace, il conduit à des modifications profondes et brutales de ces derniers.

2 LES APPROCHES PHYSIQUES, CHIMIQUES ET BIOLOGIQUES DES MILIEUX POLAIRES

Les milieux polaires se caractérisent par des conditions climatiques particulières et extrêmes avec des modalités de changements temporel et spatial spécifiques qui en font des zones de rupture ou de front. L'une des causes majeures de ces particularismes est la limite physique du point de congélation de l'eau et les conséquences qu'elle induit sur les caractéristiques géomorphologiques des territoires concernés et leur évolution, sur les biodiversités animales et végétales et sur les sociétés

Tous les modèles de projection climatique qui prennent en compte l'évolution des différentes composantes du système Terre (atmosphère, hydrosphère, cryosphère, biosphère) pour le siècle à venir mettent en évidence une hypersensibilité des environnements polaires au changement global. Les dernières avancées scientifiques montrent aussi que les Pôles ne sont plus seulement les témoins lointains du réchauffement climatique, mais de véritables acteurs contribuant à la disharmonie climatique pesant déjà sur les hydro-écosystèmes océaniques, côtiers et continentaux.

Ainsi, malgré leur éloignement des centres industriels, les régions polaires connaissent des apports d'origine anthropique (métaux lourds, composés organiques) via la circulation marine et le transport d'éléments dans l'atmosphère.



Les Années Polaires Internationales constituent des événements récurrents de collaboration. La 4^{ème} édition a regroupé en 2007-08 plus de 60 pays, dont la France soutenue notamment par l'IPEV et l'ANR. D'après « A Framework for the International Polar Year 2007-2008 » édité par l'ICSU, www.ipy.org.

En Antarctique comme en Arctique, des niveaux élevés de polluants ont été rapportés affectant le comportement et le devenir de plusieurs espèces d'insectes, d'oiseaux et de mammifères marins.

L'isolement géographique de l'Antarctique et des Iles Subantarctiques constitue des modèles d'un grand intérêt pour étudier les réponses des espèces autochtones ou introduites face aux modifications actuelles du climat.

En Arctique, le changement climatique se manifeste de façon particulièrement aiguë. Des perturbations importantes affectant les équilibres climatiques de la région sont déjà visibles. À terme, la diminution de la cryosphère marine et terrestre est susceptible de conduire à des points de non-retour. En outre, l'Arctique influence fortement le système climatique aux échelles globales via les circulations océanique et atmosphérique et la contribution de la fonte de la calotte groenlandaise au niveau des mers, imposant une approche régionale et

globale. De plus, les multiples enjeux environnementaux, économiques et sociétaux sont particulièrement prégnants.

Ces quelques enjeux, parmi d'autres, suffisent à donner aux recherches polaires une importance toute particulière.

Historiquement très présente en Antarctique, la recherche française y a construit sa légitimité scientifique internationale. Moins présente en Arctique, elle tend cependant à se développer ces dernières années en raison de l'intérêt scientifique et géopolitique croissant de la région. Les recherches reposent très largement sur les programmes et les moyens logistiques de l'IPEV, ainsi que sur l'existence des Terres Australes et Antarctiques Françaises (TAAF) et des bases scientifiques permanentes en Antarctique et Subantarctique.

Ces activités scientifiques ont été particulièrement dynamisées, tant au Nord qu'au Sud, dans le cadre de l'Année Polaire Internationale 2007-08, avec un support ANR dépassant les 10 M€.

3

LES APPROCHES PHYSIQUES, CHIMIQUES, BIOLOGIQUES ET SOCIÉTALES DES MILIEUX OCÉANIQUES ET CÔTIERS

LE CONTEXTE ET LES ENJEUX DES MILIEUX OCÉANIQUES

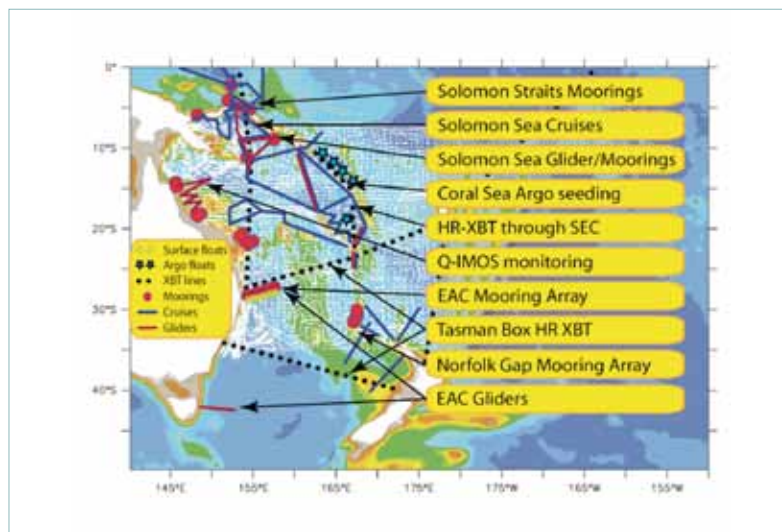
L'Océan joue un rôle primordial au sein de la grande « machine climatique » qui contrôle les conditions environnementales dans lesquelles se développent nos sociétés. Il est en effet un formidable réservoir de chaleur que les courants transportent des régions équatoriales vers les plus hautes latitudes. Le fameux Gulf Stream en est l'exemple le plus célèbre en Europe de l'Ouest où il adoucit nos hivers en apportant des eaux tièdes jusqu'à nos côtes. Mais qu'on ne s'y trompe pas : même si ces courants peuvent sembler bien connus à une époque où les satellites scrutent en permanence la surface de la Terre, leur dynamique propre, leurs méandres et tourbillons ainsi que leur variabilité d'année en année sont autant de questions scientifiques encore mal contraintes.

L'Océan est aussi un gigantesque réservoir de carbone qui stocke près de la moitié du gaz carbonique (CO_2) émis par les activités humaines et qui est à l'origine du changement climatique en cours. Une partie du CO_2 de l'atmosphère se dissout en effet dans l'Océan selon les lois de la thermodynamique. Une fois dans l'eau, ce CO_2 est emporté par les courants marins

vers les profondeurs où il va résider pendant quelques siècles loin de l'atmosphère, mais il peut aussi être utilisé dans les eaux de surface par les micro-algues (le phytoplancton) pour fabriquer de la matière organique au travers du processus de photosynthèse, exactement comme les plantes sur Terre. En mourant, les squelettes de phytoplancton, riches en carbone, tombent au fond de l'Océan pour former des millions de tonnes de sédiment, stockant ainsi le carbone venant de l'atmosphère pour des millions d'années. Là encore, la compréhension de l'ensemble des processus qui contrôlent ces cycles dits biogéochimiques dans l'Océan est un domaine scientifique très ouvert.

On comprend donc que l'Océan, malgré les défis scientifiques qui se posent encore, est un élément indispensable à intégrer dans les modèles numériques utilisés pour prévoir l'ampleur et la vitesse du changement climatique au cours du 21^{ème} siècle. Ces modèles, qui ne sont que des représentations informatisées de notre planète, doivent donc résoudre des phénomènes aussi différents que la quantité de chaleur totale transportée dans l'Océan Atlantique par des tourbillons dont la taille varie de 1 à 100 km ou la quantité de carbone fixée par des micro-algues dont les caractéristiques dépendent autant de leur espèce que de la composition chimique de l'eau.

Depuis les années 1980, la qualité et la complexité de ces modèles numériques n'ont fait que croître, bénéficiant de l'augmentation fulgurante de la puissance des super-calculateurs et de l'accroissement des connaissances scientifiques. Parmi les grands défis actuels de la modélisation numérique de l'Océan, les deux principaux



Système d'observations océanographiques SPICE, coordonné à Nouméa, dans le cadre international WCRP/CLIVAR sur l'étude de la variabilité de l'Océan Pacifique Sud-Ouest. D'après Ganachaud *et al.*, 2013, CLIVAR Exchanges Newsletter.

sont sans doute notre capacité à mieux représenter et comprendre le rôle des tourbillons de petite échelle (de 1 à 10 km) et le rôle des processus biogéochimiques qui régissent la vie des micro-algues et donc le cycle du carbone. En dehors de l'amélioration des moyens de calcul, ces défis ne peuvent être relevés qu'en allant sur et dans l'Océan pour observer ces phénomènes.

Observer l'Océan pour en comprendre les mouvements, les oscillations et les cycles biogéochimiques reste aujourd'hui un défi humain et technologique qui n'a pas grand-chose à envier à l'exploration spatiale. Il s'agit d'organiser des campagnes longues et lointaines sur des navires océanographiques embarquant souvent plusieurs dizaines de scientifiques, de se confronter à des éléments souvent hostiles, de mettre en œuvre des technologies de pointe dans un environnement agressif pour à la fin recueillir des observations, certes précieuses, mais qui ne représentent qu'une infime partie de l'immensité océanique. Observer l'Océan est donc une activité coûteuse, rare et risquée

qui nécessite un investissement fort des chercheurs et des ingénieurs comme des Organismes et Agences de recherche, ainsi que des avancées technologiques constantes. Enfin, il est important de rappeler qu'au delà de son rôle dans le système climatique, l'Océan est aussi un élément socio-économique important de nombreux pays, en particulier au travers de la pêche. Prévoir les changements de la circulation et de la température de l'Océan permet aussi d'anticiper les modifications à venir des ressources halieutiques qui seront probablement une des clés pour assurer la sécurité alimentaire mondiale dans les décennies à venir.

LE CONTEXTE ET LES ENJEUX DE L'INTERFACE CÔTIÈRE IMPACTÉE PAR L'HOMME

Le milieu côtier constitue par sa position une interface naturelle entre les continents et l'Océan. Il est le premier réceptacle des substances naturellement transportées depuis le continent telles que la matière végétale ou minérale charriée par les fleuves. Ces apports et le large recyclage interne des matières nutritives font du domaine côtier une zone très productive qui fait partie des ressources nutritives centrales de la planète. Selon le Millenium Ecosystem Assessment, on considère qu'un habitant de notre planète sur trois vit en zone côtière (à moins de 100 km de la côte) et tire ses ressources de la mer. L'habitabilité de ces zones littorales est contrainte par l'évolution des traits de côte qui est très largement soumise à la variabilité océanique et climatique. En effet, au travers des marées et tempêtes, les mouvements de sédiments régissent l'avancée ou le recul des côtes. Ces zones très productives et très sensibles au climat et à l'activité

humaine dont elles sont le réceptacle ultime sont donc très vulnérables. Nos sociétés ne peuvent donc pas faire l'économie d'une compréhension détaillée du fonctionnement de ces zones complexes afin de s'assurer de leur gestion soutenable.

Or, depuis les révolutions agricoles et industrielles, le milieu côtier est soumis à une pression anthropique grandissante. Le développement d'activités humaines telles que l'agriculture, la mise en place de barrages, la déforestation, l'industrialisation ou l'urbanisation dans les régions amont et dans la bande côtière ont entraîné des modifications importantes dans les flux d'espèces dissoutes et particulaires apportées par les fleuves au milieu marin tant en quantité qu'en composition. Ainsi, l'eutrophisation des milieux côtiers liés aux apports d'éléments nutritifs accrus menant à des hyperproductions de plancton parfois toxique et son association avec la croissance des zones désoxygénées (hypoxiques) contraignent fortement les écosystèmes et leur productivité ainsi que l'utilisation récréative des zones côtières littorales. La contamination et la sur-pêche dans le milieu côtier ont porté atteinte à l'intégrité des ressources marines dans ces milieux sensibles comme en témoigne la baisse des rendements de pêche dans la plupart des zones côtières surexploitées (Mer du Nord, côtes atlantique et méditerranéenne). Le contrôle de l'hydrologie des rivières (barrages, prélèvements d'eau, modifications des cours d'eau), a diminué notablement les apports de sédiments par les rivières, ce qui a entraîné une fragilisation des milieux deltaïques qui sont des zones cruciales dans la régulation de la productivité des mers côtières. De plus, le trait de côte subit des altérations souvent irréversibles, les apports de matière deve-



Marée noire dans le delta du Mississippi (NASA).

nant plus faibles que l'érosion.

En plus de ces effets directs de l'activité humaine, le changement climatique en cours qui modifie le régime hydrologique des fleuves (crues), la fréquence d'événements météorologiques intenses (tempêtes ou canicules), et le niveau des mers entraîne des contraintes fortes sur le milieu côtier. Dans les zones côtières soumises aux apports fluviaux, le changement d'intensité et de répartition saisonnière des apports liés aux événements hydrologiques extrêmes (crues-éclair ou étiages) représente des fluctuations majeures des apports de ressources nutritives et de contaminants au milieu côtier et de leur devenir, affectant les écosystèmes de ces zones. De plus, la multiplication des phénomènes de tempête place les côtes sous forte contrainte érosive, qui conjuguée à la limitation des apports particuliers et à l'élévation du niveau des mers, dessine un recul généralisé du trait de côte.

Cette conjonction de l'activité humaine et du changement climatique rend les zones côtières particulièrement vulnérables et le premier enjeu scientifique est de com-

prendre finement les mécanismes de fonctionnement de ces zones complexes par la combinaison d'études de terrain et de laboratoire et la mise en place de modèles mathématiques de fonctionnement afin de proposer des pistes d'action pour une gestion soutenable de ces milieux.

Par ailleurs, les mers côtières représentant une ressource nutritive essentielle pour l'humanité et un lieu de vie pour un 1/3 des habitants de la planète, le deuxième défi est d'établir un lien entre les chercheurs, les gestionnaires et les acteurs de la société (professionnels, élus, associations, riverains) le plus tôt possible afin de pouvoir élaborer des solutions pérennes pour l'environnement et respectueuses des activités humaines.

4 LES APPROCHES PHYSICO-CHIMIQUES DE L'ATMOSPHÈRE

L'atmosphère est un milieu peu dense et donc un réservoir quantitativement de faible importance quand on le compare aux réservoirs massifs que sont les continents et les océans. A l'inverse, l'atmosphère étant un milieu très fluide au sein duquel la matière peut circuler très rapidement, les flux entrants et sortants y sont très importants et en font un lieu de transfert et d'échange essentiel pour le fonctionnement global du système Terre. L'atmosphère est également le premier milieu terrestre que le rayonnement solaire va devoir traverser avant d'atteindre la surface de la Terre. Les interactions entre les composés présents dans l'atmosphère et ce rayonnement solaire vont être détermi-

nantes pour le fonctionnement des espèces vivantes, de la chimie atmosphérique ou du climat. Un exemple bien connu est celui de la présence de fortes concentrations d'ozone dans la stratosphère qui permet de limiter le rayonnement de courte longueur d'onde, très agressif, atteignant la surface de la Terre ou encore celui de la présence de composés gazeux comme la vapeur d'eau ou le gaz carbonique qui contribuent à l'effet de serre naturel, essentiel à l'établissement de conditions de vie optimales pour de nombreuses espèces.

Or, depuis quelques décennies, les conséquences des rejets d'espèces gazeuses dans l'atmosphère par les activités humaines conduisent à une modification significative de sa composition en espèces-trace.

Pour les espèces les moins réactives comme le gaz carbonique, le méthane, l'oxyde nitreux, la conséquence de ces rejets est une augmentation progressive de leur concentration dans l'atmosphère. Comme ces composés ont des propriétés d'absorption des rayonnements à certaines longueurs d'onde, notamment à celles auxquelles est réémis une partie du rayonnement tellurique, cette augmentation de leur concentration conduit à un effet de serre additionnel. Par ailleurs, certains de ces composés comme les CFC (ChloroFluoroCarbures) vont pouvoir atteindre sans encombre la stratosphère où des rayonnements plus énergétiques vont les dissocier et leur permettre de détruire l'ozone stratosphérique.

Pour les composés gazeux les plus réactifs (souvent les plus agressifs pour les hommes, les animaux et les plantes) leur présence (et celles de leurs produits de dégradation) à « forte » concentration dans les milieux urbains ou industriels est suspectée de pouvoir affecter la santé humaine et les rendements agricoles.

Mais, si l'atmosphère est un mélange gazeux, c'est aussi le réceptacle de près des trois milliards de tonnes de matière solide émises chaque année par des phénomènes naturels bien connus (comme les tempêtes de sable responsables de la présence de fines particules de sol dans l'atmosphère ou les vagues océaniques à l'origine des embruns marins) ou par les activités anthropiques, notamment pour ce qui concerne les sulfates et particules carbonées.

Depuis plus de 50 ans, les scientifiques tentent de comprendre comment ces particules de taille nano et micrométrique, généralement appelée un peu abusivement « aérosols », participent aux grands cycles biogéochimiques, influencent le climat, modifient la chimie atmosphérique ou affectent la santé humaine.

Aujourd'hui, l'importance pour le phytoplancton du dépôt en Océan ouvert de nutriments et de micronutriments lié au transport sur des milliers de kilomètres de poussières désertiques est établie.

De même, des études récentes conduites un peu partout dans le monde ont montré que des concentrations élevées en particules atmosphériques conduisaient à des décès anticipés.



Interaction entre particules et atmosphère, observée au Mali durant la campagne AMMA sur la mousson africaine (CNRS Photothèque / F. GUICHARD, L. KERGOAT).

Enfin, le forçage radiatif des aérosols demeure l'une des incertitudes majeures des simulations numériques des modèles climatiques en raison tant de la complexité de la nature physico-chimique des particules, de la variabilité spatiale et temporelle de leurs concentrations que de leurs effets complexes à évaluer qu'ils induisent sur les propriétés et la durée de vie des nuages.

Les principaux enjeux actuels liés à l'évolution de la composition de l'atmosphère s'inscrivent évidemment dans ce cadre général. Ils concernent en premier lieu l'évolution du climat, notamment au travers d'une meilleure compréhension des sources et puits des gaz à effet de serre (GES), du rôle précis joué par les aérosols à la fois sur le rayonnement mais également sur la formation et les propriétés des nuages. Ils ont trait également à la pollution atmosphérique au travers de l'étude des processus multiphasiques, de l'impact du nombre croissant de « Mégacités » sur la qualité de l'air.

5

LES PHÉNOMÈNES HYDRO-CLIMATIQUES EXTRÊMES



Cyclone Sandy au dessus de la côté Est des Etats-Unis (NOAA/NASA).

Les phénomènes hydro-climatiques extrêmes sont à la croisée d'enjeux sociétaux et scientifiques relevant à la fois des approches méthodologiques et du développement des connaissances.

Sur le plan sociétal, les conséquences, parfois très coûteuses en termes humains et matériels, des événements hydro-climatiques extrêmes font naturellement s'interroger sur l'évolution des risques associés dans un contexte de changements environnementaux.

Sur le plan scientifique, l'analyse de ces phénomènes et de leur évolution se heurte à une première difficulté de reconstruire des chroniques suffisamment longues et homogènes à partir d'archives de données

anciennes et d'observations récentes de nature différente.

Un autre enjeu lié à l'observation consiste en la difficulté à recueillir des ensembles de données rendant compte des hétérogénéités spatiales et de la variabilité temporelle des événements.

Une autre difficulté méthodologique concerne la modélisation statistique à la fois dans l'espace et dans le temps s'appliquant à des événements parfois très localisés et par définition rares.

Une troisième difficulté est relative à la modélisation de ces phénomènes, souvent de petites échelles spatiales, pour en simuler les évolutions passées et futures sur de longues périodes de temps.

Les enjeux de connaissances sont multiples : elles comprennent les questions des mécanismes de génération, des interactions entre ces phénomènes et les processus de plus grande échelle, de l'évaluation des impacts et vulnérabilités des sociétés, ou encore celle de la capacité à les prévoir ou à en anticiper les effets.

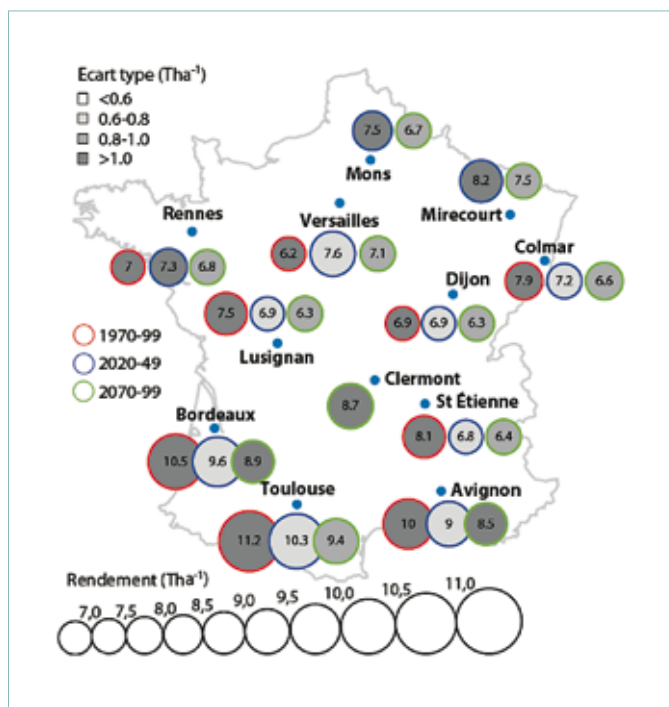
Un autre enjeu du thème est que la question ultime de l'étude de l'évolution des risques associés aux événements hydro-climatiques extrêmes dans un contexte de changement environnemental, nécessite le développement d'une approche pluridisciplinaire associant a minima sciences physiques, mathématiques (statistiques), humaines et sociales.

6

LA VULNÉRABILITÉ DES AGRO- ÉCOSYSTÈMES AUX CHANGEMENTS GLOBAUX ET LEUR ADAPTATION

L'Homme a largement utilisé et façonné son milieu pour son développement et son confort. L'essor de l'humanité tel qu'on le connaît repose sur le développement et l'intensification de l'agriculture, de l'utilisation des écosystèmes dits naturels (forêts, zones côtières, océans,...) et l'exploitation massive des agro-ressources pour faire face aux besoins alimentaires d'une population mondiale de plus en plus nombreuse et des ressources énergétiques (charbon, pétrole, gaz naturel, minéraux, roches). Les surfaces continentales ont été largement anthropisées dans de nombreuses régions du monde : la végétation naturelle a été remplacée par des prairies, des cultures ou des surfaces construites. Un grand nombre de forêts sont exploités, avec un fort impact sur les sols, les paysages, les grands cycles biogéochimiques (carbone, soufre, azote, phosphore, potassium), l'ensemble étant également largement bouleversé par les activités humaines.

Les conséquences des activités anthropiques sur l'environnement en général et sur le climat en particulier, sont aujourd'hui avérées. Minimiser ces impacts constitue un défi à l'approfondissement nécessaire des connaissances sur les agro-écosystèmes d'une part, pour la société d'autre part, qui requiert à la fois des mesures d'atténuation et d'adaptation des systèmes de production, des espèces végétales et animales,



Evolution estimée des rendements du maïs irrigué au cours du 21^{ème} siècle (d'après Livre Vert Climator, INRA-ANR-ADEME, 2010).

comme c'est le cas pour le changement climatique et ce, par le développement d'approches pluridisciplinaires couplant les sciences biophysiques et les sciences humaines et sociales.

7

LA VULNÉRABILITÉ DES HYDROSYSTÈMES CONTINENTAUX AUX CHANGEMENTS GLOBAUX : LE CAS DES RESSOURCES EN EAU ET LEUR ADAPTATION



Inondation de l'Hérault en 1997 à Agde
(UMR GEODE, Nathalie Palacio).

Le concept d' « hydrosystème » apparaît dans les années 60 chez les géographes et les hydrologues anglo-saxons qui développent une approche systémique de la géomorphologie et de la dynamique fluviale. Avec l'adoption de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) et le développement des Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGEs) institués par la loi sur l'eau de 1992, la communauté hydrologique française s'est approprié ce concept, via notamment la création en 1994 du Programme National de Recherche en Hydrologie (PNRH) multi-organismes qui est

devenu ultérieurement le Programme National « ECosphère CONTinentale (ECCO) » co-financé en 2005 avec l'ANR. L'objectif était d'étudier par l'observation, l'expérimentation et la modélisation les flux et les bilans de masse et d'énergie dans l'atmosphère, les eaux superficielles et souterraines, en interaction étroite avec les cycles géochimiques et biologiques de l'environnement terrestre et intégrant les influences humaines.

Les changements globaux (climatique, démographique, énergétique, industriel, agricole, urbanistique...) ont un impact direct sur les milieux aquatiques, la dynamique fluviale et l'alimentation des nappes phréatiques. La vulnérabilité des hydrosystèmes continentaux à ces changements concerne directement les ressources en eau, les risques hydrologiques (inondations, crue-éclair, sécheresses), les services environnementaux des zones humides, la production agricole, l'efficacité des aménagements hydrauliques (alimentation en eau, régulation des régimes fluviaux, production d'énergie).

Parmi les changements anthropiques qui influencent le fonctionnement des hydrosystèmes, le réchauffement climatique doit être mis en exergue pour lequel l'accroissement des émissions de GES joue un rôle important de régulation de la température du globe et par conséquent sur la circulation atmosphérique et océanique, conditionnant ainsi les variables des hydrosystèmes telles que les précipitations et l'évaporation.

Les modifications de l'occupation des terres (déforestation par endroits, diminution des surfaces cultivées dans d'autres, dégradation biogéochimique des sols) sont également à l'origine d'importants bouleverse-

ments environnementaux tels que l'érosion des bassins versants, les pollutions par les matières dissoutes ou en suspension, les aérosols impactant les bilans énergétiques, en particulier des zones glaciaires.

L'urbanisation croissante des surfaces continentales et l'augmentation de la population mondiale (i.e. 85 % d'urbains à l'horizon de 2030 pour les USA ou la CEI (Communauté des Etats Indépendants), plus de 90 % pour l'Allemagne ou l'Arabie Saoudite), sont responsables d'un accroissement des rejets d'effluents et d'imperméabilisation des milieux périurbains.

La DCE, élément majeur de la réglementation européenne concernant la protection globale des ressources en eaux douces, saumâtres ou salées, superficielles ou souterraines, stipule l'identification des eaux européennes et de leurs caractéristiques, par bassin et district hydrographiques, et l'adoption de « plans de gestion » et de « programmes de mesures » appropriés à chaque masse d'eau. L'objectif de la DCE pour 2015 est le retour à « bon état écologique » des milieux aquatiques et des bassins versants, seul moyen de garantir une gestion soutenable de la ressource en eau, vitale pour l'humanité et pour toutes les espèces vivantes connues. Sa mise en œuvre constitue un défi de connaissance sur le fonctionnement des hydrosystèmes en termes de quantité et de qualité, et sur leurs facteurs de forçage externes.

8 LA VULNÉRABILITÉ DES HYDROSYSTÈMES CONTINENTaux : LE CAS DES RESSOURCES EN SOL ET LEUR ÉVOLUTION FACE AUX CHANGEMENTS GLOBAUX

Le sol est une composante majeure des écosystèmes terrestres. Il est à l'interface entre l'atmosphère, la biosphère, la lithosphère, l'hydrosphère. Au sens strict, il s'agit de la couche de surface de la croûte terrestre localisée entre l'interface avec l'atmosphère et les substrats géologiques. Au sens large, qu'on considère ici, il s'agit de la couche précédente à laquelle on agrège la zone sous-jacente des aquifères superficiels qui est en forte interaction avec la précédente. Le sol est ainsi un médiateur essentiel des flux hydrologiques, déterminant le partage entre flux de surface et flux souterrains, mais aussi de la plupart des cycles biogéochimiques.

Il est par ailleurs le siège de la majorité des activités humaines. Il correspond donc à une ressource essentielle, dont le fonctionnement a une influence directe sur d'autres ressources, telles que la ressource alimentaire, les ressources en eau ou la biodiversité. Il est à présent reconnu comme étant une ressource à protéger, dont les services procurés, au sens des services écologiques, sont majeurs.



Un exemple d'érosion des sols (INRA, Orléans).

Suivant les expertises et analyses existantes, de 20 à 30 % des sols à l'échelle mondiale sont réputés dégradés, notamment par le phénomène d'érosion. L'enjeu de la conservation des ressources en sols est devenu tel qu'à l'occasion de Rio + 20 a été décidé un objectif d'un monde sans nouvelle dégradation des terres (« we will strive to achieve a land-degradation neutral world in the context of sustainable development »¹⁴).

La notion de dégradation reste toutefois imprécise. Dans l'absolu, elle impliquerait que l'on soit en mesure de définir un état de référence non dégradé. En pratique, la dégradation des sols se définit à présent plutôt par rapport au maintien ou à la perte de ses fonctions. C'est ainsi que l'Union Européenne prépare une Directive Cadre sur les sols qui met en avant 7 fonctions des sols à protéger : production de biomasse ; stockage, filtration et transformation des nutriments, substances et eau ; biodiversité ; environnement physique et culturel ; source de matériaux bruts ; archive géologique et archéologique.

Dans tous les cas, la dégradation des sols peut avoir une grande variété d'origines et concerne tant leurs propriétés physiques que chimiques et biologiques. Il est toutefois reconnu que les changements globaux provoqués par l'homme sont des moteurs majeurs de l'évolution des sols et de leur potentielle dégradation. Parmi eux, se distinguent i) les changements d'usage des terres, liés notamment à l'urbanisation, l'industrialisation, l'intensification des pratiques agricoles, ii) le changement climatique, iii) la dispersion accrue d'éléments biotiques et abiotiques, dont certains sont sources de pollution.

Dans ce contexte, les enjeux actuels sur les sols sont : i) de mieux définir et mesurer ce qu'est la dégradation des sols vis à vis de l'ensemble de ses composantes, ii) d'évaluer l'impact des changements globaux et iii) de définir des méthodes et outils de protection et de remédiation des sols.

Ces enjeux nécessitent en parallèle une amélioration des connaissances sur le fonctionnement des sols, mais aussi sur leur distribution dans les paysages et sur la variabilité de leurs propriétés.

¹⁴ ONU, 2012. Report of the United Nations Conference on Sustainable Development. Rio de Janeiro, Brazil, 20-22 June

Partie 2

Evolution de la programmation sur les changements globaux

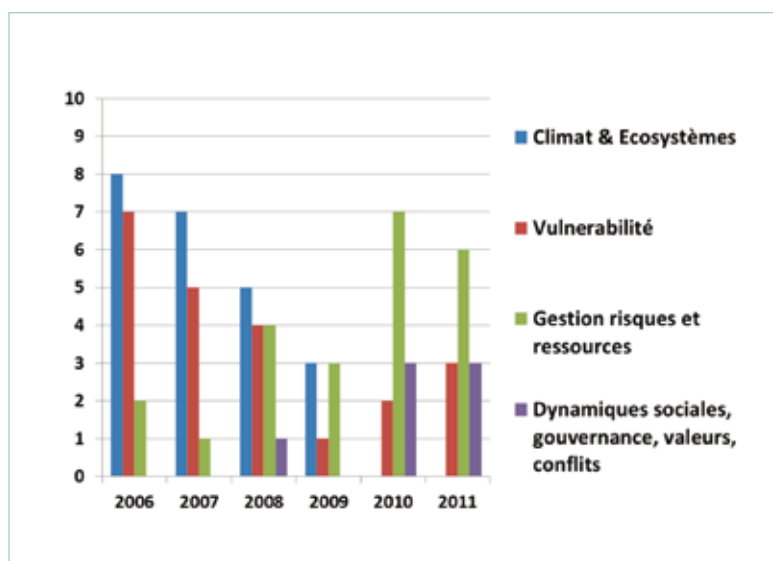
1

QUELQUES ÉLÉMENTS STATISTIQUES DES PROGRAMMES SUR LA PÉRIODE 2005-2009

LES PROGRAMMES THÉMATIQUES

Le programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés »

Les conséquences qui résultent des « Changements Globaux » deviennent de plus en plus prégnantes dans les compartiments essentiels de notre environnement. Elles justifient qu'elles soient abordées sous l'angle de la « vulnérabilité des systèmes naturels ou anthropisés » et des concepts associés, ce qui constitue un changement de paradigme en passant de la notion d'impact à celle plus novatrice et complexe de vulnérabilité des milieux physiques, biogéochimiques, biologiques et sociaux et ce, par la mise en œuvre d'approches intégrées, systémiques et transdisciplinaires. Dans ce contexte, le programme a notamment mis en exergue les priorités suivantes : i) le développement d'approches permettant de mieux caractériser la vulnérabilité d'un point de vue théorique, conceptuel et méthodologique, ii) les interactions d'échelles spa-



Evolution des thématiques abordées par les 75 projets financés dans le cadre des programmes ANR VMCS 2006-2008 et CEPS 2009-2011.

tio-temporelles, les boucles de rétroactions climat et milieux et au sein des milieux eux-mêmes, iii) les approches modélisatrices à différentes échelles, intégrant les situations de crise environnementale du passé, iv) l'établissement et l'évaluation d'indicateurs dynamiques de la vulnérabilité pouvant notamment être utilisés pour l'observation, les stratégies socio-économiques d'adaptation des systèmes environnementaux à moyen (les 20 à 30 prochaines années) et à long terme (le 21^{ème} siècle).

Les trois éditions 2006-2008 du programme ont conduit au financement de 44 projets pour un montant total de 26,1 M€. Elles ont mobilisé 235 partenaires dont 14 entreprises, soit environ 5 partenaires par projet financé.

Sept projets ont été labellisés par les pôles de compétitivité : Gestion des risques, Vulnérabilité des territoires (3), Génie Civil Ouest (1) Risques (1) et Mer Paca (2) pour un montant total de 55 680 €.

Le programme « Changements Environnementaux Planétaires, CEP »

Bâti à partir des premiers éléments proposés par l'Atelier de Réflexion Prospective mené par l'ANR au cours de l'année 2009, et en vue d'accélérer la coordination et l'intégration des recherches françaises sur la problématique ESSP, le programme a défini cinq axes thématiques : i) l'étude de la vulnérabilité et de l'adaptation des sociétés aux CEP, prenant en compte les aspects de gouvernance, ii) l'aménagement des territoires et les modes d'occupation des sols agricoles, sylvicoles, urbains, périurbains, côtiers, iii) le rôle de la biodiversité sur le fonctionnement des écosystèmes naturels/anthropiques, continentaux/marins, iv) les ressources naturelles (en particulier l'eau et les sols) et la sécurité alimentaire et ce, en relations avec les acteurs de la société, v) les effets directs et indirects des CEP sur la santé humaine, qu'ils soient comportementaux, sociaux ou génétiques.

La première édition 2009 du programme a permis le financement de 7 projets pour un montant total de 4,86 M€. Elle a mobilisé 34 partenaires dont une entreprise, soit pratiquement 5 partenaires par projet financé. Deux projets ont été labellisés par les pôles de compétitivité : Aérospace Valley et Mer Bretagne pour un montant total de 37 059 €.

Le programme « Gestion et Impacts du Changement Climatique » du MEDDE

Le programme a pour objectif de contribuer au développement des connaissances sur les changements climatiques vus sous l'angle aussi bien de leurs impacts que des mesures d'atténuation des gaz à effet de serre et d'adaptation au changement climatique. A cette fin, il cherche à mobiliser des équipes associant les sciences physiques et biologiques pour la connaissance des impacts ainsi que les sciences humaines et sociales au regard de l'atténuation et de l'adaptation.

Ainsi, le programme vise à apporter des réponses aussi scientifiquement fondées que possible aux questions posées par les instances politiques nationales, européennes et internationales.

En relation avec le thème du présent Cahier, les éditions 2005 et 2008 ont conduit au financement de 8 projets, pour un montant total de 1,78 M€. Elles ont mobilisé 43 partenaires dont 2 entreprises, soit un peu plus de 5 partenaires par projet financé.

LES PROGRAMMES NON THÉMATIQUES DE L'ANR

Ce Cahier présente uniquement les programmes « Blanc » et « Jeunes Chercheurs et Jeunes Chercheuses, JCJC » relevant des appels à projets du CSD 6 « Sciences de l'univers et géo-environnement » de l'ANR.

Les cinq éditions 2005-2009 du programme Blanc ont permis le financement de 45 projets pour un montant total de 21,4 M€, mobilisant 240 équipes dont deux entreprises, soit un peu plus de 5 partenaires par projet. Sur la même période, 13 projets ont été financés par le programme JCJC pour une somme de 2,02 M€ attribuée à 32 équipes, soit une moyenne de 2,5 partenaires par projet.

Projets portés par les Pôles de compétitivité

Pôles de compétitivité	Nombre de projets labellisés	Acronyme du projet
Aérospatiale Valley	1	CECILE
Génie Civil de l'Ouest	1	AVuPUR
Gestion des risques, vulnérabilité des territoires	3	EXTREMA SHIVA VULCAIN
Mer PACA	2	EXTREMA MISEEVA
Mer Bretagne	1	MACROES
Euroméditerranée Risques	1	VULSACO

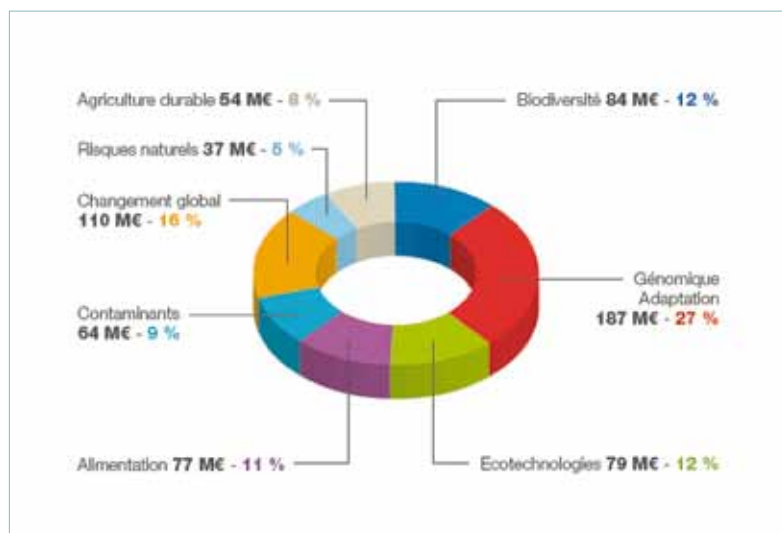
Un bref bilan

Sur la période de 2005 à 2009 détaillée par le Cahier, les problématiques environnementales à grande échelle ont été soutenues à hauteur de 55 M€ par l'ANR et le GICC (pour 2 M€), les 118 projets financés se répartissant à parts sensiblement égales entre les programmes thématiques et non thématiques. Ils ont mobilisé 540 équipes dont une vingtaine d'entreprises, de PME/ TPE, d'associations.

Il convient de noter que bon nombre de ces projets ont reçu, en sus des financements des programmes de l'ANR et les salaires associés des permanents des organismes et établissements de recherche (regroupés majoritairement au sein de l'Alliance Environnement, AllEnvi), des appuis technologiques et/ou logistiques de plusieurs institutions françaises telles que le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales), la DT-INSU (Division Technique de l'Institut National des Sciences de l'Univers du CNRS), l'Ifremer (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer), l'IPEV (Institut Polaire Paul-Emile Victor, notamment dans le cadre de l'Année Polaire Internationale 2007-2008), les SOERE (Système d'Observation et d'Expérimentation pour la Recherche en Environnement d'AllEnvi, l'UMS SAFIRE (Unité Mixte de Service commune au CNRS/INSU, à Météo-France et au CNES), ainsi que des appuis européens et étrangers, notamment dans le cadre de grands programmes internationaux.

Enfin, on ne saurait oublier qu'une bonne vingtaine de chercheurs français impliqués dans la thématique des changements globaux (climatiques et anthropiques) participent activement aux travaux du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat (GIEC). Avec le prix Nobel de la Paix attribué en 2007 conjointement à Al Gore et aux membres du GIEC, c'est l'expertise scientifique de la communauté française dans ce domaine qui a été portée à la connaissance d'un large public.

2 LES NOUVELLES IMPULSIONS DEPUIS 2009



Répartition thématique des budgets ANR dans le domaine Environnement et Ressources Biologiques sur la période 2005-2012 (Blanc et JCJC inclus, hors Investissements d'Avenir).

Depuis 2009, un ensemble d'actions ont été entreprises au niveau national, européen et international pour renforcer la recherche sur les enjeux environnementaux à grande échelle et son lien aux divers développements des sociétés humaines à la surface du globe. Outre la poursuite des programmes thématiques (CEPS 2010-2011 et SOCENV 2012-2013) et non thématiques (Blanc et JCJC), on retiendra les actions structurantes décrites ci-après.

LES ATELIERS DE RÉFLEXION PROSPECTIVE DANS LE DOMAINE DE L'ENVIRONNEMENT VUS COMME DES PRÉCURSEURS DE PROGRAMMES ANR OU D'AUTRES¹⁵

ARP CEP (2009-2010) sur les Changements Environnementaux Planétaires

L'analyse critique des trois éditions du programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés » a conduit l'ANR à proposer fin 2008, la création de l'Atelier de Réflexion Prospective (ARP) « Changements Environnementaux Planétaires, CEP » visant à identifier quelques questions centrales et fédératives dans le domaine des CEP telles que :

- ◆ Quelles sont les trajectoires démographiques, économiques, techniques et sociales, à faible impact environnemental, qui permettent d'assurer les besoins fondamentaux des sociétés ?
- ◆ Quels sont les impacts globaux des différentes options régionales d'occupation du territoire (urbain, rural, naturel et marin) ?
- ◆ Comment mieux connaître, comprendre et prévoir les interactions entre écosystèmes (continentaux, marins et côtiers) et les CEP ?
- ◆ Comment évaluer les interactions alimentation de la population mondiale, ressources naturelles (eau, sol, vivant) et les CEP ?
- ◆ Quelles relations entre expertise, gouvernance et société face aux CEP ?

Pour chacune de ces questions, l'ARP a identifié les enjeux, les axes de recherche prioritaires, les approches de travail à développer qu'il a replacé dans le cadre des programmes internationaux des Sciences du Système Terre.

¹⁵ <http://www.agence-nationale-recherche.fr/ARP>

Les résultats de cet Atelier sont disponibles sur le site : <http://www.agence-nationale-recherche.fr/ARP-CEP>. Ils ont conduit l'ANR à lancer en 2009, l'appel à projets éponyme et auquel ont succédé les éditions 2010 et 2011, baptisées CEPS (S pour Sociétés), impulsant une mobilisation accrue des Sciences Humaines et Sociales sur ces enjeux.

ARP ADAGE (2009-2010) : Quelles recherches pour adapter l'agriculture et les écosystèmes anthropisés au changement climatique ?

L'Atelier a identifié quatre axes de recherche prioritaires :

- ◆ L'élaboration de modèles intégrant l'effet des paramètres climatiques sur la dynamique temporelle des écosystèmes anthropisés en termes de biodiversité et de santé ;
- ◆ La caractérisation des capacités de résilience et d'adaptation des systèmes concernés ;
- ◆ La modélisation des dynamiques spatiales à l'échelle du paysage et au-delà ;
- ◆ La gestion de l'évolution du risque sanitaire : le cas des agents transmissibles et des pathogènes.

Les résultats de cette réflexion prospective sont disponibles sur le site : <https://www.clermont.inra.fr/adage>. Ils ont servi de fondement au Méta-Programme de l'INRA ACCAF « Adaptation au Changement Climatique de l'Agriculture et de la Forêt ».



Atelier de Réflexion Prospective ADAGE



ARP PARME (2010-2011) : Quelles recherches et quels partenariats pour la Méditerranée ?

L'objectif de l'Atelier était d'identifier les domaines de recherche et d'innovation nécessitant des coopérations entre les pays du pourtour méditerranéen et de définir les modes opératoires associés dans une vision prospective à l'horizon 2030. La spécificité de l'ARP réside dans sa portée d'ordre géographique et non thématique. Il couvre en effet des domaines vastes et variés : cultures et civilisations, santé, ressources naturelles (en particulier l'eau et l'énergie), agriculture et alimentation. L'approche régionale est pertinente dans la mesure où les pays riverains de la Méditerranée sont étroitement liés, tant par la géographie que par l'histoire. Leurs destins le sont tout autant, aux plans environnemental, économique, social, culturel et politique. Ainsi, l'originalité de l'ARP PARME est d'inscrire

Atelier de Réflexion Prospective PARME
Partenariats et recherche en Méditerranée



l'ensemble des réflexions dans le contexte spécifique du monde méditerranéen, avec une approche prospective, pluridisciplinaire et transversale. Les grands enjeux de l'avenir de la région ont donc été abordés non pas de manière sectorielle mais avec une vision intégrative. Il en résulte trois grands domaines de recherche liant : i) les hommes et les femmes, les sociétés et leurs territoires, ii) les ressources naturelles : les milieux, l'eau, les sols et l'énergie, iii) l'agriculture, l'alimentation et la santé.

Les problématiques ont été raisonnées en privilégiant les populations et leurs territoires, à différentes échelles, du micro-local au macro-régional, pour favoriser un développement durable de la région.

Les résultats sont disponibles sur le site : <http://www.agropolis.fr/arp-parme>.

ARP REAGIR (2012-2013) :
Quelles recherches conduire
sur la géo-ingénierie
environnementale ? Avec quelles
priorités ?

L'objectif de l'Atelier est de développer une réflexion globale et systémique sur l'ensemble des méthodes de géo-ingénierie de l'environnement envisageables à l'échelle régionale et globale. Il s'intéresse à la fois à l'aspect de faisabilité scientifique et technique, mais aussi aux aspects environnementaux, socio-économiques et éthiques, en prenant en compte les incertitudes et les risques. La géo-ingénierie de l'environnement suscite à la fois des espoirs, des interrogations, compte tenu de nos connaissances encore très imparfaites sur les relations climat-environnement-sociétés, et des craintes, parce qu'elle ne pourrait qu'être une illusion qui détournerait l'attention des citoyens et des politiques des problèmes environnementaux. En tout état de cause, il est important que la France dispose de l'expertise nécessaire pour émettre des avis fondés sur les questions qui se posent et se poseront au niveau politique. Seule une recherche objective et multidisciplinaire sur le sujet permettra de répondre aux interrogations légitimes des citoyens, d'évaluer les risques associés à ces méthodes émergentes de géo-ingénierie, mais également de profiter des opportunités qui pourraient émerger pour améliorer l'environnement ou tout du moins en limiter la dégradation. Les réflexions de l'ARP déboucheront à la fois sur une synthèse des connaissances et des incertitudes, sur l'identification des priorités de recherche et d'acquisition de nouvelles directions dans ce domaine.



Voir le contenu de l'appel :

<http://www.agence-nationale-recherche.fr/Geoling> et le site du consortium retenu :

<http://arp-reagir.fr>.

ARP MathInfoTerre (2012-2013) : Mathématiques et complexité du Système Terre

L'Atelier est destiné à renforcer les liens entre Mathématiques et Sciences de la Terre, Sciences de la Vie, Sciences Humaines et Sociales dans le contexte de la soutenabilité conjointe du développement des sociétés humaines et de la préservation de l'environnement et des écosystèmes. Un dénominateur commun des problèmes du « Système Terre », englobant notamment le climat, les écosystèmes et les sociétés humaines, est leur extrême complexité. Au sein de cette problématique, l'impact des modèles et théories mathématiques a crû de manière importante au cours des dernières décennies, cependant le rôle potentiel des mathématiques pures et appliquées est encore sous-exploité. Les principaux objectifs de l'ARP sont :

- ◆ De faire un bilan de directions de recherche actuellement existantes faisant intervenir les sciences mathématiques dans l'étude du "Système Terre", en lien notamment avec l'initiative internationale MPE2013 (mpe2013.org) ;
- ◆ De promouvoir les interactions avec les sciences humaines et sociales sur les enjeux sociétaux environnement-développement ;

- ◆ D'élargir les interactions avec les sciences de la vie et de la terre (climat inclus) ;
- ◆ D'établir une vision stratégique sur les pistes de recherches à soutenir pour 2014-2018, voire au-delà.

Voir le contenu de l'appel :

<http://www.agence-nationale-recherche.fr/ARP-MathTerre> et le site du consortium

retenu : <http://demo4.labscinet.com>.

LES INVESTISSEMENTS D'AVENIR

Bénéficiant de fonds mobilisés au titre du grand emprunt national, le programme « Investissements d'Avenir (IA) » lancé en 2010 a pour objectif d'amplifier les capacités d'innovation de la France, et de jouer un rôle moteur dans la dynamique de croissance économique future du pays.

Plusieurs appels à projets de ce programme IA concernent les thématiques de ce présent Cahier « Environnement et Changements Globaux ».

L'appel à projets « Laboratoires d'Excellence¹⁶ »

destiné à sélectionner et doter avec des moyens significatifs des laboratoires à visibilité internationale (permettant de faire jeu égal avec leurs homologues étrangers), a permis de financer une quinzaine de structures liées au domaine des Sciences de la Terre et de l'Environnement :

- ◆ ARBRE (Recherches avancées sur l'arbre et les écosystèmes)
- ◆ BASC (Biodiversité, Agroécosystèmes, Société, Climat)

¹⁶<http://www.enseignement-sup-recherche.gouv.fr/cid55551/investissements-avenir-projets-labex-par-region-domaine.html#labex-domaine>

- ◆ CaPPA (Physique et Chimie de l'Environnement Atmosphérique)
- ◆ CEMEB (Centre Méditerranéen de l'Environnement et de la Biodiversité)
- ◆ CLERVOLC (Centre Clermontois de Recherche sur le volcanisme)
- ◆ CORAIL (Récifs coralliens face aux changements globaux de la planète)
- ◆ COTE (Evolution, adaptation et gouvernance des écosystèmes continentaux et côtiers)
- ◆ DRIIHM/IRDHE (Dispositif de Recherche Interdisciplinaire sur les Interactions Homme-Milieus)
- ◆ G-EAU-THERMIE-PROFONDE (Fond de recherche en géothermie profonde)
- ◆ ITEM (Innovation et Territoires de Montagne)
- ◆ L-IPSL (LabEX Institut Pierre Simon Laplace : comprendre le climat et anticiper les changements futurs)
- ◆ MER (L'Océan dans le changement)
- ◆ OSUG@2020 (Stratégies innovantes pour l'observation et la modélisation des systèmes naturels)
- ◆ OTMed (Objectif Terre : Bassin Méditerranéen)
- ◆ RESSOURCES21 (Ressources métalliques stratégiques du 21^{ème} siècle)
- ◆ VOLTAIRE (Etude des géofluides et des VOLatils-Terre, Atmosphère et Interfaces-Ressources et Environnement)

L'appel à projets « Equipements d'excellence¹⁷ »

particulièrement important pour maintenir la compétitivité de l'ensemble des domaines de recherche à un standard international, vise à doter la France d'équipements scientifiques de taille intermédiaire, performants, accessibles et utilisables par les différentes disciplines.

Les EquipEx suivants relèvent également du domaine des Sciences de la Terre et de l'Environnement :

- ◆ ASTER-CEREGE (Plateforme de géochimie isotopique)
- ◆ CLIMCOR (Carottage paléoclimatique : haute résolution et innovations)
- ◆ CRITEX (Parc national d'équipements innovants pour l'étude spatiale et temporelle de la zone critique des bassins versants)
- ◆ EcoX (Instrument microfocus à très haute dilution à l'ESRF pour les sciences de l'environnement)
- ◆ GEOSUD (Infrastructure nationale d'imagerie satellitaire pour la recherche en environnement et les territoires et ses applications à la gestion et aux politiques publiques)
- ◆ IAOOS (Observatoire Océan-Glace-Atmosphère en Arctique)
- ◆ NAOS (Novel Argo Ocean Observing System)
- ◆ NOEMA (L'interférométrie millimétrique étendu de l'hémisphère nord)
- ◆ PLANAQUA (Ecotron Ile-de-France)
- ◆ PLANEX (Planète expérimentation : simulation et analyse *in situ* en conditions extrêmes)
- ◆ RESIF-CORE (Réseau sismologique et géodésique français : l'équipement fondamental)
- ◆ XYLOFOREST (Plateforme de recherche, d'innovation et de services forêt-bois-fibre-biomasse)

¹⁷<http://www.enseignement-sup-recherche.gouv.fr/cid56489/localisation-des-projets-investissements-d-avenir-equipements-d-excellence.html>

LE RENFORCEMENT DES LIENS DE L'ANR AVEC LES AGENCES ET LES STRUCTURES ÉTRANGÈRES DE FINANCEMENT DANS LE DOMAINE COUVERT PAR LE CAHIER

Les thématiques associées aux changements environnementaux à grande échelle sont par définition des problématiques transnationales, nécessitant un échange accru d'informations, de données et de connaissances et un partage de ressources humaines et d'infrastructures pour faire face à la diversité, la complexité et l'intrication des questionnements. Dans ce contexte, l'ANR, conjointement à ses programmes, a résolument développé à partir de 2009-2010, plusieurs actions complémentaires à l'international.

La construction de l'Espace Européen de la Recherche (ERA)

L'ANR s'implique, en lien direct avec AllEnvi et le MESR, dans la construction et le soutien à trois initiatives de programmation conjointe (JPI) dans le domaine du climat (<http://www.jpi-climate.eu>), des Océans (<http://www.jpi-oceans.eu>) et de l'agriculture et du changement climatique (<http://www.facejpi.com>). L'ANR joue un rôle moteur dans les définitions et les procédures des appels à projets conjoints, tant au sein des Groupes Miroirs français, regroupant Ministères, Alliances et ANR, qu'au niveau des « Governing Boards ».



La coopération avec les Pays émergents et les Pays les Moins Avancés

Un accord bilatéral a été conclu en 2009 avec les fondations de recherche du Brésil (FAPESP¹⁸, Sao-Paulo et FACEPE¹⁹, Recife), dans le domaine de l'environnement (programmes VMCS et CEPS). Il a été étendu dès 2012 aux programmes non thématiques (Blanc International SIMI6). De plus, afin de favoriser la coopération scientifique avec les Pays les Moins Avancés, notamment en Afrique, le programme CEPS a étendu ses capacités à soutenir des équipes du Sud autour de projets en co-responsabilité.

La coopération internationale dans le cadre de l'IGFA/Belmont Forum²⁰

Initiée en 2010 avec les principales Agences des pays du G7 et des pays émergents du BRICS, elle a pris son essor en 2012 par la signature d'un Memorandum of Understanding (MoU) pour mettre en place une suite d'appels à proposition conjoints dans les cinq années à venir. Après une co-présidence américano-anglaise, le Belmont Forum est sous la co-présidence française

¹⁸ <http://www.fapesp.br>

¹⁹ <http://www.facepe.br>

²⁰ <http://www.igfagcr.org/index.php/belmont-forum>

et sud-africaine en 2012-2014. La priorité est mise sur l'implication des utilisateurs de la recherche environnementale ainsi que sur l'interdisciplinarité, pour l'émergence de projets fortement innovants dans le nouveau cadre internationale « Future Earth²¹ ».

Le premier appel 2012, conjoint avec le G8-HORCS²², a porté sur la vulnérabilité des zones côtières et la sécurité des ressources en eau. Les prochaines thématiques en cours d'instruction portent sur la sécurité alimentaire et l'utilisation globale des terres, les infrastructures de données et d'informations, la vulnérabilité Arctique, les services climatiques, la biodiversité et les services écosystémiques, l'économie verte et le développement.

Ces trois volets ne sont pas indépendants et plusieurs appels conjoints sont envisagés :

Un co-alignement avec les outils de la Commission Européenne, membre du Belmont Forum, pour le nouveau Programme H2020²³, ainsi qu'avec les JPI concernés, est en cours d'instruction. Enfin, un autre enjeu est d'impliquer un nombre accru d'Agences de financement de la recherche pour le développement vers des actions plus orientées vers des solutions plus soutenables environnementalement.

²¹ <http://www.icsu.org/future-earth>

²² <http://agence-nationale-recherche.fr/programmes-de-recherche/IOF-2012>

²³ <http://www.ec.europa.eu/research/horizon2020>

Partie 3

Les 118 projets financés par l'ANR et le GICC

- 1 Les approches paléoenvironnementales, historiques et prospectives du climat
- 2 Les approches physiques, chimiques et biologiques des milieux polaires
- 3 Les approches physiques, chimiques, biologiques et sociétales des milieux océaniques et côtiers
- 4 Les approches physico-chimiques de l'atmosphère
- 5 Les phénomènes hydro-climatiques extrêmes
- 6 La vulnérabilité des agro-écosystèmes aux changements globaux et leur adaptation
- 7 La vulnérabilité des hydrosystèmes continentaux aux changements globaux : le cas des ressources en eau et leur adaptation
- 8 La vulnérabilité des hydrosystèmes continentaux : le cas des ressources en sol et de leur évolution face aux changements globaux

1

LES APPROCHES PALÉOENVIRONNE- MENTALES, HISTORIQUES ET PROSPECTIVES DU CLIMAT

LES PRINCIPALES AVANCÉES

Les projets retenus offrent une palette complète de l'étude des paléoclimats en couvrant une période clé de l'histoire climatique de la planète Terre depuis 34 Ma correspondant au rôle primordial du cycle du carbone, via notamment la longue diminution de la concentration de l'atmosphère en gaz à effet de serre et plus particulièrement du CO₂ qui constitue l'un des forçages principaux du changement climatique.

Par ailleurs, les développements méthodologiques et conceptuels apportés ont permis des analyses beaucoup plus fines des processus et mécanismes mis en jeu.

L'intérêt des projets réside également en l'étude des changements environnementaux passés, à des échelles temporelles variées avec l'importance de plus en plus grande accordée aux impacts anthropiques, nouveau facteur clé du changement climatique des derniers 3 000 ans et à venir.

L'ensemble des résultats place les équipes françaises dans une position de leadership dans leur domaine respectif.

Des enregistrements paléoclimatiques à la modélisation du climat

L'utilisation du modèle 3-D de circulation générale FOAM (Fast Ocean Atmosphere Model) a montré que le début de la décroissance de la concentration en CO₂ vers 34 Ma s'est faite par étapes durant lesquelles outre le forçage astronomique du climat toujours présent, les forçages internes et notamment tectoniques sont survenus une fois l'accumulation de glace mise en place sur l'Antarctique et le Groenland, l'ouverture de passages océaniques ayant réorganisé la circulation océanique. Par contre, le CO₂ est bien le forçage principal de l'entrée vers le monde « glaciaire » ayant culminé durant le Quaternaire, la mise en place du courant circum-Antarctique à la suite de l'ouverture des passages de Drake et de Tasmanie et de la fermeture du passage de Panama bien que jouant un rôle de plus en plus important par la suite, pour des concentrations inférieures à 700 ppmv (partie par million en volume), n'étant qu'un sous-produit d'une rétroaction positive de cette évolution.

Une fois ce décor planté, les études réalisées sur des périodes plus récentes, durant le dernier million d'années, combinant

des enregistrements à haute résolution et impliquant la définition de cadres chronologiques plus précis, ont permis la caractérisation plus fine d'événements abrupts ainsi que de la variabilité climatique, que ce soit durant les phases interglaciaires-glaciaires, mais aussi les périodes intermédiaires clés de bascule entre des régimes glaciaire et interglaciaire. Une fois de plus, le couplage entre climat et cycle du carbone qui s'avère étroit affecte la réponse des calottes glaciaires.

Un saut temporel a été réalisé avec l'étude de la variabilité climatique au cours des derniers 800 000 ans, période durant laquelle le climat a vu des cycles répondant principalement aux variations de l'obliquité, 40 000 ans, jusque vers 400 000 ans, pour passer à des cycles de 100 000 ans, liés aux variations de l'excentricité de l'orbite terrestre. La confrontation de nouveaux enregistrements à haute résolution issus d'archives polaires, continentales et marines avec des simulations numériques a mis notamment en évidence une forte variabilité de l'intensité, de la durée et de l'évolution des températures de l'Antarctique, de la surface et du fond des océans, du CO₂ et du CH₄ atmosphérique, ainsi que de la couverture végétale et ce, au cours des différentes interglaciations de la période considérée.

Une campagne de carottages réalisée entre 600 et 3500 m de profondeur sur la marge nord du Brésil a permis de retracer l'évolution de la thermocline par des analyses géochimiques détaillées de la circulation méridienne atlantique durant les derniers 60 000 ans, moteur des changements affectant la production de l'eau profonde Nord-Atlantique qui représente un forçage important du climat dans l'Hémisphère Nord.

Des événements de fonte de la calotte fénno-scandinave, véhiculés via « le paléofleuve Manche » ont été enregistrés et modélisés. Les résultats montrent qu'ils coïncident à ceux enregistrés dans l'Atlantique Nord sous la forme d'apports d'eau douce modifiant ainsi la circulation atlantique méridienne et affectant notamment le climat de l'Europe occidentale et de la Méditerranée. Les modélisations atmosphériques utilisées pour le long terme montrent également qu'au-dessus d'un seuil d'émission de CO₂ situé entre 2 500 et 3 000 Gt de carbone, la fonte de la calotte groenlandaise est irréversible.

Les changements climatiques abrupts particuliers, appelés événements de Dansgaard-Oeschger et de Heinrich, qui affectent la circulation thermohaline et impactent le climat du Groenland, ont été étudiés en combinant les enregistrements des dépôts éoliens européens et de la glace groenlandaise avec des simulations numériques. Les résultats mettent en évidence le rôle des sources régionales de la poussière transportée et les processus de son émission. Ils confirment les vitesses d'accumulation mesurées *in situ* par les datations OSL et ¹⁴C.

L'impact de l'activité solaire a été plus particulièrement cerné pour les 2 derniers millénaires par une étude à haute résolution des cosmonucléides comme le ¹⁰Be et le dénombrement des événements volcaniques en Antarctique, forçage amplificateur, et dont certains n'avaient pas été identifiés jusqu'à maintenant, sont autant d'éléments nouveaux permettant une meilleure contrainte des modèles climatiques utilisés pour caractériser cette période particulière de l'histoire climatique de la Terre.

De l'analyse des données historiques aux impacts anthropiques et à la modélisation des changements globaux

Alors que les déplacements de la zone de convergence intertropicale (ITCZ) sont particulièrement importants tant pour le climat global que pour le climat régional et local, une étude de la période humide saharienne survenue à la fin de l'Holocène a été menée sur trois bassins africains (le lac Tchad endoréique, le lac saharien Yoa alimenté par des nappes fossiles et les zones littorales des Niayes au Sénégal). Les résultats obtenus dans le cadre d'une démarche multidisciplinaire intégrant une analyse palynologique à haute résolution au Sahara et la modélisation hydrologique montrent une dominance des vents de mousson jusque vers 4700 BP ayant permis le développement et la migration septentrionale d'une végétation tropicale et d'une riche biodiversité faunique associée, ainsi que d'une forte présence anthropique. Une courte période de transition entre 4500 et 2700 BP a vu la mise en place des conditions arides actuelles exprimées par une forte dominance méditerranéenne marquée par un renforcement des vents dominants Nord-Est, Sud-Ouest liés au recul méridional de l'ITCZ.

Ces variations de l'ITCZ ont également été enregistrées en Amérique du Sud ou lors du Petit Age Glaciaire, avec une extension des glaciers Andins, mais aussi une aridité dans le Nordeste brésilien et un gradient croissant Est-Ouest en Afrique tropicale. Par ailleurs, si le Moyen Age correspond à un optimum climatique, il est toutefois différent du réchauffement actuel par la très grande hétérogénéité spatiale et la fréquence accrue des canicules en Europe. Les résultats

montrent également que cette variabilité pré-20^{ème} siècle peut être reliée à l'activité solaire, mais avec des facteurs amplificateurs selon les régions.

Le croisement des données paléoenvironnementales et bioarchéologiques sur plusieurs milliers de sites couplées à une modélisation multi-agents a permis d'évaluer la réactivité et la résilience aux impacts climatiques de la société des premiers agriculteurs à l'époque du Rubané en Europe, environ 5600-4900 BP. Les résultats suggèrent l'émergence d'une nouvelle sous-discipline : l'archéologie des processus socio-naturels, située à l'intersection de l'archéologie culturelle et des sciences archéologiques environnementales.

La variabilité climatique pré-industrielle a été reconstruite pour la France à partir de la collecte d'informations historiques sur la phénologie (date des vendanges, de floraison des arbres fruitiers, des moissons) depuis 1350, la météorologie et les contextes économique-politiques locaux palliant ainsi l'absence de relevés météorologiques avant le 17^{ème} siècle.

Toutefois, un même forçage climatique n'engendrera pas nécessairement une réponse identique dans des environnements proches de l'actuel, comme le met en évidence l'étude des grands lacs périalpins de géomorphologie comparable, variant entre une quasi insensibilité à une très forte vulnérabilité. Les résultats, obtenus par la reconstitution de l'histoire écologique et sédimentologique au cours des 150 dernières années combinée à des méthodes géochimiques et isotopiques, montrent que ces différences résultent des variations dans l'intensité des pressions anthropiques locales, notamment

les modifications décennales des apports en nutriments et des pratiques de gestion piscicole des 30 dernières années.

Une vision intégrée de l'évolution du climat, des paysages et des activités humaines a été développée à l'échelle des Alpes françaises du Nord par différentes méthodes classiques (palynologie, archéologie, sédimentologie, dendrochronologie) renforcées par de nouveaux outils (scanner géochimique, isotopes de l'oxygène, marqueurs moléculaires des espèces végétales). Les résultats montrent un impact anthropique généralisé sur la stabilité des versants, des zones de montagne au piémont, durant la période romaine. Par ailleurs, les périodes chaudes ont favorisé des événements torrentiels extrêmes se traduisant par une augmentation depuis 3 000 ans des flux détritiques d'origine glaciaire. Enfin, l'apparition de la culture du millet sur les rives du lac du Bourget vers 1600 BP accompagnée d'un changement des pratiques agricoles a augmenté l'érosion des sols superficiels.

Les approches paléoenvironnementales, historiques et prospectives du climat

Acronyme et nom du projet		Le projet en un titre
COLORS	Icehouse-greenhouse transition: Lessons from deep ice ages	Comprendre l'origine de notre équilibre climatique actuel
PICC	Intégration des contraintes Paléoclimatiques pour réduire les Incertitudes sur l'évolution du Climat des périodes Chaudes	Caractériser et comprendre la dynamique du climat pendant les périodes interglaciaires
RETRO	Response of tropical Atlantic surface and intermediate waters to changes in the Atlantic meridional overturning circulation	Prélever des sédiments marins pour comprendre le rôle de l'Océan dans les changements climatiques
IDEGLACE	Impact de Décharges d'eau douce provenant de la Glace continentale sur le Climat Européen et méditerranéen	Changements climatiques abrupts liés aux calottes glaciaires : documentation et prévisions
ACTES	Abrupt Climate Changes in Terrestrial european Eolian RecordS	Les changements climatiques abrupts en Europe pendant la dernière glaciation
VOLSOL	Forçages climatiques naturels volcanique et solaire	La glace d'Antarctique sous le feu du Soleil et des volcans
SAHELP	Vulnérabilité du Sahara et du Sahel : les leçons du passé	Le passé, source indispensable d'enseignement sur la vulnérabilité environnementale face au climat
ESCARSEL	Evolution Séculaire du Climat dans les régions circum'Atlantiques et Réponses des Systèmes Eco-Lacustres	Du Moyen-Age au 21 ^{ème} siècle: climat, forçages et impacts
OBRESOC	Un observatoire rétrospectif d'une société archéologique : la trajectoire du néolithique Rubané	Les impacts environnementaux sur le destin d'une société archéologique
OPHELIE	Observations Phénoménologiques pour reconstruire le climat de l'Europe	Histoire et phénologie pour la reconstruction du climat en Europe
IPER-RETRO	Impact des perturbations anthropiques sur les réseaux trophiques en lacs : approche paléo-écologique	Les pressions humaines locales déterminent la vulnérabilité des lacs au changement climatique
PYGMALION	Paléohydrologie et interactions homme-climat-environnement dans les Alpes	Hommes et Climats ont façonné les paysages des Alpes

Programme « Jeunes Chercheurs, Jeunes Chercheuses », édition 2009

COLORS

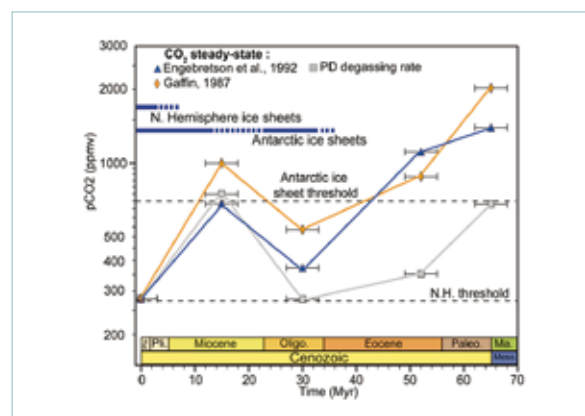
Comprendre l'origine de notre équilibre climatique actuel

Modélisation de la mise en place des calottes polaires en Antarctique et au Groenland au cours des derniers 50 millions d'années

A de nombreuses reprises, la vie a été mise en danger au cours de l'histoire de notre Terre suite à des changements extrêmes de l'environnement (impact d'astéroïde, volcanisme intense). Des changements plus graduels tel que le refroidissement climatique qui a commencé il y a 34 millions d'années (i.e. Ma) ont aussi permis l'installation de nouveaux écosystèmes en créant de nouvelles niches écologiques. En effet, il y a 50 Ma, la Terre était très chaude, les zones polaires enregistraient des températures annuelles de plus de 10°C, les continents polaires étaient recouverts de végétation et l'atmosphère contenait sûrement de 4 à 16 fois plus de CO₂ qu'aujourd'hui ! Notre monde est 5 à 10°C plus froid que celui d'il y a 50 Ma. Ce refroidissement s'est traduit par plusieurs événements, en particulier, la mise en place de la calotte de glace sur le continent Antarctique il y a 34 Ma, puis de la calotte sur le Groenland il y a 3 Ma. Le projet COLORS porte sur la compréhension des mécanismes à l'origine de ce refroidissement. Il a pour objectif de simuler l'évolution de la teneur en CO₂ dans l'atmosphère. Une des originalités du projet repose sur le développement et l'utilisation de modèles simulant simultanément le climat et le cycle du carbone en réponse à la dérive lente des continents. Une autre originalité est d'étudier les mécanismes relevant de plusieurs échelles de temps au sein du même projet. Les influences de la tectonique horizontale et verticale, des changements de dynamique océan-atmosphère et des paramètres orbitaux seront ainsi prises en compte.

Un modèle du cycle du carbone à l'échelle des temps géologiques

L'estimation de la teneur en CO₂ dans l'atmosphère sur les derniers 50 Ma reposent sur des modèles numériques de cycle du carbone où le forçage climatique est global. Le projet développe de nouvelles méthodes pour générer un forçage climatique tridimensionnel afin de mieux évaluer l'impact de l'altération des continents (principal puits de CO₂) qui dépend de la température et de la quantité d'eau ruisselant sur les continents. De plus, la quantification du CO₂ prend en compte différents scénarii d'émission de dégazage de la Terre interne (volcans, rides médio-océaniques), les changements d'altérabilité liés à la nature des sols (granites vs. basaltes) mais également la mise en place des grandes chaînes de montagnes actuelles (système Himalayen, les Andes, les Alpes). L'impact des modifications de la dynamique océan-atmosphère faisant suite à l'évolution des passages marins critiques (ouverture du passage de Drake à 35 Ma, fermeture du passage de Panama à 2.7 Ma) est aussi considéré dans l'évaluation des puits de carbone que ce soit celui directement lié au climat (l'altération), ou celui lié à la production primaire dans les océans.



Importance du transport longue distance sur les concentrations et la Simulation de la teneur en CO₂ dans l'atmosphère depuis 65 Ma. Les seuils d'englacement de l'Antarctique (700 ppmv) et du Groenland (280 ppmv) sont tracés en pointillés. Les courbes en bleu et orange correspondent aux simulations tenant compte du dégazage variable.

COLORS « Icehouse-greenhouse transition: Lessons from deep- times ice ages » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement). Il associe le GET (Géosciences Environnement Toulouse). Le projet a débuté en octobre 2009 pour une durée de 48 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 141 k€ pour un coût global de 1,1 M€.

Résultats majeurs

La teneur en CO₂ préindustrielle de 280 ppmv semble avoir été atteinte il y a 3 Ma, tandis que les teneurs étaient autour de 560 ppmv il y a 15 Ma et plus de 1000 ppmv avant 34 Ma. Nos résultats préliminaires montrent qu'au contraire, la position des continents antérieure à 15 Ma favorisait un climat plus humide qu'aujourd'hui et donc un lessivage des continents accru résultant en une teneur en CO₂ avoisinant les valeurs actuelles. Le projet conclut que la dérive des continents a prédisposé la Terre vers un état froid bien avant l'installation effective du mode climatique glaciaire actuel. Seule la prise en compte de forts taux de dégazage de la Terre interne permet de simuler de fortes teneurs en CO₂ avant 34 Ma.

Production scientifique et brevets

Lehir G., Donnadiou Y., Goddérés Y., Meyer-Berthaud B., Ramstein G., Blakey R., 2011. The climate change caused by the land-plant invasion. *Earth and Planetary Sci. Lett.*, 310: 203-221.
Hamon N., Sepulchre P., Donnadiou Y., Henrot A.J., Francois L., Jaeger J.J., Ramstein G., 2012. Growth of sub-tropical forests in Miocene Europe: The role of carbon dioxide and Antarctic ice volume. *Geology* (in press).
Lefebvre V., Donnadiou Y., Goddérés Y., Fluteau F., 2012. Unravelling the causes of the Cenozoic climatic evolution (in preparation).

Programme « Blanc », édition 2005

PICC

Caractériser et comprendre la dynamique du climat pendant les périodes interglaciaires

Réponse du système climatique aux modifications de l'orbite terrestre, rétroactions et effets de seuils

Le projet vise à répondre à cinq questions fondamentales : i) quelle est la gamme des changements de température selon les latitudes en réponse aux changements climatiques de grande échelle, pendant les périodes chaudes? ii) quels sont les rétroactions et les effets de seuil de la réponse du climat aux forçages naturels? iii) quels sont les processus contrôlant l'évolution des teneurs atmosphériques en gaz à effet de serre pendant les périodes chaudes? iv) y a-t-il eu des événements climatiques abrupts lors de précédents réchauffements climatiques au-delà du niveau actuel et pourquoi? v) comment les calottes polaires et le niveau des mers répondent-ils aux variations climatiques et sommes-nous capables d'expliquer et de simuler les 4 à 6 m d'augmentation de niveau marin de la dernière période chaude ?

Une approche double combinant l'acquisition de nouveaux enregistrements paléoclimatiques et la modélisation du système climatique

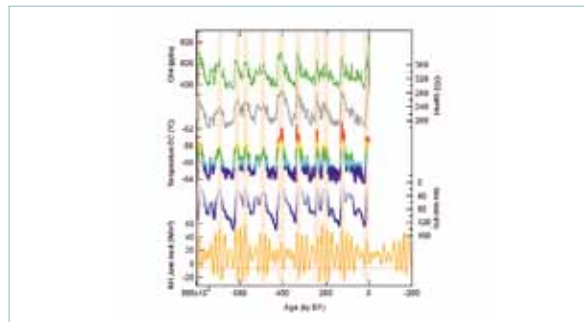
Le projet PICC a permis de combiner de nouveaux enregistrements, à haute résolution, issus d'archives polaires, continentales et marines, et de les confronter à des simulations numériques. Un effort particulier a porté sur la construction d'un cadre chronologique commun afin d'exploiter un ensemble d'archives différentes et de les confronter aux résultats de simulations climatiques. Les mécanismes de réponse du climat au forçage orbital ont été identifiés pour différentes configurations orbitales et pour différentes régions (les moussons, l'Europe, les pôles), avec un effort spécifique portant sur le couplage entre climat et calottes de glace.

Résultats majeurs

PICC a mis évidence une forte variabilité de l'intensité, de la durée et de l'évolution de la température antarctique, de la température de surface et du fond des océans, du dioxyde de carbone, du méthane atmosphérique et de la couverture végétale pendant les différentes périodes interglaciaires des derniers 800 000 ans. A l'intérieur d'une période interglaciaire, on a caractérisé finement les séquences d'événements ainsi que la variabilité climatique naturelle et identifié les mécanismes d'instabilités rapides et de rétroactions climatiques aussi bien aux basses qu'aux hautes latitudes. Enfin, les résultats montrent un couplage étroit entre climat et cycle du carbone et entre le forçage orbital, le cycle du carbone et la réponse des calottes polaires. On notera que le projet européen PAST4FUTURE (2010-2014) valorise les résultats de PICC dans un cadre international.

Production scientifique et brevets

Parmi les 87 publications à comité international de lecture et la rédaction d'un ouvrage, on retiendra les sept publications parues dans Nature, Science et Nature Geosciences ci-dessous :



Evolution du climat au cours des derniers 800 000 ans, du passé (à gauche, en milliers d'années avant le présent, 0). Les variations des paramètres orbitaux de la Terre modulent la répartition de l'ensoleillement selon les saisons et les latitudes. Leurs impacts sont schématisés par l'ensoleillement de Juin à 65°N (calculé pour les derniers 800 000 ans et les prochains 200 000 ans). La réponse du système climatique est décrite par les variations du niveau des mers estimées à partir de l'analyse de sédiments marins (bleu), de la température à DOME C, Antarctique (arc-en-ciel), et la concentration en CO₂ (gris) et CH₄ (vert) issue de l'analyse de carottes de glace. Les périodes interglaciaires sont soulignées par les rectangles verticaux orange. Le minimum d'ensoleillement ayant mis fin aux périodes interglaciaires passées est identifié par le trait horizontal rouge.

PICC « Intégration des contraintes Paléoclimatiques pour réduire les Incertitudes sur l'évolution du Climat des périodes Chaudes » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement). Il associe le LGGE (Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement), EPOC (Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux) et le CE-REGE (Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement). Il a débuté en janvier 2006 pour une durée de 42 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 700 k€ pour un coût global de 8 M€.

Dutton A., *et al.*, M.T., 2009. Phasing and amplitude of sea level and climate change during the penultimate interglacial. *Nature Geoscience* 2: 355-359, doi:10.1038/NGEO470.

Lambert F., *et al.*, 2008. Dust-climate couplings over the past 800'000 years from the EPICA Dome C ice core. *Nature*, 452: 616-619.

Leduc G., *et al.*, 2007. Moisture transport across Central America as a positive feedback on abrupt climatic changes. *Nature* 445: 908-911.

Loulergue L., *et al.*, 2008. Orbital and millennial-scale features of atmospheric CH₄ over the last 800,000 years. *Nature* 453: 383-386.

Luthi D., *et al.*, 2008. High resolution carbon dioxide concentration record 650 000 - 800 000 years before present. *Nature* 453: 379-382.

Bard E., Rickaby R., 2009. Migration of the subtropical front as a modulator of glacial climate. *Nature* 406: 380-383.

Kleiven H., *et al.*, 2008. Reduced north Atlantic deep water Coeval with the glacial lake Agassiz fresh water outburst. *Science*.

Programme « Blanc », édition 2009

RETRO

Prélever des sédiments marins pour comprendre le rôle de l'Océan dans les changements climatiques

Reconstruire les changements de la circulation méridienne atlantique au cours des derniers 60 000 ans

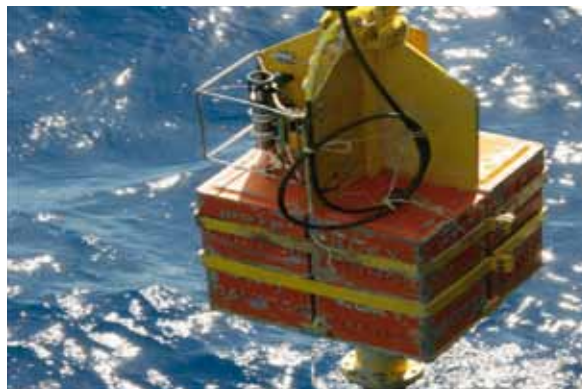
Les données paléo-océanographiques ont montré que le mode de circulation actuel de l'Océan n'est pas unique mais qu'il peut passer rapidement d'un état à un autre avec des répercussions importantes sur le climat, comme lors des changements climatiques rapides des derniers 60 000 ans. Les hypothèses concernant les processus océaniques sont cependant mal contraintes par les données existantes. Les enregistrements instrumentaux sont trop courts pour permettre de distinguer la variabilité naturelle de l'influence anthropique. Des longues séries de données climatiques extraites d'archives naturelles comme les sédiments marins, sont donc indispensables pour étudier la dynamique du système climatique. Le projet ESF RETRO (<http://www.esf.org/activities/eurocores/running-programmes/euromarc/projects/retro.html>) est fondé sur l'acquisition de matériels sédimentaires de résolution spatiale et temporelle suffisante dans l'Atlantique tropical pour reconstruire les changements de la circulation méridienne atlantique (AMOC) au cours des derniers 60 000 ans. L'objectif principal du projet est de déchiffrer les interactions entre les changements de circulation océanique et les changements climatiques.

Les capacités uniques des carottages longs du Marion Dufresne

Dans le cadre du projet, une campagne de carottages à bord du Navire Océanographique Marion Dufresne (MD) a été réalisée sur la marge nord du Brésil en octobre 2009. Elle avait été sélectionnée en raison de la présence de sédiments à forts taux d'accumulation sur un gradient vertical. La localisation précise des sites de carottage avait été identifiée en 2007 lors d'une campagne sur le NO norvégien SARS, dédiée à la préparation de la campagne de carottages longs sur le MD dans le cadre du projet ESF RETRO. La campagne RETRO 2009 sur le MD s'est déroulée dans des conditions optimales, grâce notamment aux nouvelles méthodes d'ajustement des paramètres de carottage, mises en oeuvre par les ingénieurs de l'IPEV et de l'Ifremer. L'équipe a ainsi pu prélever un ensemble de carottes de très bonne qualité entre 600 et 3500 m de profondeur, qui permettra de retracer l'évolution de la thermocline, des eaux intermédiaires et des eaux profondes à partir de l'analyse géochimique des coquilles de foraminifères planctoniques et benthiques préservées dans le sédiment.

Résultats majeurs

Les mesures en cours et prévues sur le matériel sédimentaire ramené de la campagne RETRO 2009 permettront d'élucider quel est l'impact des changements d'AMOC sur le climat et inversement. L'utilisation conjointe des nouvelles données obtenues sur ce matériel sédimentaire et des sorties de modèles climatiques devraient conduire à des progrès majeurs dans la compréhension et la quantification des interactions entre les changements de circulation océanique et les changements climatiques, ce qui à terme, permettra d'améliorer la fiabilité des prévisions climatiques pour les décennies à venir.



Lors de la campagne RETRO 2009, les profils de salinité, de température et de fluorescence ont été enregistrés lors de chaque opération de carottage grâce aux capteurs nouvellement installés sur les carottiers (Photo D. Catelain).

RETRO « Response of tropical Atlantic surface and intermediate waters to changes in the Atlantic meridional overturning circulation » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement). Le projet a débuté en septembre 2009 pour une durée de 24 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 320 k€ pour un coût global de l'ordre de 2,4 M€.

Production scientifique et brevets

La production scientifique découlant de la campagne de carottages RETRO 2009 comprend pour l'instant le rapport de mission (<http://www.esf-retro.org/page4/page4.html>), trois rapports de master, 6 communications dans des conférences internationales et deux articles dans des revues internationales à comité de lecture :

Lippold J., *et al.*, 2012. A data versus 2D model comparison. *Geophys. Res. Lett.*, 38 L2063, doi : 10.1029/2011GL049282.

Govin A., *et al.*, 2012. Distribution of major elements in Atlantic surface sediments (36°N-49°S): Imprint of terrigenous input and continental weathering. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 13 (1) Q01013, doi:10.1029/2011GC003785.

En outre, le matériel sédimentaire ramené permet de bâtir des projets ambitieux, dont un « Initial Training Network Marie Curie (FP7) », soumis une première fois en janvier 2011, qui sera re-soumis en janvier 2013 et un projet ERC soumis en février 2012.

Programme « Blanc », édition 2005

IDEGLACE

Changements climatiques abrupts liés aux calottes glaciaires : documentation et prévisions

Par le passé, les calottes glaciaires ont engendré des variations climatiques rapides et globales. Cela peut-il se reproduire dans un futur plus chaud ?

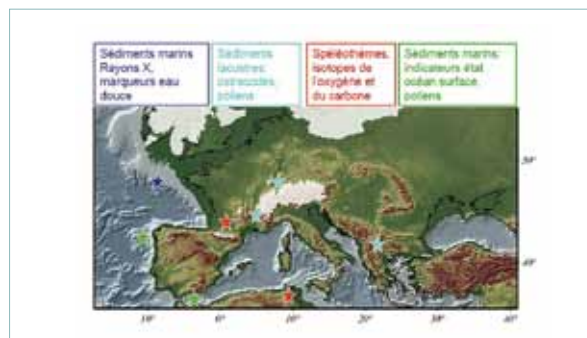
Les périodes glaciaires sont marquées par de fortes instabilités climatiques. Parmi les acteurs de ces instabilités, on trouve les calottes glaciaires, responsables de larges débâcles d'icebergs dans l'Atlantique Nord et la circulation océanique profonde, qui peut être très sensible à l'apport d'eau douce dans cette région. L'apparente stabilité du climat depuis la fin de la dernière déglaciation a amené les spécialistes à supposer que ces instabilités climatiques étaient un phénomène lié aux calottes glaciaires. Cependant, le réchauffement futur pourrait être responsable d'une fonte partielle de la calotte groenlandaise. Quel impact une telle fonte pourrait avoir sur le système climatique ? Le projet IDEGLACE est donc décliné en deux grands volets : i) le premier concerne les instabilités climatiques glaciaires, dont on a cherché à améliorer la caractérisation, notamment en termes de décharges d'eau de fonte de la calotte européenne et de reconstructions paléoclimatiques à haute résolution temporelle, et la modélisation, ii) le second est relatif à la vulnérabilité des calottes glaciaires face au réchauffement prévu pour le futur et la conséquence d'une fonte de ces calottes sur la circulation océanique et les climats européen et méditerranéen.

Enregistrements paléoclimatiques et modélisation

La carte ci-contre présente les sites étudiés et le matériel analysé. Notons que le matériel sédimentologique du Golfe de Gascogne a été extrait dans le cadre du projet, ainsi que certaines carottes de sédiments lacustres. L'approche s'est appuyée sur une variété d'indicateurs paléoclimatiques aussi bien que sur une hiérarchie de modèles climatiques. Concernant ces derniers, le modèle de climat de complexité intermédiaire CLIMBER-2, couplé aux calottes polaires (CLIMBER-GREMLINS) ou avec le module de représentation des isotopes de l'oxygène dans l'océan (CLIMBER-2+ISO) a été utilisé. Pour la modélisation du climat à plus fine échelle spatiale, le modèle couplé atmosphère-océan de l'IPSL (Institut Paul-Simon Laplace), ainsi que le modèle de circulation atmosphérique zoomé du LMD ont été mis en oeuvre.

Résultats majeurs

Le projet a permis une description très précise des événements de fonte de la calotte européenne par le « paléo- fleuve Manche » et une description plus fine des variations climatiques en Europe et en Méditerranée. IDEGLACE a aussi mis en oeuvre les premières simulations glaciaires avec un modèle du type de ceux utilisés pour les prévisions climatiques et a permis de dégager des mécanismes de propagation des changements du climat à l'échelle du globe. Le comportement futur des calottes glaciaires a été étudié grâce à des modèles atmosphériques zoomés sur les calottes pour le court terme. Pour le long terme, il a été montré qu'au-dessus d'un seuil d'émission de CO₂ entre 2500 et 3000 Gt C, la fonte de la calotte groenlandaise est irréversible.



Sites étudiés et matériel analysé pour obtenir une description plus complète et à plus haute résolution temporelle des événements de décharge d'eau douce de la dernière glaciation.

IDEGLACE « Impact de Décharges d'eau douce provenant de la Glace continentale sur le Climat Européen et méditerranéen » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement). Il associe le LGGE (Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement), le LMD (Laboratoire de Météorologie Dynamique) et EPOC (Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux). Le projet a débuté en janvier 2006 pour une durée de 48 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 260 k€ pour un coût global de 480 k€.

Production scientifique et brevets

Parmi les 35 publications dans des revues internationales à comité de lecture, les 56 communications dans des congrès internationaux et les 9 thèses, citons :

Toucanne S., *et al.*, 2009. Timing of massive "Fleuve Manche" discharges over the last 350 kyr: insights into the European ice-sheet oscillations and the European drainage network from MIS 10 to 2. *Quat. Sci. Rev.*, 28 : 1238–1256.

Lézine A.M., *et al.*, 2010. Lake Ohrid, Albania, provides an exceptional multi-proxy record of environmental changes during the last glacial-interglacial cycle. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 287: 116-127.

Charbit S., *et al.*, 2008. Amount of CO₂ emissions irreversibly leading to the total melting of Greenland. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L12503.

Programme « Blanc », édition 2008

ACTES

Les changements climatiques abrupts en Europe pendant la dernière glaciation

Etude des changements climatiques abrupts dans les enregistrements terrestres éoliens européens

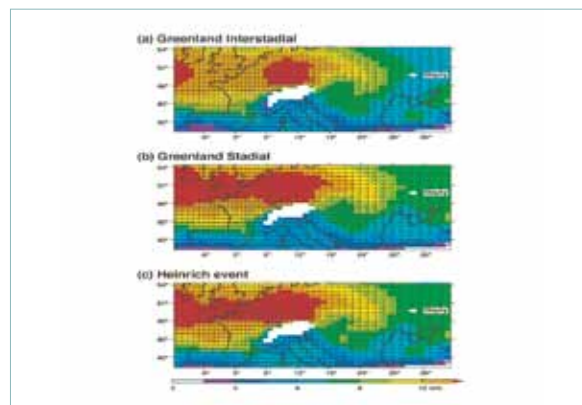
Les variations climatiques rapides survenues pendant la dernière glaciation (entre ~110 et 20 000 ans) fournissent un contexte d'étude précieux pour comprendre et modéliser la circulation atmosphérique dans le passé. La combinaison modélisation et observations permet de valider ou invalider des hypothèses, élaborées sur le terrain, de mécanismes liant changements climatiques globaux et impacts environnementaux régionaux (vents, précipitations, végétation, permafrost, ...). Dans cette perspective, le projet ACTES vise à étudier des changements climatiques abrupts particuliers, appelés événements de Dansgaard-Oeschger et de Heinrich, en combinant les données des sédiments éoliens européens et de la glace groenlandaise, avec des simulations utilisant le modèle «Système Terre» de l'IPSL. Le but est d'approfondir la connaissance de la dynamique atmosphérique en Europe durant ces épisodes particuliers du passé, et de définir les limites actuelles de notre compréhension afin de pouvoir formuler les questions liminaires à ce projet avec, en perspective, l'amélioration des simulations des changements climatiques futurs.

Les comparaisons données-modèle

L'originalité du projet a été de combiner observations stratigraphiques, échantillonnage à haute résolution en continu et modélisation numérique. Les observations ont consisté en l'analyse de séquences loessiques de référence : granulométrie, pédologie, ^{13}C de la matière organique, propriétés magnétiques, malacologie, isotopes majeurs et terres rares; le calage chronologique étant assuré par des datations ^{14}C et luminescence. En ce qui concerne la modélisation, trois types d'états climatiques glaciaires ont été simulés et analysés : i) un état glaciaire de référence, appelé «stadiaire», correspondant aux conditions glaciaires durant lesquelles la sédimentation éolienne a été intense, ii) un état «interstadiaire», résultat d'un réchauffement abrupt (événement Dansgaard-Oeschger), correspondant à une sédimentation beaucoup plus faible, favorisant la formation des paléosols observés dans les sédiments éoliens terrestres et iii) un état de type «événement de Heinrich», représentant des épisodes de refroidissement accentué dus aux débâcles massives d'icebergs dans l'Atlantique Nord.

Résultats majeurs

L'analyse de séquences européennes clés le long du 50°N permet de représenter l'impact environnemental des changements climatiques globaux abrupts. On y observe les évolutions des champs de vent, de précipitation, de température, de la végétation, etc ..., pour reconstruire les conditions environnementales qui ont directement impacté les populations passées. La confrontation entre données et modélisation met en évidence le rôle de la couverture végétale de la zone source dans l'émission de poussières et confirme les vitesses d'accumulation mesurées sur le terrain et contraintes par les datations OSL (Optical Stimulated Luminescence) et ^{14}C . On notera que ACTES a conduit à la mise en place d'un groupe de travail international sur la thématique du projet (ADOM, <http://www.pages-igbp.org/workinggroup/adom>).



Champ de vent moyen à 850 hPa en Europe à des latitudes tempérées pour trois états climatiques simulés associés à : i) un Interstadiaire du Groenland, ii) un Stadaire du Groenland et iii) un événement de Heinrich dans l'Atlantique Nord. La localisation de la séquence loessique de Stayky (Ukraine) est indiquée par un cercle blanc (d'après Sima A., in Rousseau *et al.*, 2011).

ACTES « Abrupt Climate Changes in Terrestrial european Eolian RecordS » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LMD (Laboratoire de Météorologie Dynamique). Il associe le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement), le LGP (Laboratoire de Géographie physique), l'IPGP (Institut de Physique du Globe de Paris), l'ISTerre (Institut des Sciences de la Terre), le TPE (Laboratoire de géologie: Terre, Planètes et Environnement) et le Département de Géographie et Géomorphologie de l'Université de Giessen en Allemagne. Le projet a débuté en janvier 2009 pour une durée de 48 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 480 k€ pour un coût global de 1,76 M€.

Production scientifique et brevets

Parmi les publications internationales à comité de lecture, citons: Antoine P., *et al.*, 2009. Rapid and cyclic eolian deposition during the Last Glacial in European loess: A high-resolution record from Nussloch, Germany. *Quat. Sci. Rev.* 28 : 2955-2973.
Sima A., *et al.*, 2009. Imprint of North-Atlantic millennial-timescale variability on Western European loess deposits as viewed in a dust emission model. *Quat. Sci. Rev.* 28 : 2851-2866.
Rousseau D.D., *et al.*, 2011. North Atlantic abrupt climatic events of the Last Glacial period recorded in Ukrainian loess deposits? *Climate Past* 7: 221-234.

Programme « Blanc », édition 2009

VOLSOL

La glace d'Antarctique sous le feu du Soleil et des volcans

Les archives glaciaires de l'Antarctique pour les reconstitutions des forçages climatiques naturels, volcanique et solaire

Un enjeu majeur pour les sciences du climat est de fournir aux décideurs des scénarii d'évolution du climat au cours du 21^{ème} siècle et au-delà. La compréhension de l'influence de l'Homme sur le climat particulièrement depuis le milieu du 20^{ème} siècle avec l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, nécessite une connaissance accrue des forçages anthropiques et naturels. Les deux principaux forçages climatiques naturels sont d'origine volcanique et solaire. Les observations satellitaires ont permis de documenter l'activité solaire grâce aux mesures d'irradiance effectuées depuis 1978 et d'observer l'influence des éruptions volcaniques comme celle du Pinatubo (Philippines) en 1991. Cependant, les données satellitaires ne couvrent que les 30 dernières années et ne sont donc pas suffisantes pour tester de manière complète la relation entre ces deux forçages naturels et l'évolution du climat. Le projet VOLSOL a donc pour objectif de reconstruire ces deux forçages au cours des derniers 2 000 ans à partir d'archives glaciaires provenant des sites de DOME C et de DOME Talos en Antarctique. Au cours de cette période, les variations climatiques sont étudiées et quantifiées, et les archives disponibles avec une haute résolution permettent ainsi de fournir de nouvelles séries temporelles synchronisées de ces forçages et du climat.

Des isotopes au service de la recherche sur le climat : apport des cosmonucléides et des anomalies isotopiques du soufre et de l'oxygène

L'activité solaire peut être reconstituée dans le passé grâce à l'étude de l'abondance sur Terre des cosmonucléides comme le béryllium-10 (¹⁰Be). Cet isotope est formé par l'interaction du rayonnement cosmique galactique avec des atomes présents dans l'atmosphère terrestre. Or, le flux de rayonnement cosmique qui atteint la Terre dépend des champs magnétiques du Soleil et de la Terre. Les variations de concentration de ¹⁰Be dans les archives glaciaires renseignent donc sur l'activité solaire passée. L'activité volcanique est reconstituée à partir de plusieurs indicateurs. Les signaux volcaniques sont d'abord repérés par des augmentations de la concentration de sulfate dans les carottes de glace. Ensuite, l'analyse de la composition isotopique du soufre et de l'oxygène du sulfate permet de savoir si le nuage volcanique a atteint la stratosphère, située à environ 10 km d'altitude, et donc si l'éruption volcanique a eu un impact sur le climat global. Les signaux enregistrés dans les archives glaciaires sont ensuite analysés à l'aide de la modélisation pour pouvoir comprendre et prendre en compte les liens entre ces différents indicateurs dans les reconstructions des forçages volcanique et solaire. Par exemple, la concentration de ¹⁰Be peut être modifiée par les éruptions volcaniques, le ¹⁰Be ayant tendance à s'attacher aux aérosols de sulfate volcaniques.



Carte de l'Antarctique et carotte de glace forée sur le site de DOME C en Antarctique (Source J. Savarino).

VOLSOL « Forçages climatiques naturels volcanique et solaire » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le CEREGE (Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement). Il associe le LGGE (Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement) et le LATMOS (Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observation Spatiales). Le projet a débuté en septembre 2009 pour une durée de 48 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 588 k€ pour un coût global de 1,7 M€.

Résultats majeurs

Les premiers enregistrements de concentration de ¹⁰Be sur les sites de DOME C et VOSTOK ont permis de mieux comprendre la complexité des liens entre les marqueurs solaires et volcaniques. Une amélioration des reconstitutions de l'activité solaire a pu être apportée, à destination des modélisateurs du climat. La mesure de la concentration de sulfate au cours des derniers 2 000 ans a permis d'identifier plus de 50 événements volcaniques dont certains n'avaient jamais été détectés auparavant. Les mesures se poursuivent en parallèle de comparaisons modèle- données afin de mieux comprendre les forçages volcanique et solaire au cours des derniers 2000 ans.

Production scientifique et brevets

Baroni M., *et al.*, 2011. Volcanic and solar activity and atmospheric circulation influences on cosmogenic ¹⁰Be fallout at Vostok and Concordia (Antarctica) over the last 60 years. *Geochimica and Cosmochimica Acta* 75 (7):132-7145.
 Delaygue G., Bard E., 2011. An Antarctic view of ¹⁰Be and solar activity for the past millennium; *Climate Dynamics* 36: 2201-2218.
 Lanciki A., *et al.*, 2012. Sulfur isotope evidence of little or no stratospheric impact by the 1783 Laki volcanic eruption. *Geophys. Res. Lett.* (in press).
 Priyadarshi A., *et al.*, 2011. Cosmogenic ³⁵S: A unique tracer to Antarctic atmospheric chemistry and the polar vortex. *Geophys. Res. Lett.*, 38 (13), L13808, doi: 10.1029/2011gl047469.
 Schmidt G.A., *et al.*, 2011. Climate forcing reconstructions for use in PMIP simulations of the Last Millennium (v1.0). *Geoscientific Model Development* 4: 33-45.

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2006

SAHELP

Le passé, source indispensable d'enseignement sur la vulnérabilité environnementale face au climat

Analyser une crise environnementale et climatique majeure : celle de la fin de la période humide africaine au Sahara et au Sahel

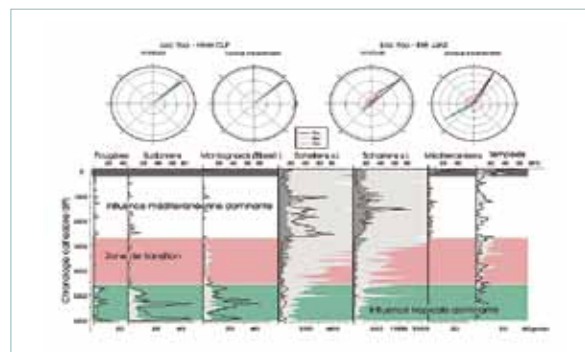
À la fin de l'Holocène, l'Afrique tropicale a connu une crise climatique majeure à l'origine de la dégradation massive des conditions environnementales qui avaient permis l'épanouissement des cultures néolithiques dont témoignent les exceptionnelles représentations rupestres des massifs centraux sahariens. L'objectif du projet SAHELP est d'analyser comment s'est manifestée la vulnérabilité des écosystèmes face à la variabilité naturelle du climat passé, comment les changements aux grandes échelles temporelles ont pu influencer la réponse des écosystèmes à des changements plus rapides, ceci afin d'apporter des éléments de réponse sur les échelles de temps pertinentes mises en jeu. La stratégie de SAHELP est d'utiliser les informations du climat de l'Holocène pour déterminer les paramètres climatiques clés à l'origine de cette crise environnementale et établir les seuils critiques pour l'hydrologie et la végétation des régions de l'Afrique sèche.

Un projet multidisciplinaire intégrant collecte, analyse de données et modélisation du climat, de l'hydrologie et de la végétation

Afin d'évaluer la vulnérabilité du Sahara et du Sahel au changement global, il est impératif de comprendre comment les conditions hydrologiques et la végétation ont évolué sur le long terme. Les études paléoenvironnementales ont en effet montré des variations de très grande amplitude de la pluviométrie entraînant l'élévation du niveau des lacs d'une centaine de mètres ou plus par rapport à l'actuel et la pénétration de plantes tropicales vers le nord définissant un « Sahara vert » à l'Holocène. Comment ces conditions se sont-elles mises en place, et surtout comment la période humide holocène a-t-elle pris fin, de façon abrupte ou progressive ? En utilisant les données du passé, peut-on mieux caractériser la vulnérabilité de la végétation et de l'hydrologie au changement du climat ? Quels sont les temps de réponse des systèmes au changement climatique ? Comment le climat de l'Afrique du Nord est-il relié à la dynamique globale ? Quelles sont les échelles pertinentes des processus en jeu ? Peut-on mieux caractériser et évaluer les rétroactions des conditions de surface sur le climat ? Ces questions sont abordées au travers de l'étude de trois bassins : le plus grand lac Sahélien endoréique aujourd'hui alimenté par les rivières du Sud, le lac Tchad, les lacs sahariens alimentés par des nappes fossiles (le lac Yoa), et les dépressions littorales des Niayes du Sénégal alimentées par des nappes locales et des écoulements de surface.

Résultats majeurs

Les temps de réponse des nappes phréatiques par rapport aux changements climatiques induits orbitalement, et l'adaptation des plantes aux ressources en eau ont été l'un des points majeurs du projet. Le basculement du « Sahara vert » holocène à l'environnement désertique actuel a été pour la première fois documenté par une analyse palynologique à haute résolution au Sahara et les para-



Au Lac Yoa (19°N au Tchad), l'influence tropicale - avec des vents de mousson d'été du SW- domine jusqu'aux environs de 4 500 ans BP, permettant la persistance d'éléments humides (fougères, arbres tropicaux soudanais et éléments montagnards). Après une période de transition qui dure jusqu'à 2 700 BP, les conditions actuelles du milieu, très arides et soumises aux influences méditerranéennes, dominent. Les vents d'orientation NE-SW qui caractérisent cette période se renforcent très fortement au cours des derniers siècles. Les données palynologiques corroborent les reconstructions (ici, les roses des vents) effectuées à partir du modèle de l'IPSL (Institut Paul- Simon Laplace).

SAHELP « Vulnérabilité du Sahara et du Sahel: les leçons du passé » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement). Il a associé le CEREGE (Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement) et HSM (HydroSciences Montpellier). Il a débuté en janvier 2007 pour une durée de 42 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 325 k€ pour un coût global de 1,6 M€.

mètres climatiques pertinents (« dryspell », occurrence et orientation des événements venteux) ont été reconstruits grâce au modèle numérique de climat LMDZ de l'IPSL associé à un module représentant les processus thermiques et hydrologiques pertinents.

Production scientifique et brevets

Parmi la trentaine de publications, citons : le volume spécial n°341 des Comptes Rendus Géosciences de l'Académie des Sciences : « Histoire climatique des déserts d'Afrique et d'Arabie », paru à la suite de la réunion internationale organisée conjointement par les projets ANR SAHELP (VMCS 2006) et SOPHOCLE (Blanc 2005) et les articles plus spécialisés suivants :

Kröpelin *et al.*, 2008. Climate-driven ecosystem succession in the Sahara: the last 6000 years. *Science* 320: 765-768.

Le Coz *et al.*, 2009. Assessment of Digital Elevation Model (DEM) aggregation methods for hydrological modeling: Lake Chad basin, Africa. *Computers and Geosciences* 35: 1661-1670.

Lézine *et al.*, 2011. Sahara and Sahel vulnerability to climate changes, lessons from Holocene hydrological data. *Quat. Sci. Rev.*, 30: 3001-3012.

Lézine *et al.*, 2011. Late Holocene plant and climate evolution at Lake Yoa, northern Chad: pollen data and climate simulations. *Climate of the Past* 7: 1351-1362.

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2006

ESCARSEL

Du Moyen-Age au 21^{ème} siècle :
climat, forçages et impacts1000 ans de proxies climatiques et de
simulations climatiques dans les régions
circum-atlantiques

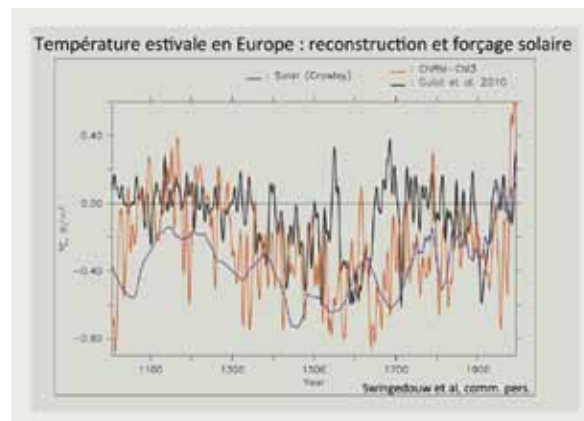
La variabilité climatique séculaire est mal comprise car elle ne peut être mise en évidence par des données climatiques instrumentales (qui ne couvrent de manière suffisante que deux siècles). Les données indirectes ou « proxies » sont le seul moyen pour comprendre l'effet des forçages sur les changements climatiques à long terme, en particulier l'activité solaire, le volcanisme, l'augmentation des gaz à effet de serre. Cependant, ces approches sont entachées de fortes incertitudes. Le projet ESCARSEL se place dans le contexte des changements climatiques du dernier millénaire (avec l'anomalie chaude médiévale (ACM) et le petit âge glaciaire (PAG) en relation avec ceux projetés pour le siècle futur. En se servant d'une double approche, données- modèles, et en travaillant sur une échelle de temps suffisamment longue, notre objectif était de comprendre la variabilité passée et future du climat et comment les écosystèmes étudiés vont répondre à ces changements. La comparaison modèles-données a déjà conduit à des résultats importants sur des périodes plus anciennes et se révèle particulièrement fructueuse pour les développements futurs liés aux changements climatiques à long terme.

L'étude du passé et la confrontation modèles-
données permettent de comprendre les
changements du climat et de ses impacts

La méthode paléoclimatique vise à reconstruire les climats du passé à partir d'archives documentaires, sédimentaires et dendrochronologiques. Nous avons collecté à la fois de nouvelles données témoins des changements climatiques du passé et synthétisé les données existantes par l'usage de méthodes statistiques appropriées. Les régions étudiées ont été définies à partir des compétences du consortium. Nous avons ainsi retracé 1000 ans d'histoire en Europe, en Afrique et en Amérique du Sud. Parallèlement, l'évolution du climat global à partir des forçages naturels et anthropiques a été simulée. La confrontation des données et des simulations a fourni la clé de la compréhension des mécanismes impliqués. Enfin, sur plusieurs chantiers, nous avons développé des modèles d'impact (hydrologie, biomasse forestière) validés sur le passé et capable de simuler la vulnérabilité des ressources face aux changements projetés.

Résultats majeurs

En Europe, le Moyen- Age se distinguait du réchauffement récent par une plus grande hétérogénéité spatiale et par une fréquence accrue des canicules. Le sud de l'Amérique du Sud était humide. Au PAG, le déplacement au sud de la Zone de Convergence Intertropicale a causé une extension des glaciers andins, une aridité au Nordeste Brésilien et un gradient accru d'aridité entre l'est et l'ouest de l'Afrique intertropicale. On montre que cette variabilité pré-20^{ème} siècle peut être reliée à l'activité solaire mais avec des facteurs amplificateurs variables selon les régions



Reconstruction de la température estivale de l'Europe (avril à septembre) [courbe noire] en écarts (°C) par rapport à la valeur moyenne de la période 1960-1990 ; simulation par le modèle CNRM-CM3 de Météo- France/CERFACS [courbe en rouge] à partir de l'irradiance solaire, courbe en bleu (W/m²), du forçage volcanique et des gaz à effet de serre (non montrés). La comparaison des deux courbes montre que la température relativement élevée du Moyen-Age et le refroidissement du PAG (1350-1850) peut être expliquée par le forçage solaire, mais pas les variations de moyenne et haute fréquence.

ESCARSEL « Evolution Séculaire du Climat dans les régions circum-Atlantiques et Réponses des Systèmes Eco-Lacustres » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le CEREGE (Centre Européen de Recherche et d'Enseignement en Géosciences de l'Environnement). Il a associé le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement), l'IMEP (Institut Méditerranéen d'Ecologie et Paléoécologie), le LOCEAN (Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentations et Approches Numériques) et le CERFACS (Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique). Le projet a débuté en janvier 2007 pour une durée de 48 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 798 k€ pour un coût global de 4,7 M€.

Production scientifique et brevets

Parmi les 21 publications à comité de lecture et la cinquantaine d'exposés oraux ou de posters à des congrès internationaux, citons : Guiot J., Corona C., and the ESCARSEL members, 2010. PLoS ONE, 5(4): e9972. doi:10.1371/journal.pone.0009972. Magny M., et al., 2010. Quat. Res. 73:173-179. Swingedouw D., et al., 2011. Climate Dynamics, doi :10.1007/s00382-010-0803-5.

Programme « Changements Environnementaux Planétaires », édition 2009

OBRESOC

Les impacts environnementaux sur le destin d'une société archéologique

Une modélisation du système socio-naturel des premiers agriculteurs préhistoriques centre européens et de sa trajectoire

L'évaluation des impacts des changements climatiques globaux sur les sociétés est presque toujours envisagée via des observatoires contemporains, chargés de collecter des données actuelles pour les temps futurs. Cette évaluation suppose la pérennité des observatoires contemporains sur des durées longues à l'échelle d'une vie humaine, mais très courtes à celle des temps géologiques des changements environnementaux. Pourtant, les trajectoires séculaires de quelques sociétés, dont on sait qu'elles expérimentèrent des changements environnementaux, sont connues ou reconstituables. Il s'agit de sociétés archéologiques, c'est-à-dire dont l'information provient de la terre, tels que les Mayas en Mésio-Amérique où les Rubanés en Europe. À côté donc d'observatoires prospectifs destinés à prédire le futur de la société actuelle, les sciences archéologiques sont des observatoires rétrospectifs, pour reconstituer les trajectoires socio-naturelles de sociétés archéologiques, de leurs naissances à leurs disparitions. Le but du projet OBRESOC est de croiser des données archéologiques existantes de milliers de sites aux données environnementales, afin d'évaluer la réactivité et la résilience aux impacts climatiques de la société des premiers agriculteurs (Le Rubané, environ 5600-4900 BP).

Modélisation multi-agents d'une société archéologique

La trajectoire d'une société archéologique est un processus complexe, qui oblige à concevoir un modèle de simulation d'une société complète, mais raisonnablement simplifiée. Les éléments de base sont : une population d'agents autonomes, artificiels, vivant dans des paysages spatialisés, un système de production agricole, où chacun des agents est doté d'attributs spécifiques (longévité, besoins nutritionnels, mobilité, liens familiaux), ainsi qu'un ensemble de règles et de contraintes anthropologiques plausibles. Ces dernières définissent la façon dont les agents interagissent entre eux ainsi qu'avec l'environnement physique. L'histoire sociale se déroule en faisant périodiquement agir et interagir les agents, durant laquelle ils produisent collectivement des traces archéologiques de maisons et de hameaux. L'adéquation d'une modélisation multi-agents (MMA) aux données est mesurée par l'écart entre les traces archéologiques simulées et celles réellement observées sur la carte. En changeant les attributs des agents, les règles et les contraintes, les caractéristiques du paysage, des réponses comportementales alternatives aux conditions initiales sont produites. Différents scénarios peuvent être explorés, permettant de mener jusqu'au bout une démarche hypothético-déductive complexe. Les MMA permettent de dépasser les limitations expérimentales de l'archéologie à travers la construction d'histoires alternatives.



Reconstitution d'artiste d'un hameau des premiers agriculteurs centre-européens (Peinture G. Tosello, CNRS).

OBRESOC « Un observatoire rétrospectif d'une société archéologique : La trajectoire du néolithique Rubané » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le laboratoire « Dynamique de l'évolution humaine : individus, populations, espèces du CNRS ». Il associe les laboratoires suivants : Environnement Ville Société, le Centre de Bio-Archéologie et d'Ecologie, le Centre de recherche en économie-écologie, éco-innovation et ingénierie du développement soutenable, EPOC (Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux), Archéozoologie et Archéobotanique et l'Institut für Ur- & Frühgeschichte, Universität Wien. Le projet a débuté en janvier 2010 pour une durée de 36 mois. Il bénéficie d'un financement de l'ANR de 900 k€, pour un coût global de 2,9 M€.

Résultats majeurs

Le projet OBRESOC intègre des disciplines paléoenvironnementales et bioarchéologiques, ainsi que l'archéologie culturelle, la paléodémographie et l'économie, via une modélisation spatio-temporelle de la complexité. Il devrait fournir des indications sur les impacts environnementaux qui guidèrent la trajectoire du comportement humain à long terme, dans le contexte des premiers agriculteurs Européens. L'approche devrait contribuer à l'émergence d'une nouvelle sous-discipline : l'archéologie des processus socio-naturels, située à l'intersection de l'archéologie culturelle et des sciences archéologiques environnementales. Une exposition est prévue à la Cité des Sciences (Paris).

Production scientifique et brevets

Bocquet-Appel J.P., 2011. When the World's Population took off: The Springboard of the Neolithic demographic transition. *Science* 333 (6042) : 560-561.

Ortu E., Sanchez-Goni M.F., Milzer G., Giraudeau J., 2011. Dynamique du climat en région nord-atlantique et ses effets sur l'Europe centrale lors de l'expansion du Néolithique Rubané (5750-4750 BP). *XXIIème Symposium de l'APLF*.

Salavert A., 2011. Plant economy of the first farmers of Central Belgium (Linearbandkeramik, 5200-5000 BC). *Vegetation History and Archaeobotany* 20 (5): 321-332.

Programme « Blanc », édition 2005

OPHELIE

Histoire et phénologie pour reconstruire le climat en Europe

Constitution d'une base de données phénologiques depuis 1350 pour la reconstruction du climat en Europe

Pour comprendre les mécanismes de la variabilité naturelle du climat autour du bassin nord Atlantique et replacer le réchauffement observé dans un contexte plus large, il est essentiel d'acquérir de longues séries de données climatiques précédant l'ère industrielle. Le projet OPHELIE a pour but d'effectuer des reconstructions climatiques en Europe à partir d'observations phénologiques faites au cours de l'histoire et palier l'absence de relevés météorologiques avant le 17^{ème} siècle. Ces observations comprennent les dates des vendanges, de la floraison des arbres fruitiers et des moissons. Dans une étude de faisabilité précédente, un modèle de croissance de la vigne avait été calibré sur le pinot noir et sur des observations météorologiques. Elle a montré qu'il était possible de reconstruire avec précision la température de la saison chaude en Bourgogne, depuis 1370, à partir des dates de vendange rassemblées par E. Le Roy Ladurie. Le projet a étendu cette méthodologie à d'autres enregistrements historiques en France (Alsace, Provence, Bordelais...) et en Europe (Suisse, Espagne, Allemagne, Luxembourg, Italie) pour obtenir des reconstructions régionales du climat depuis le Moyen Age.

Modèles d'écophysiologie et méthodes statistiques pour relier dates de vendanges historiques et climat

Les efforts du projet OPHELIE ont d'abord porté sur la collecte d'informations historiques sur la phénologie, la météorologie et les contextes économico- politiques locaux. Cette étude a permis la constitution d'une base de données unique des dates des vendanges, et leur contextualisation historique permettant l'identification d'un signal climatique. Le projet s'est ensuite focalisé sur la phénologie de la vigne afin de reconstruire les conditions climatiques de la période de croissance (avril à août) des vignobles régionaux. Cela a conduit au développement d'un modèle générique adaptable aux différents types de cépages en France. De nombreuses expériences numériques ont permis d'estimer les incertitudes dans les reconstructions climatiques. L'avantage principal d'une telle approche (par rapport aux reconstructions statistiques) est la prise en compte explicite des mécanismes de croissance de la vigne et leur réponse au climat. Enfin, le projet a exploité les bases de données de température pour déterminer des conditions de circulation atmosphérique à grande échelle, en mettant en évidence la signature de cette circulation sur les gradients thermiques auxquels les températures régionales donnent accès.

Résultats majeurs

Nous avons recueilli les bans de vendanges de Besançon, jusqu'alors inédites. Une étude complète de contextualisation politique et économique a été effectuée pour évaluer le rôle de la société dans la valeur de l'enregistrement. Le projet a contribué à l'alimentation de bases de données phénologiques (<http://www.gdr2968.cefe.cnrs.fr>) et de données météorologiques et environnementales historiques originales (CRHQ : http://www.crhq.cnrs.fr/_index).



Localisation des données relatives aux dates des vendanges obtenues dans le projet OPHELIE (Daux *et al.*, 2011).

OPHELIE « Observations Phénoménologiques pour reconstruire le climat de l'Europe » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement). Il associe le CEFE (Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive, Montpellier) et Agroclim, INRA-Avignon). Le projet a débuté en janvier 2005 pour une durée de 42 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 170 k€ pour un coût global de 722 k€.

[php?page=enquetes&suite=](#)). Une base de données des dates de vendanges historiques en France et les reconstructions régionales de température a également été mise en place.

Production scientifique et brevets

Parmi les 15 publications, citons :

- Le Roy Ladurie E., *et al.*, 2007. Le climat de Bourgogne et d'ailleurs (14- 19èmes siècles). Histoire, Economie et Société.
- Pfister C., *et al.*, 2010. The meteorological framework and the cultural memory of three severe winter-storms in early eighteenth-century in Europe. *Climatic Change* 101: 281-310.
- Brázdil R., *et al.*, 2010. European floods during the winter 1783/1784: scenarios of an extreme event during the 'Little Ice Age'. *Theoretical and Appl. Climatology* 10:163-189.
- Camuffo D., *et al.*, 2010. 500-year temperature reconstruction in the Mediterranean Basin by means of documentary data and instrumental observations. *Climatic Change* 101 : 169-199.
- Garnier E., 2009. Laki : une catastrophe européenne. *L'Histoire* 343 : 72-77.
- Garnier E., *et al.*, 2011. Grapevine harvest dates in Besançon (France) between 1525 and 1847: Social outcomes or climatic evidence? *Climatic Change* n°104 : 703-727.
- García de Cortázar-Atauri I., *et al.*, 2010. An assessment of error sources when using grape harvest date for past climate reconstruction. *The Holocene* 20 (4):599-608.

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2008

IPER-RETRO

Les pressions humaines locales déterminent la vulnérabilité des lacs au changement climatique

Départager les impacts respectifs des pressions humaines locales et du changement climatique sur l'évolution écologique des lacs

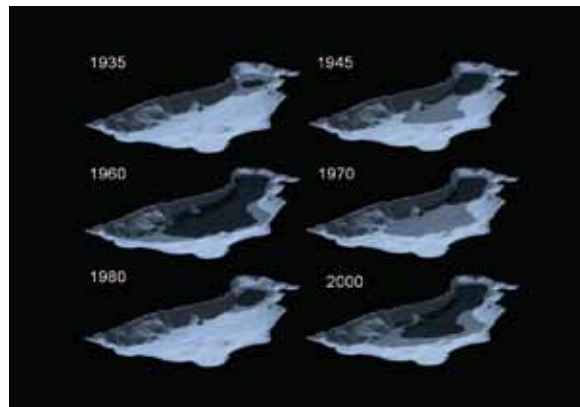
Les ressources en eau douce, dont les lacs, ont toujours été des centres majeurs de structuration des populations humaines et donc des lieux d'activité anthropique intense. Aux impacts écologiques de ces nombreuses pressions humaines locales (apports de polluants, pêche et introduction d'espèces...) se surimposent ceux du réchauffement climatique récent. Les interactions synergiques ou antagonistes entre pressions locales et climatiques génèrent des réponses écologiques complexes de la part des lacs, masquant de fait leurs impacts spécifiques. Appréhender leur évolution future, face au changement climatique, ainsi que l'efficacité de mesures locales de gestion nécessite pourtant de hiérarchiser l'impact des pressions. Le projet IPER-RETRO a pour enjeu de reconstituer l'évolution des grands lacs périalpins (Léman, Annecy, Aiguebelette, le Bourget) au cours des 150 dernières années, dans l'objectif de discriminer les impacts respectifs des pressions locales et climatiques, sur leur état et fonctionnement écologiques. Il s'agit notamment d'évaluer si des lacs soumis au même changement climatique répondent avec la même amplitude et de la même façon, ou si, au contraire, leurs réponses dépendent des pressions locales subies actuellement ou dans un passé récent.

Une reconstitution de l'histoire écologique des lacs à partir des archives sédimentaires

Puisqu'il n'existe que peu de longues séries de mesure de terrain, l'enjeu méthodologique consiste à reconstituer l'histoire écologique des lacs à partir des informations archivées dans les sédiments lacustres. Cette démarche, à l'interface entre l'écologie et la géologie, repose sur la mise en place d'une chronologie précise des couches sédimentaires et l'interprétation de descripteurs fossiles (restes d'organismes, molécules ou structures atomiques) dont beaucoup ont été développés au sein même du projet. La combinaison de ces descripteurs paléolimnologiques permet de reconstituer, en parallèle, l'histoire des pressions locales subies par ces lacs et leurs réponses, à différentes échelles d'organisation (de l'espèce à l'écosystème). Par exemple, l'interprétation des archives ADN permet d'apprécier les modifications de structure génétique et de biodiversité des communautés planctoniques. Le développement de méthodes isotopiques contribue à évaluer les changements dans les relations trophiques entre communautés tandis que des descripteurs géochimiques permettent de reconstituer l'altération des conditions d'oxygénation au fond des lacs (cf illustration).

Résultats majeurs

On montre qu'un même forçage climatique engendre des réponses extrêmement variées de la part de lacs de géomorphologie comparable, s'échelonnant d'une quasi-insensibilité jusqu'à une très forte vulnérabilité. Ces différences sont le produit de variations dans l'intensité des pressions locales, notamment les modifications décennales des apports en nutriments et les pratiques de gestion piscicole. Dans les lacs vulnérables au changement climatique, les processus hydrologiques, biologiques et écosystémiques sont affectés, compromettant de fait, l'efficacité des mesures locales de restauration.



Reconstitution de la progression de la désoxygénation au fond du lac du Bourget au cours du dernier siècle. La désoxygénation est un symptôme majeur de dégradation de l'état écologique des lacs. Dans le cas du lac du Bourget, la progression de la désoxygénation au cours des 30 dernières années est la conséquence de l'interaction entre une pression locale passée (apports excédentaires en nutriments) et le réchauffement climatique en cours (Jenny *et al.*, in preparation).

IPER-RETRO « Impact des perturbations anthropiques sur les réseaux trophiques en lacs : approche paléo-écologique » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le CARR-TEL (Centre Alpin de Recherche sur les Réseaux Trophiques et les Ecosystèmes Limniques de l'INRA). Il associe EDYTEM (Environnements, Dynamique et Territoires de Montagne, Chambéry), le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement), le laboratoire Chrono- Environnement, Besançon), le CEREGE (Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement), le LCME (Laboratoire de Chimie Moléculaire et Environnement), ainsi que deux laboratoires étrangers : l'EAWAG (Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz, Suisse) et l'ISE (Istituto per lo Studio degli Ecosistemi, Italie). Le projet a débuté en janvier 2009, pour une durée de 48 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 560 k€ pour un coût global de 900 k€.

Production scientifique et brevets

Citons notamment :

Perga M.E., 2011. J. Paleolimnol., 46 : 203-213.
Alic B., Perga M.E., 2011. Hydrobiologia 676: 101-116.
Savichtcheva O., *et al.*, 2011. App. Env. Microbiol., 77 : 8744-8753.
Les synthèses écologiques ont été présentées à l'occasion de séminaires invités (EAWAG Suisse, IGB Allemagne) et de congrès internationaux (ASLO 2011, San Juan Porto Rico ; SEFS 2011 Girona Espagne, EGU 2012) et font l'objet d'articles actuellement en cours de rédaction et/ou d'évaluation.

Programme « Blanc », édition 2007

PYGMALION

Hommes et climats ont façonné
les paysages des AlpesFaire renaître le passé pour mieux préparer
l'avenir

Changement climatique, érosion de la biodiversité, durabilité des activités humaines, contamination de l'environnement, sont autant de sujets de préoccupation majeure pour les sociétés industrialisées actuelles. Tous ces compartiments connaissent en effet aujourd'hui des modifications majeures, regroupées sous le terme de « changement global ». Le projet PYGMALION vise à mettre en perspective les changements globaux actuels dans le cadre de l'évolution pluri-millénaire des territoires des Alpes et de leur piémont. Il est fondé sur une approche interdisciplinaire visant à mieux connaître l'évolution des paramètres climatiques et des sociétés humaines. Ces dernières en effet, ont eu à s'adapter aux changements climatiques mais sont aussi devenues au fil du temps l'un des principaux agents de modification de l'environnement. Les principaux défis consistaient à mieux comprendre les changements de régime hydrologique et à mettre au jour les vestiges ténus des occupations anciennes de la montagne alpine. PYGMALION a constitué un effort sans précédent sur le territoire national pour reconstituer les changements climatiques et d'occupation humaine en montagne.

Les « archives naturelles » :
mémoires de l'environnement

À l'instar des glaces des pôles, les Alpes regorgent « d'archives naturelles » (sédiments lacustres, tourbières, stalagmites, moraines) susceptibles d'avoir enregistré l'histoire de l'environnement. Le projet a exploité les spécificités de chacune de ces archives, disséminées sur une surface de plusieurs milliers de km² pour obtenir une vision intégrée de l'évolution du climat, des paysages et des activités humaines à l'échelle des Alpes françaises du nord. À cette fin, les méthodes classiques (palynologie, archéologie, sédimentologie, dendrochronologie) ont été renforcées par l'émergence d'outils nouveaux d'investigation permettant des reconstitutions fines avec une résolution inférieure à la dizaine d'années (scanner géochimique, isotopes de l'oxygène) et/ou de cibler des espèces végétales d'intérêt particulier pour les sociétés humaines (marqueur moléculaire du millet). Outre les défis technologiques, la méthodologie mise en œuvre s'est appuyée sur un effort considérable de travaux de terrain pour récupérer les archives, notamment en haute montagne et pour mettre au jour de nouveaux vestiges archéologiques.

Résultats majeurs

Le projet a mis à évidence les faits majeurs suivants : i) les périodes chaudes favorisent les événements torrentiels extrêmes dans les Alpes du nord, ii) un impact anthropique généralisé sur la stabilité des versants au cours de la période romaine, des zones de montagne au piémont, iii) une augmentation, depuis 3000 ans, des flux détritiques d'origine glaciaire, suggérant une tendance à l'humidification du climat alpin, stoppée par le réchauffement actuel et iv) l'apparition de la culture du millet sur les rives du lac du Bourget vers 1600 BP., accompagnée d'un changement de pratiques agricoles qui a favorisé l'érosion des horizons superficiels des sols.



Les chalets d'écuelles, 1 870m (Haute Savoie). Ce groupe de chalets, ruiné au 19^{ème} siècle, illustre l'emprise de l'homme sur les paysages alpins. Situé dans un paysage aujourd'hui dépourvu d'arbres, alors que l'altitude modérée leur permettrait de se développer, il est entouré de marques tangibles d'érosion attribuées à l'impact des activités humaines. Les fouilles archéologiques ont révélé que ce site a été occupé au moins depuis l'Antiquité, période à laquelle l'érosion connaît un paroxysme, alors que le climat n'est pas particulièrement humide (Photo : F. David).

PYGMALION « Paléohydrologie et interactions homme-climat-environnement dans les Alpes » est un projet de recherche fondamentale coordonné par EDYTEM (Environnements, DYnamiques et TErritoires de Montagne, Chambéry). Il associe Chrono- Environnement, Besançon), l'ISTO (Institut des Sciences de la Terre d'Orléans), le CEPAM (Centre d'Etude de Préhistoire et d'Archéologie Médiévale), le CEREGE (Centre Européen de Recherche et d'Enseignement en Géosciences de l'Environnement), le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement), Géosciences Azur, TVES (Territoire Villes Environnement Société), le CBAE (Centre de Bio- Archéologie et d'Ecologie), l'INRAP (Institut National de Recherche en Archéologie Préventive), le DRASSM (Département de Recherches Archéologiques Subaquatiques et Sous- Marines du Ministère de la Culture) et le Service archéologique du Département de la Haute Savoie. Le projet a débuté en janvier 2008 pour une durée 54 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 565 k€ pour un coût global de 2,8 M€.

Production scientifique et brevets

Wilhelm *et al.*, 2012. Climatic Change, doi : 10.1007/s10584-011-0376-2.
Giguet-Covex *et al.*, 2012. Quat. Res., 77 : 12-22.
Giguet-Covex *et al.*, 2011. The Holocene 21 : 651-665.
Debret *et al.*, 2011. Quat. Sci. Rev., 29 : 2185-2200.
Bossard *et al.*, 2011. Rapid Communications in Mass Spectrometry 25 : 1-9.
David 2010. Comptes Rendus Palevol 9 : 229-235.
David 2010. Comptes Rendus Biologies 333 : 424-428.
Ledoux *et al.*, 2010. Adv. in Nat. and Techn. Haz. Res., 28: 423-434.
Magny *et al.*, 2010. Quaternary Res., 73 : 173-179.
Magny *et al.*, 2009. The Holocene 19 : 823-833.
Millet *et al.*, 2009. The Holocene 19 : 317-328.
Jacob *et al.*, 2009. The Holocene 19 : 241-249.

2 LES APPROCHES PHYSIQUES, CHIMIQUES ET BIOLOGIQUES DES MILIEUX POLAIRES

LES PRINCIPALES AVANCÉES

Les projets se répartissent à parts sensiblement égales entre les études dédiées à l'Antarctique et Subantarctique d'une part, à l'Arctique d'autre part et ce, notamment dans le cadre de l'API 2007-2008 et de programmes internationaux. La plupart d'entre elles concernent la réalisation et/ou l'exploitation de forages continentaux, de campagnes océanographiques, de mesures *in situ* ou en milieu contrôlé. Plusieurs projets présentent des avancées technologiques et métrologiques majeures conduisant pour certaines à des prises de brevet. Des progrès conceptuels dans la modélisation plus fine et précise des enregistrements des changements climatiques ont été réalisés. Le financement de l'ANR a également permis la réalisation de travaux exploratoires comme ceux effectués dans une zone inexplorée de l'Antarctique.

Observer, comprendre et modéliser les évolutions des zones Antarctique et Subantarctique face aux changements globaux

Profitant des moyens logistiques apportés par l'IPEV dans le cadre du raid de 1400 km entre la station côtière de Dumont d'Urville et la base russe de VOSTOK, complétés par ceux de la base franco-italienne de Concor

dia sur le plateau Antarctique, l'étude, réalisée dans le cadre du consortium international IPICS et de l'API 2007-2008, a permis de contraindre la relation temporelle entre l'évolution des températures en Antarctique et du CO₂, en vue de rechercher une glace plus vieille de 1 Ma, réalisant ainsi un saut chronologique avec les projets relatifs au dernier cycle climatique ou à partir de ce cycle. Pour ce faire, un forage jusqu'à 110 m de profondeur avec prélèvements d'air dans le névé a été réalisé et analysé, en partie sur le terrain en temps réel, en utilisant une instrumentation optique innovante (spectromètre à amplification résonnante d'absorption) qui a conduit à un brevet.

Dans le cadre de la coopération internationale et en lien avec l'API 2007-2008, un raid scientifique de 1400 km a été effectué lors de l'été austral (du 20 décembre 2011 au 24 janvier 2012) entre la station de Dumont d'Urville et la base russe de VOSTOK, grâce au soutien logistique de l'IPEV (navire de desserte, hélicoptères, véhicules terrestres). Il a permis la collecte d'un nombre impressionnant de données et de mesures dans une zone totalement inexplorée de l'Antarctique. Les résultats sont encore en cours d'analyse. Ils concernent l'étude : i) de l'accumulation de neige par radar, ii) des carotages de glace de l'ordre de 20 m de pro-

fondeur pour dater les couches observées sur environ 300 ans, iii) des caractéristiques physiques du manteau neigeux pour une meilleure interprétation des images satellitaires, iv) de la composition isotopique de la neige, v) de la variabilité de l'activité solaire par l'utilisation du ^{10}Be et vi) de la chimie atmosphérique.

Les techniques de la biologie moléculaire jointes à des analyses physico-chimiques et isotopiques ont été utilisées pour la détection d'éventuelles traces de vie sous le lac sous-glaciaire de VOSTOK à partir d'un forage dans la glace qui a atteint plus de 3 700 m de profondeur. Les résultats montrent que l'eau du lac apparaît d'une extrême pureté aux plans biologique, chimique et physique. Les tests de culture et la détection de virus sont restés négatifs. En revanche, la présence d'une bactérie thermophile a été trouvée dans les sédiments en provenance des failles plus profondes qui bénéficieraient de l'activité hydrothermale, comme le suggère les anomalies de la glace en isotopes stables et en hélium.

La combinaison entre mesures *in situ* et aéroportées pluriannuelles et la modélisation numérique 3-D ont permis une meilleure compréhension et représentation de la ligne d'échouage du glacier école de l'Astrolabe en Terre Adélie et ce, dans le cadre d'une collaboration avec l'Université du Texas. Les résultats jettent les bases sur les possibilités de déstabilisation de la calotte Antarctique et les conséquences sur le niveau des mers à plus ou moins brève échéance.

L'analyse isotopique (^{18}O , D) et chimique de chroniques historiques (pour les derniers 150 ans) inédites des changements climatiques et environnementaux a été réalisée

dans une région encore vierge des Andes patagoniennes de moyenne altitude, le glacier du San Valentin. Les résultats montrent l'impact de la colonisation des plaines argentines, via le déclenchement de feux anthropiques liés à l'agriculture et la présence de pollutions métalliques bien connues comme le plomb.

Pour les trois espèces d'insectes introduits dans les îles Kerguelen (un carabique prédateur, une mouche saprophage, un puceron phytophage) les résultats mettent en évidence : i) d'importantes capacités de dispersion (par flottaison par exemple), caractérisées à l'aide de marqueurs génétiques, ii) des adaptations morphologiques rapidement exprimées (taille, modification de la forme de l'aile), iii) des préférences alimentaires marquées pour les espèces d'invertébrés et de plantes natives, iv) d'importantes capacités d'ajustements métaboliques en fonction des conditions environnementales, contribuant au succès invasif et v) un premier diagnostic complet des virus de plantes.

Observer, comprendre et modéliser les évolutions de l'Arctique face aux changements globaux

L'étude de la composition isotopique triple de l'oxygène de l'eau (δD , $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{17}\text{O}$) en région tropicale a montré que ces traceurs permettaient de contraindre l'impact de la ré-évaporation liée à la convection tropicale dépendant de l'ITCZ. La même méthode appliquée sur le site du projet NEEM-France au Groenland confirme qu'elle peut être utilisée valablement pour l'interprétation quantitative des isotopes de l'eau dans les carottes polaires aux échelles de temps plus longues.

L'obtention et l'analyse de carottes de glace jusqu'à 2 500 m de profondeur (une 1^{ère} mondiale pour la calotte groenlandaise, réalisée dans le cadre d'un consortium international de l'API 2007-2008) couvrant l'intégralité de la dernière période interglaciaire (~130 à 125 000 ans) combinées à la modélisation a permis de préciser la réponse climatique de grande échelle du Groenland aux changements climatiques passés et futurs, d'évaluer la réaction de la calotte à ces changements (effets de seuil, incertitudes liées au cycle hydrologique) et d'analyser la sensibilité de la circulation thermohaline à un apport massif d'eau douce selon l'état initial du climat régional.

L'étude conduite en 2009 dans l'Océan Arctique dans le cadre d'une collaboration franco-canadienne, a montré l'impact des modifications environnementales (diminution de la couverture glaciaire, augmentation des UV, fonte du pergélisol, apports organiques continentaux) sur les processus photochimiques (production algale, photo-oxydation de la matière dissoute) et de minéralisation et par voie de conséquence sur l'intensité des sources et puits de carbone.

En complément du projet MERSAM de l'API 2007-2008 qui porte sur le mercure dans la chaîne trophique arctique, il a été montré que le changement climatique influencera le comportement des contaminants, tel que le mercure, dans notre environnement. A un niveau plus fondamental, les résultats montrent que les signatures isotopiques du mercure sont des indicateurs puissants des transferts de cette toxine à la surface de la Terre. L'étude a conduit au financement du projet « MERCURY ISOTOPES » de l'ERC, qui équilibre les recherches Arc-

tiques avec des volets sur le mercure en Chine et à l'Observatoire du Pic du Midi.

De nouvelles paramétrisations des modèles de surface couplés à la modélisation hydrologique et biogéochimique des zones boréales de Sibérie ont permis de quantifier l'impact du changement climatique sur la distribution des zones inondées et la production de méthane issue de la fonte du pergélisol en cours et à venir pour le 21^{ème} siècle. En parallèle, un nouveau spectromètre a été mis au point pour l'analyse du CH₄ avec une précision de 0,04 % encore jamais atteinte au monde, ouvrant des perspectives pour la prise d'un brevet.

En contexte glaciaire, la permanence du pergélisol est un élément de stabilité générale impactant les régimes fluviaux et la dynamique fluviale. Or, une étude a mis en évidence que l'élévation de température de 1°C en Yakoutie (Sibérie) depuis les années 80 avait induit un épaississement de la couche active entraînant un changement des processus d'érosion, de sédimentation des fleuves et une instabilité des berges. Les eaux relativement chaudes des débâcles de printemps conduisent à un recul des berges de la Léna variant entre 4 et 40 m par an.

Les approches physiques, chimiques et biologiques des milieux polaires

Acronyme et nom du projet		Le projet en un titre
DOME A	Observation et Modélisation d'un Environnement Extrême en Antarctique	Le rôle du CO ₂ dans les grands changements climatiques quaternaires
VANISH	Vulnerability of the ANTArctic Ice Sheet and its atmosphere	L'impact du changement climatique sur le plateau de l'Antarctique de l'Est
VOSTOK	Caractérisation biologique, géochimique, glaciologique d'un environnement sous-glaciaire unique	A la recherche de la vie dans le lac sous-glaciaire de VOSTOK (Antarctique)
DACOTA	Dynamique Antarctique Côtière en Terre Adélie	Rôle des glaciers émissaires côtiers Antarctiques sur le futur niveau des mers
SANVALLOR	Forage dans les glaciers de Patagonie : trait d'union entre les Andes centrales et la Patagonie	L'évolution du climat en Patagonie sur les derniers 150 ans révèle des surprises climatiques et environnementales
EVINCE	Vulnerability of native communities to invasive insects and climate change in Subantarctic Islands	Changements climatiques et invasions biologiques dans les Iles Subantarctiques
CITRONNIER	La composition isotopique triple de l'Oxygène: de Nouveaux indicateurs de l'Evolution de la biosphère et du cycle hydRologique	Evolution couplée du cycle hydrologique, de la biosphère et du climat
NEEM-France	Etude de la vulnérabilité de la calotte du Groenland au changement climatique : modélisation et analyse de la glace du nouveau forage profond NEEM	Couplage entre climat et calotte groenlandaise pendant la dernière période interglaciaire
MALINA	How changes in ice cover, permafrost and UV radiation impact on biodiversity and biochemical fluxes in the Arctic	Impacts des changements climatiques sur les écosystèmes de l'Océan Arctique
MERCY	Exploring the isotopic dimension of the global mercury cycle	Quel sera l'effet du changement climatique sur le cycle du mercure en milieu Arctique ?
IMPACT-BOREAL	IMPACT of climate on hydrology and methane on production in anaerobic soils in BOREAL regions	Quel est le rôle des zones humides dans le changement climatique au 21 ^{ème} siècle?
CLIMAFLU	CLIMAtic change and FLUvial dynamics of the Lena river, Siberia	Impact du réchauffement climatique récent sur la dynamique fluviale de la Léna

Programme « Blanc », édition 2007

DOME A

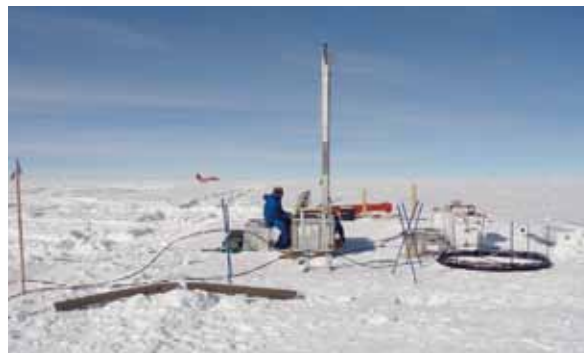
Le rôle du dioxyde de carbone dans les grands changements climatiques quaternaires

Contraindre la relation temporelle entre évolution des températures et du CO₂ et localiser de la glace vieille de plus d'un million d'années

Depuis 2005, la priorité scientifique du programme international IPCS (International Partnerships in Ice Core Sciences) consiste à localiser puis forer en Antarctique de la glace très ancienne. Il s'agit de comprendre pourquoi le climat terrestre a changé de rythmicité il y a environ 1 Ma, passant de cycles glaciaires-interglaciaires tous les 40 000 ans à des cycles espacés de 100 000 ans. Cette énigme climatique majeure pourrait être liée à la quantité de CO₂ présente dans l'atmosphère. Le projet DOME A vise à caractériser à cette fin, le potentiel d'une région située au cœur du plateau antarctique, au sud de la base Concordia. Le projet vise d'autre part à mieux contraindre la relation temporelle existant entre les changements climatiques naturels et ceux du CO₂ atmosphérique. Elle dépend de notre compréhension des processus conduisant la neige à se transformer en glace pour piéger de petites bulles d'air, processus mal connus pour des conditions de très faibles températures et accumulations telles qu'on les rencontre au cœur du plateau antarctique.

Un forage et des prélèvements d'air au sein du névé dans une région inexplorée de l'Antarctique

Le projet a été rendu possible grâce aux moyens logistiques de l'IPEV (projets dénommés EXPLORE et TASTE-IDEA), avec le soutien supplémentaire de la logistique italienne en Antarctique. Le raid scientifique mis en place par l'IPEV pour le projet ANR VANISH (VMC 2007), ayant parcouru pour la première fois la région entre les bases Concordia et VOSTOK, a constitué le support méthodologique essentiel au projet DOME A. Au terme de ce raid, nous avons stationné durant 8 jours sur le site désormais dénommé « Point Barnola », pour conduire un forage jusqu'à 110 m de profondeur en utilisant un carottier développé par le LGGE. Nous avons également prélevé à différentes profondeurs l'air interstitiel du névé. Cet air a pu être analysé en partie sur le terrain, en temps réel, en utilisant une instrumentation optique innovante développée à Grenoble (spectromètre à amplification résonnante d'absorption, breveté par le Laboratoire Interdisciplinaire de Physique).



Forage et prélèvements d'air dans le névé au « Point Barnola », situé au sud de la base franco-italienne Concordia en Antarctique. On distingue au premier plan le manchon et la tubulure de prélèvement d'air, au deuxième plan le carottier en position de forage, et au fond l'avion à ski Twin-Otter qui a apporté un soutien logistique partiel à l'expédition (Photo : J. Chappellaz, CNRS/LGGE/IPEV).

DOMÉ A « Observation et Modélisation d'un Environnement Extrême en Antarctique » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LGGE (Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement). Il associe le LSCE Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement). Le projet a débuté en janvier 2008 et bénéficie d'un report jusqu'en juin 2013 pour une durée totale de 66 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 430 k€ pour un coût global d'environ 2,5 M€.

Résultats majeurs

Le projet DOME A a permis de caractériser le potentiel d'une zone inexplorée de l'Antarctique pour fournir la glace suffisamment ancienne recherchée par le consortium international IPCS. Il a permis également l'émergence d'un autre projet très ambitieux de forage de cette glace très ancienne par une sonde innovante que développera prochainement le LGGE. Ce nouveau projet est porté à la fois par l'ANR et par l'ERC (bourse pour chercheur confirmé), avec l'aide en mécénat de la Fondation BNP Paribas.

Production scientifique et brevets

Lemieux-Dudon B., Blayo E., Petit J.R., Waelbroeck C., Svensson A., Ritz C., Barnola J.M., Narcisi B., Parrenin F., 2010. Consistent dating for Antarctic and Greenland ice cores. *Quat. Sci. Rev.*, 29 (1-2) : 8-20.
Jouzel J., Masson-Delmotte V., 2010. Deep ice cores : the need for going back in time. *Quat. Sci. Rev.*, 29 (27-28) : 3683-3689.
Schaefer H., Laurantou A., Chappellaz J., Lüthi D., Bereiter B., Barnola J.M., 2011. On the suitability of partially clathrated ice for analysis of concentration and $\delta^{13}\text{C}$ of palaeo-atmospheric CO₂. *Earth and Planetary Sci. Lett.*, 307 : 304-340.

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2007

VANISH

L'impact du changement climatique sur le plateau de l'Antarctique de l'Est

Observer et mesurer la variabilité spatiale et temporelle de paramètres climatiques et environnementaux depuis la période pré-industrielle

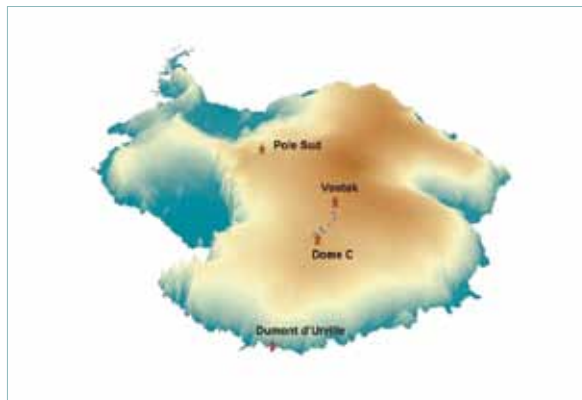
Depuis 1990 le programme international ITASE (International Trans-Antarctic Scientific Experiment) coordonne les raids scientifiques organisés par différents pays. Les objectifs majeurs d'ITASE sont de cartographier la variabilité spatio-temporelle des paramètres climatiques et environnementaux en Antarctique pour les derniers siècles. Dans ce cadre, le projet VANISH contribue à plusieurs objectifs tels que la mesure de l'accumulation de neige au moyen d'un radar dédié, la réalisation de carottages de 20 m de profondeur environ permettant de dater les couches observées sur environ 300 ans. Les variations récentes de température sont étudiées par plusieurs moyens : station météo, grappe de thermistances dans la neige, approche indirecte au travers de la composition isotopique de la neige. La variabilité de l'activité solaire est explorée à partir de l'isotope cosmogénique ^{10}Be . Les caractéristiques physiques de la neige en surface et jusqu'à 20 m de profondeur sont observées pour une meilleure interprétation des données satellitaires. La chimie de l'atmosphère est documentée à la fois par des prélèvements atmosphériques et des prélèvements de neige.

Un raid scientifique ambitieux dans une région inexplorée de l'Antarctique

Le projet se place d'emblée dans un cadre de la coopération internationale indispensable en Antarctique. Le navire de desserte, la station scientifique Dumont d'Urville (DDU) et les véhicules sont mis en œuvre par l'IPEV. La base franco-italienne Concordia et les « Expéditions Russes Antarctiques » offrent l'accès à la base VOSTOK. Des opérations ont eu lieu à VOSTOK, à Concordia et lors d'un raid logistique entre DDU et DOME C. Le point d'orgue du projet est le raid scientifique entre DOME C à 3200 m d'altitude et VOSTOK (3600 m), car il s'agit d'une première scientifique et logistique dans cette région de l'Antarctique encore inexplorée par les moyens terrestres. La distance parcourue aller-retour est au total de 1400 km sur un terrain vierge. Au-delà du défi scientifique, se rajoute donc un défi technologique. Le raid est parti de Concordia le 20 décembre 2011 avec un retour le 24 janvier 2012 pour environ 15 jours de travail scientifique, dont 8 jours au Point Barnola, où a été effectué un forage de 110 m (projets ANR DOME A et IPEV EXPLORE). La plupart des mesures (prises d'échantillons, carottages, installation des matériels) se font en station et quelques mesures ont été effectuées en continu par des instruments attachés aux véhicules.

Résultats majeurs

L'intérêt majeur du projet a été la collecte de données et de mesures dans une zone totalement inexplorée de l'Antarctique. Malgré des conditions logistiques particulièrement difficiles (bateau coincé dans les glaces, annulation de nombreux vols avions, accident d'hélicoptère et donc retards importants), la majeure partie des objectifs a été atteinte. L'analyse des données sera d'une grande richesse pour la



Vue en 3D de la calotte polaire Antarctique : les activités du projet VANISH se sont déroulées entre DDU, DOME C et VOSTOK. Le raid entre DOME C et VOSTOK, effectué lors de l'été austral 2011-2012 est une première scientifique et technologique. (Carte réalisée par G. Durand, CNRS/LGGE).

VANISH « Vulnerability of the ANTArctic Ice Sheet and its atmosphere » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LGGE (Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement). Il associe le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement), le LEGOS (Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiale), le CEREGE (Centre Européen de REcherche et d'Enseignement de Géosciences de l'Environnement), ainsi que l'IPEV- Brest (Institut Polaire Français Paul- Emile Victor). Le projet a débuté en janvier 2008 et a bénéficié d'une prolongation jusqu'en décembre 2012 pour une durée totale de 60 mois. Il bénéficie d'un financement de l'ANR de 694 k€ pour un coût total d'environ 3,7 M€.

connaissance de cette partie du continent Antarctique. Un atout pour le futur a été la mise en place par l'IPEV de moyens de raids scientifiques qui seront disponibles pour l'ensemble de la communauté dans les années futures.

Production scientifique et brevets

Brucker L., *et al.*, 2011. Modeling time series of microwave brightness temperature at Dome C, Antarctica, using vertically resolved snow temperature and microstructure measurements. *J. of Glaciology*, 57 (201):171-182.
 Frey M., *et al.*, 2009. Photolysis imprint in the nitrate stable isotope signal in snow and atmosphere of East Antarctica and implications for reactive nitrogen cycling. *Atmos. Chem. Phys.*, 9 : 8681-8696.
 Dommergue A., *et al.*, 2010. Overview of mercury measurements in the Antarctic troposphere. *Atm. Chem. and Phys.*, 10: 3309-3319.
 Baroni M., *et al.*, 2011. Volcanic and solar activity, and atmospheric circulation influence on cosmogenic ^{10}Be fallout at Vostok and Concordia (Antarctica) over the last 60 years. *Geochem. and Cosmo. Acta* 75 (22): 7132-7145.

Programme « Blanc », édition 2007

VOSTOK

A la recherche de la vie dans le Lac sous-glaciaire de VOSTOK (Antarctique)

La glace d'accrétion du lac sous-glaciaire de VOSTOK ouvre la fenêtre sur un milieu extrême

Plus de 400 lacs sous-glaciaires sont blottis sous la calotte de glace l'Antarctique. Isolés de la lumière solaire et des échanges avec l'atmosphère depuis des millions d'années, ces lacs représentent des milieux extrêmes où la vie y est peut-être présente. Le lac sous-glaciaire de VOSTOK est le plus grand, peut-être le plus vieux, sous près de 4 000 m de glace et ses 5 000 km³ d'eau sont coincés dans une dépression de plus de 1 200 m dans un socle rocheux accidenté. La station russe de VOSTOK est installée fortuitement près de l'extrémité Sud du lac. Le forage dans la glace réalisé pour les études climatiques a atteint plus de 3 700 m de profondeur et a pénétré un massif de glace épais de 220 m collé sous le glacier. Les échantillons de cette glace « d'accrétion » proviennent du gel de l'eau du lac au contact du glacier et ouvrent une fenêtre inattendue sur cet environnement. La détection de la vie dans ces échantillons est très difficile car le milieu est d'une extrême pureté, en regard des moyens de forages utilisés pour extraire ces carottes. Heureusement, la glace est étanche et son intérieur intact est accessible après décontamination. A côté de la recherche d'indices de vie dans un milieu extrêmement dilué, des études géochimiques et physiques sont conduites.

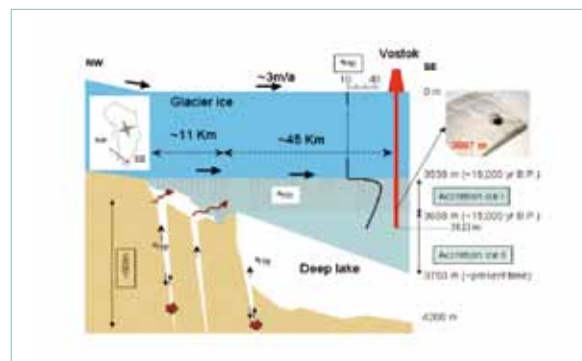


Schéma en coupe du glacier et du lac sous-glaciaire de VOSTOK (d'après Bulat et al, 2004). Le glacier flotte sur le lac et le traverse selon sa largeur (en médaillon à gauche). L'eau du lac regèle au contact du glacier formant un massif de glace d'accrétion. La glace d'accrétion contient des fragments de sédiments (en médaillon à droite) et dans lesquels des signatures de bactéries thermophiles ont été détectées. Des niches subsistent sans doute dans des failles profondes. L'activité tectonique (symbolisée par les explosions) contribue à la dégradation en 4He et aurait permis l'intégration rapide de sédiments dans la glace d'accrétion.

Caractériser l'environnement sous-glaciaire par la biologie moléculaire et la géochimie de la glace d'accrétion

Pour détecter les traces de vie, les techniques de biologie moléculaire sont appliquées de front avec des analyses physico-chimiques. Les échantillons de glace sont décontaminés selon un protocole strict en chambre sans poussières au LGGE ou à la plateforme PAL-GENE du CNRS, puis analysés par isolation de l'ADN qui est ensuite séquencé. La même approche est appliquée sur l'environnement immédiat des carottes (fluide de forage, laboratoires...) mais aussi sur l'ADN extrait de grands volumes de neige collectés en surface à VOSTOK sur l'ADN et de carottes de glace venant du Mont Blanc, l'ensemble des résultats permettant une étude critique. Les seuils de détection de l'ADN sont évalués par des expériences de dilution. Les études physico-chimiques de la glace d'accrétion concernent : i) les analyses des gaz contenus dans les inclusions solides ou ceux qui sont dissous dans la glace (He, H₂, CH₄, CO₂, ...), ii) les analyses des éléments chimiques majeurs, iii) le carbone organique dissous, iv) les analyses des isotopes de l'eau, v) la caractérisation par la technique synchrotron des inclusions solides et les études des cristaux et des dislocations par rayons X.

VOSTOK « Caractérisation, biologique, géochimique, glaciologique d'un environnement sous-glaciaire unique » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LGGE (Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement). Il associe le LEM (Laboratoire d'Ecologie Microbienne), le LE2M (Laboratoire d'Etudes des Environnements Extrêmes) et le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement). Le projet a débuté en novembre 2007 et a bénéficié d'un report jusqu'en mai 2011 pour une durée totale de 43 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 570 k€ pour un coût global de l'ordre de 2,1 M€.

Résultats majeurs

L'eau du lac sous-glaciaire apparaît d'une extrême pureté tant sur le plan biologique, que chimique ou physique. Contrastant avec la glace du Mont Blanc, son contenu biologique y est très dilué, les tests de culture en direct et la détection de virus sont restés négatifs. Selon notre étude, le lac apparaît comme étant stérile, avec de très faibles concentrations en éléments chimiques et en carbone organique dissous. Sans est-il pour autant hyper-oxygéné ? Par contre, la présence d'une bactérie thermophile (*Hydrogenophylus thermolutolus*) dont le métabolisme est fondé sur l'hydrogène, a été trouvée dans les sédiments, venant des failles profondes. Là, cette vie bénéficierait de l'activité hydrothermale, suggérée par les anomalies de la glace en isotopes stables et en hélium.

Production scientifique et brevets

Le consortium a participé à des colloques internationaux traitant des recherches de la vie en milieux extrêmes conduisant à 18 publications dans des revues internationales à comité de lecture, 49 communications à des conférences internationales, 3 contributions à des chapitres d'ouvrage, 3 conférences invitées et 2 conférences grand public.

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2006

DACOTA

Rôle des glaciers émissaires côtiers Antarctiques sur le futur niveau des mers

Comprendre, quantifier et modéliser les flux de glace Antarctique à la mer en vue d'une meilleure estimation du futur niveau des mers

La quasi-intégralité de la neige tombant sur le continent Antarctique est évacuée à la côte (suite à sa transformation en glace) où elle finit par se détacher sous forme d'icebergs. A la faveur de cet écoulement gravitaire essentiellement contrôlé par la topographie du socle rocheux, ces flux de glace se concentrent en de véritables « fleuves de glace » caractérisés par leur relative étroitesse et de fortes vitesses de débit. Les systèmes émissaires qui en résultent obéissent à une dynamique d'écoulement très spécifique et surtout très sensible aux changements environnementaux comme le confirme la très forte et soudaine accélération de ces glaciers récemment observée. Le projet DACOTA vise à comprendre ces systèmes émissaires par le jeu combiné de l'observation et de la modélisation numérique. Le glacier de l'Astrolabe en Terre Adélie a été sélectionné comme zone-atelier au niveau de laquelle un protocole étendu de mesures permet de collecter les informations nécessaires à la compréhension de la dynamique spécifique de ces systèmes glaciaires côtiers et à la conduite d'un important travail de modélisation numérique visant à prédire leur comportement futur.



Illustration du processus de concentration de la glace dans son cheminement vers la mer pour former un système émissaire étroit à fortes vitesses d'écoulement à la côte, à l'image d'un fleuve (figure de gauche). Montage d'une des 9 stations GPS permanentes et autonomes du réseau de déformation du glacier école de l'Astrolabe en Terre Adélie (figure de droite).

DACOTA « Dynamique Antarctique COtière en Terre Adélie » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LGGE (Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement). Il associe le LEGOS (Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales). Le projet a en janvier 2007 pour une durée de 42 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 457 k€ pour un coût global de 833 k€.

Observation et modélisation des systèmes glaciaires côtiers

Les paramètres influant la dynamique de ces glaciers ont motivé le choix des protocoles de mesures. Parmi ceux-ci, la topographie du lit rocheux sous le glacier est fondamentale pour guider l'écoulement de la glace. Celle-ci a été mesurée par un radar aéroporté sur le glacier école et sur l'ensemble des autres gros glaciers émissaires situés dans un rayon de 1 500 km et ce, dans le cadre d'une importante collaboration avec l'Université du Texas. La position de la ligne d'échouage (ligne à partir de laquelle le glacier se met à flotter sur la mer) s'avère aussi fondamentale (car elle marque la transition entre 2 régimes d'écoulement glaciaire totalement différents) et a fait l'objet d'une cartographie à l'aide d'une méthode originale de mesure des déplacements verticaux par GPS différentiel. Ensuite, l'écoulement en surface du glacier est mesuré en continu à l'aide d'un réseau de 9 stations GPS permanentes et autonomes. Ce type de mesure s'avère fondamental pour valider et affiner les résultats de modélisation numérique qui requiert le développement de modèles hautement spécifiques intégrant les particularités de ces glaciers et notamment la mobilité de la ligne d'échouage.

Résultats majeurs

Les quatre années de mesures de terrain ont permis une bonne caractérisation du glacier école et font de celui-ci l'un des glaciers les mieux documentés d'Antarctique. Elles ont aussi permis de mieux comprendre le fonctionnement des systèmes émissaires côtiers et de fournir les données nécessaires au calage des modèles d'écoulement ainsi qu'à leur initialisation dans le cadre de simulations évolutives. La modélisation a conduit à une meilleure représentation de la mobilité de la ligne d'échouage ainsi que de ses effets sur la

dynamique glaciaire, notamment grâce au passage en 3-D. Enfin, l'application de ces modèles a confirmé l'importance de la topographie sous-glaciaire en mettant en évidence une instabilité de la calotte glaciaire sous certaines configurations, configurations qui ont par ailleurs été révélées sous une part importante des grands glaciers émissaires de l'Antarctique de l'Ouest au cours des mesures aéroportées. Sur ces bases, les possibilités de déstabilisations de la calotte et les conséquences sur le niveau des mers à plus ou moins brève échéance pourront être testées et quantifiées par la modélisation numérique.

Production scientifique et brevets

Durand G., Gagliardini O., De Fleurian B., Zwinger T., Le Meur E., 2009. Marine ice sheet dynamics: Hysteresis and neutral equilibrium. *J. Geophys. Res.*, 114.
 Durand G., Gagliardini O., Favier L., Zwinger T., Le Meur E., 2011. Impact of bedrock description on modeling ice sheet dynamics. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L20501.
 Gagliardini O., Durand G., Zwinger T., Hindmarsh R. C. A., Le Meur E., 2010. Coupling of ice-shelf melting and buttressing is a key process in ice-sheets dynamics. *Geophys. Res. Lett.* 37, 5 pp.

Programme « Blanc », édition 2006

SANVALLOR

L'évolution du climat en Patagonie sur les derniers 150 ans révèle des surprises climatiques et environnementales

Documenter la variabilité climatique et environnementale en Patagonie, une région quasi vierge de connaissances

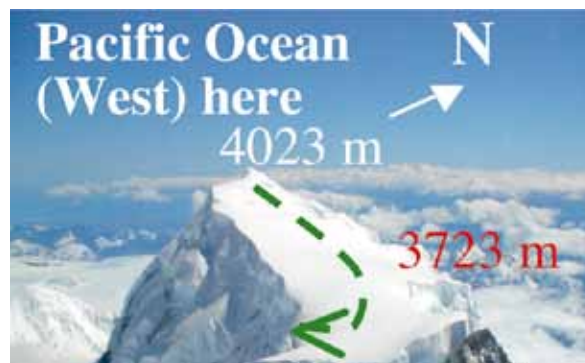
Comprendre la variabilité naturelle de notre climat à différentes échelles de temps et d'espace est indispensable si nous souhaitons estimer l'impact de l'homme sur celle-ci et comprendre comment notre système climatique va réagir. Étudier les climats du passé est donc un moyen formidable pour comprendre les mécanismes qui régissent notre système climatique, de l'échelle locale à globale. Si des archives telles que les carottes de glace en Antarctique sont étudiées depuis longtemps dans ce but, l'étude de la variabilité du climat tropical à partir des carottes de glace tropicales, prélevées dans les glaciers de haute altitude, comme on en trouve dans les Andes sud-américaines, est beaucoup plus récente. Toutefois, une importante lacune persiste dans la documentation de la variabilité climatique des moyennes latitudes de l'hémisphère sud. Ainsi, de nombreux mécanismes d'interactions d'échelle et de téléconnexions restent inconnus. Le projet SANVALLOR se propose donc de combler cette lacune et d'étudier la variabilité climatique et environnementale en Patagonie, en fournissant pour la première fois une archive glaciaire de moyenne latitude, chaînon manquant entre les études sous les Tropiques et sur le continent Antarctique.

Analyses isotopiques et chimiques d'un forage dans un glacier de Patagonie (47°S, 73°W, 3747 m)

Pour reconstruire la variabilité climatique passée et les conditions environnementales associées, une carotte de glace a été extraite en mai 2007 sur toute l'épaisseur (122 m) du glacier du San Valentin (47°S, 73°W), point culminant des Andes patagoniennes. Les neiges déposées année après année enregistrent les conditions environnantes et leur analyse permet donc de retracer l'évolution climatique et environnementale. Le projet SANVALLOR repose sur des milliers d'analyses en laboratoire qui sont essentiellement des analyses de la composition isotopique des neiges (oxygène 18 et deutérium) par spectrométrie de masse, retraçant la température régionale, et l'analyse d'espèces chimiques par chromatographie ionique et ICP-MS apportant des informations diverses sur la circulation atmosphérique, les feux anthropiques et les débuts de la colonisation ou encore la montée anthropique de la pollution par les métaux tel que le plomb.

Résultats majeurs

Le projet SANVALLOR a permis d'obtenir des chroniques inédites des changements climatiques et environnementaux dans une région vierge de documentation en dehors de la période instrumentale. En particulier, il a permis de reconstruire les variations de température sur les 120 dernières années. La tendance observée sur le signal montre un clair refroidissement de la région étudiée d'environ 0.2°C par décennie. Ce résultat, qui étend temporellement et spatialement les observations disponibles depuis 1979 sur la côte Nord chilienne, montre que localement, dans un monde qui se réchauffe, la réaction du système climatique au changement global peut induire des variations contraires au signal global. Le second résultat est l'obtention



Vue aérienne du plateau sommital du San Valentin. La ligne d'écoulement du glacier est représentée en vert et l'étoile rouge indique le site de forage (Photo B. Pouyaud, IRD).

SANVALLOR « Forage dans les glaciers de Patagonie : trait d'union entre les Andes centrales et la Patagonie » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement). Il associe HSM (HydroSciences Montpellier), le LGGE (Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement) et le GET (Géosciences Environnement Toulouse), ainsi que deux partenaires chiliens : le CECS (Centro de Estudios Científicos, Valdivia) et le Departamento de Geofísica de l'Université du Chili, Santiago. Le projet a débuté en novembre 2006 pour une durée de 54 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 600 k€, pour un coût global de l'ordre de 650 k€.

d'une chronique depuis le début du 20^{ème} siècle de l'impact de la colonisation des plaines argentine, via le déclenchement de feux anthropiques liés à l'agriculture. Dans une région où les archives historiques sont rares, cette chronique est de première importance. Enfin, des analyses sur la concentration en métaux lourds ont montré que la région n'est pas épargnée par les pollutions métalliques bien connues comme le plomb.

Production scientifique et brevets

Citons notamment :

Vimeux F., de Angelis M., Ginot P., Magand O., Pouyaud B., Cassassa G., Johnsen S., Falourd S., 2008. A promising location in Patagonia for paleoclimate and environmental reconstructions revealed by a shallow firn core from Monte San Valentin (Northern Patagonia Icefield, Chile). *J. of Geophys. Res.*, 113, D16118, doi:10.1029/2007JD009502.

Vimeux F., Maignan F., Reutenauer C., 2011. Evaluation of cloudiness over Monte San Valentin (Northern Patagonia Icefield) from 2000 to 2008 using MODIS observations: implications for paleoclimate investigations from ice cores. *J. of Glaciology* 57: 221-230.

Ainsi que le film « Chercheurs de Climat », réalisé par P. Desenne, coproduction Scérén- CNDP, France 5.

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2007

EVINCE

Changements climatiques et invasions biologiques dans les Iles Subantarctiques

Dans quelle mesure les invasions biologiques menacent-elles la biodiversité des Iles subantarctiques ?

En raison de leur sensibilité aux changements climatiques, de leur fort taux d'endémisme et de leurs communautés simplifiées, les îles subantarctiques représentent des écosystèmes modèles pour l'étude de la vulnérabilité des communautés autochtones aux changements globaux (invasions biologiques, climat). La dynamique des populations animales et végétales de ces îles est suivie depuis plusieurs décennies au travers de programmes soutenus par l'IPEV. Ces relevés à long terme dans des zones où les activités humaines sont réduites permettent une approche fine de l'impact des changements climatiques qui peuvent fragiliser les organismes natifs alors qu'ils favorisent les organismes introduits. Le projet EVINCE a pour objectif de caractériser les réponses morphologiques, écophysiologiques et génétiques, exprimées dans le temps et l'espace, chez trois espèces d'insectes introduits et invasifs dans les Iles Kerguelen. Leur impact sur la diversité native (prédation, compétition) de ces îles a été étudié. Nous avons également considéré les virus de plantes, dont le transport et la transmission locale peuvent être liés à l'invasion de certains insectes récemment introduits, tels que les pucerons.

Une approche multidisciplinaire couplant écologie, écophysiologie, virologie, génomique et génétique des populations

Les suivis en conditions naturelles et les approches expérimentales en conditions contrôlées, associés à des analyses biologiques et éco-physiologiques ont permis de définir les principales caractéristiques biologiques expliquant le succès invasif des insectes étudiés dans les conditions écologiques des îles subantarctiques. L'approche holistique et intégrative proposée par la métabolomique a permis de préciser la manière dont les différentes voies de synthèse et de dégradation métabolique interfèrent ou sont régulées. Mode de reproduction, régime alimentaire, allocation des ressources, capacité de dispersion et capacité de réponse aux stress environnementaux ont ainsi été mis en évidence. Couplées à des données morphométriques et génétiques, ces approches permettent d'inférer les phénotypes caractéristiques des insectes invasifs. Ce projet novateur a permis d'intégrer les effets directs des insectes introduits (prédation, compétition, phytophagie) mais également de dresser pour la première fois un diagnostic complet des virus de plantes, microorganismes rarement pris en compte dans les études sur les invasions biologiques, et dont certains sont véhiculés par des insectes introduits.

Résultats majeurs

Pour les trois espèces d'insectes introduits, les résultats ont mis en évidence : i) d'importantes capacités de dispersion (par flottaison par exemple), caractérisées à l'aide de marqueurs génétiques, ii) des adaptations morphologiques rapidement exprimées (taille, modification de la forme de l'aile), iii) des préférences alimentaires marquées pour les espèces d'invertébrés et de plantes natives, iv) d'importantes capacités d'ajustements métaboliques en fonction



Types d'habitats et insectes introduits étudiés dans les Iles Kerguelen : un carabique prédateur, une mouche saprophage et un puceron phytophage (Photos : B. Chaubet, M. Hullé, M. Laparie).

EVINCE « Vulnerability of native communities to invasive insects and climate change in sub- Antarctic islands » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le Laboratoire ECOBIO (Ecosystèmes, Biodiversité, Evolution, Rennes 1). Il associe les partenaires suivants : l'IGEPP (Institut de Génétique, Environnement et Protection des Plantes) et BFP (Biologie du Fruit et Pathologie) de l'INRA (Institut National de Recherche Agronomique) ainsi que le LEHNA (Laboratoire d'Ecologie des Hydro-systèmes Naturels et Anthropisés, Lyon 1). Le projet a débuté en janvier 2008 pour une durée de 54 mois. Il bénéficie d'un financement de l'ANR de 463 k€ et du soutien de l'IPEV pour la logistique et les ressources humaines sur le terrain, le coût global s'élevant à 2,3 M€.

des conditions environnementales, contribuant au succès invasif et v) un premier diagnostic complet des virus de plantes.

Production scientifique et brevets

Lebouvier M., *et al.*, 2011. Biological Invasions 13:1195-1208.
Laparie M., Lebouvier M., Lalouette L., Renault D., 2010. Biological Invasions 12: 3405-3417.
Marais A., Faure C., Hullé M., Candresse T., 2010. Plant Disease 94: 477.
Lalouette L., 2009. Impact de l'activité anthropique et des changements climatiques sur le succès envahissant de *Merizodus soledadinus* aux Iles Kerguelen. Doctorat de l'Université de Rennes 1, 240 pp.
Laparie M., 2011. Succès invasif de deux insectes introduits aux Îles Kerguelen. Doctorat de l'Université de Rennes 1, 217 pp.

Programme « Jeunes Chercheurs, Jeunes Chercheuses », édition 2008

CITRONNIER

Evolution couplée du cycle hydrologique, de la biosphère et du climat

Cycles de l'oxygène et de l'eau au cours du dernier million d'années

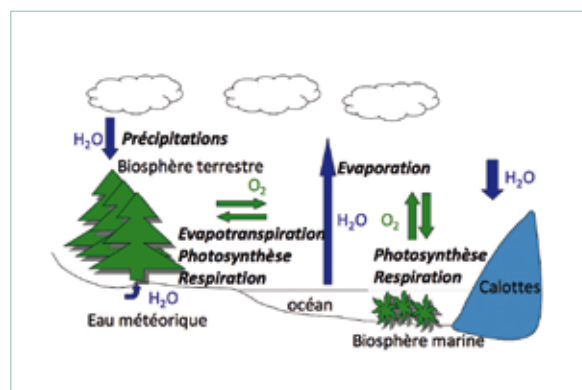
Dans le contexte de changement climatique et de composition de l'atmosphère, les variations naturelles des flux de productivité de la biosphère, grande consommatrice de CO_2 , sont encore très mal contraintes au niveau global. Cette question est très intimement liée aux interactions entre le cycle de l'eau et le climat car les plantes consomment l'eau pour fabriquer l'oxygène atmosphérique. Cependant, malgré de nombreuses études menées au cours des 50 dernières années utilisant les isotopes de l'eau (D et ^{18}O) dans le cycle de l'eau actuel et passé, de grandes incertitudes demeurent quant au couplage entre climat et cycle hydrologique lors des transitions climatiques majeures. Ceci est en particulier lié à notre compréhension limitée des fractionnements isotopiques de l'eau dans les basses latitudes (i.e. rôle de la convection). L'étude couple modélisation et acquisition de données uniques des 3 isotopes de l'oxygène dans l'air et dans l'eau lors des transitions climatiques majeures aux échelles orbitales et millénaires du Quaternaire. Ces nouveaux traceurs apportent des informations directes sur les variations de productivité globale de la biosphère et l'humidité relative des régions majeures d'évaporation.

Composition isotopique triple de l'oxygène dans l'air et dans la glace

En développant la mesure à haute précision des 3 isotopes de l'oxygène (^{16}O , ^{17}O , ^{18}O) dans l'air piégé dans les carottes de glace, nous avons maintenant un outil permettant de reconstruire les variations de productivité globale de la biosphère en parallèle avec les variations climatiques et de composition atmosphérique enregistrées dans les archives glaciaires sur les 800 000 dernières années. Cependant, l'interprétation des variations temporelles de la composition isotopique de l'oxygène de l'air n'est pas directe car celles-ci dépendent des variations de la composition isotopique de l'oxygène dans l'eau, régie par les variations du cycle de l'eau et d'autres processus biologiques. Le projet CITRONNIER comprend donc deux volets. Le premier consiste à étudier les variations des 3 isotopes de l'oxygène de l'eau dans le cycle hydrologique actuel et dans le passé, grâce à l'étude des carottes de glace. Dans ce but, nous avons construit un dispositif expérimental unique en France permettant la mesure de ces isotopes avec une précision suffisante. Le deuxième volet consiste à intégrer les 3 isotopes de l'oxygène de l'air et de l'eau dans des modèles de climat de complexité intermédiaire permettant de simuler leurs variations lors de transitions climatiques majeures du Quaternaire.

Résultats majeurs

Une première étude de la composition isotopique triple de l'oxygène de l'eau en région tropicale (mousson africaine) a révélé que ce traceur permettait de contraindre l'impact de la ré-évaporation, un des phénomènes associés à la convection tropicale, sur les isotopes de l'eau. Ce résultat est essentiel car il permet par la suite d'utiliser les isotopes de l'eau pour contraindre les taux de convection en région tropicale. La première étude menée sur plusieurs cycles saisonniers



Couplage du cycle de l'oxygène et de l'eau dans le système Terre
(Crédit A. Landais).

CITRONNIER « La Composition Isotopique triple de l'Oxygène : de Nouveaux indicateurs de l'Evolution de la biosphère et du cycle hydrologique » est un projet de recherche fondamentale coordonné et réalisé par le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement). Le projet a débuté en janvier 2009 pour une durée de 42 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 250 k€ pour un coût global de 1 M€.

des 3 isotopes de l'oxygène sur le site du projet VMC 2007 NEEM-France au Groenland a révélé que la combinaison des différents isotopes de l'eau (δD , $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{17}\text{O}$) permettait de contraindre de façon unique les variations saisonnières de température locale et régionale dans les zones d'évaporation et d'humidité relative. Ce résultat est primordial pour l'interprétation quantitative des isotopes de l'eau dans les carottes polaires aux échelles de temps plus longues abordées par le projet CITRONNIER.

Production scientifique et brevets

Winkler R., Landais A., Sodemann H., Dümmbgen L., Prié F., Masson-Delmotte V., Stenni B., Jouzel J., 2012. Deglaciation records of ^{17}O -excess in East Antarctica: reliable reconstruction of oceanic relative humidity from coastal sites. *Clim. Past Discuss.* (in press).
Landais A., Steen-Larsen H.C., Guillevic M., Masson-Delmotte V., Vinther B., Winkler R., 2012. Triple isotopic composition of oxygen in surface snow and water vapor at NEEM (Greenland). *Geochimica and Cosmochimica Acta* 77 : 304-316.
Landais A., Risi C., Bony S., Vimeux F., Descroix L., Falourd S., Bouygues A., 2010. Combined measurements of ^{17}O excess and D-excess in tropical regions: improvement of convective knowledge in the West African area. *Earth and Planetary Sci. Lett.*, 298 :104-112.

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2007

NEEM-FRANCE

La vulnérabilité de la calotte du Groenland

Couplage entre climat et calotte du Groenland pendant la dernière période interglaciaire

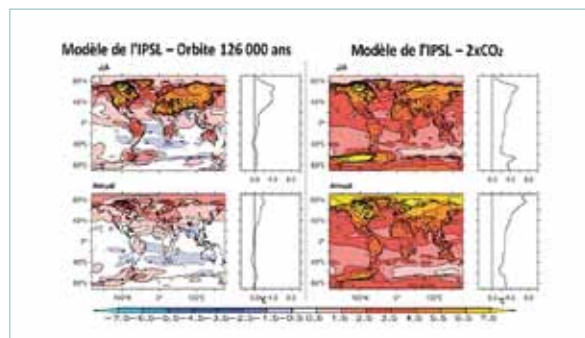
La réponse de la calotte du Groenland au changement climatique futur est une incertitude majeure sur l'évolution du niveau global des mers. Par ailleurs, la variabilité passée du climat en période glaciaire a démontré l'occurrence d'instabilités abruptes et répétées, liées à des réorganisations majeures de la circulation thermohaline. Abordé à l'aide d'observations conduites sur les carottes de glace et de simulations numériques, le projet NEEM-France se propose de répondre à trois questions : i) comment le climat du Groenland est-il affecté par l'évolution du climat global ou à grande échelle, à différentes échelles de temps, en réponse à différents types de forçage ? ii) comment la calotte groenlandaise réagit-elle au changement climatique régional ? iii) quelle est la sensibilité de la circulation thermohaline à des apports d'eau douce, selon l'état initial du climat ? Le projet vise plus spécifiquement à caractériser l'évolution du climat, de la composition de l'atmosphère et de la topographie du Groenland lors de la dernière période interglaciaire, il y a ~130 à 125 000 ans. Le contexte orbital de cette période entraînait un fort ensoleillement d'été dans l'hémisphère nord, et un climat dans l'Arctique plus chaud de 2 à 5°C que le climat actuel, permettant de tester le réalisme des simulations climatiques et glaciologiques sur une étude de cas précise, dans un contexte pertinent par rapport à l'évolution future du climat.

Analyse de la glace du nouveau forage profond NEEM, modélisation du climat et de la calotte du Groenland

Le projet international NEEM (API 2007-2008/International Partnership for IceCore Science) a coordonné des opérations de terrain de 2007 à 2011 pour acquérir un enregistrement climatique couvrant l'intégralité de la dernière période interglaciaire via un nouveau forage profond de 2500 m au nord-ouest du Groenland. Le projet NEEM-France combine l'étude des échantillons obtenus grâce à ce forage à la modélisation de la circulation atmosphérique régionale, du climat global, et de l'écoulement de la calotte groenlandaise pour améliorer le couplage entre modèles climatiques et modèles de calotte, déterminer la réponse aux changements climatiques de grande échelle (climats passés / climat futur), évaluer la réaction de la calotte à ces changements (effets de seuil, incertitudes liées au cycle hydrologique) et enfin analyser la sensibilité de la circulation thermohaline à un apport massif d'eau douce selon l'état initial du climat.

Résultats majeurs

Les deux graphiques ci-dessus montrent, à titre d'exemple, la comparaison entre une simulation du climat du dernier interglaciaire (en réponse aux paramètres orbitaux d'il y a 126 000 ans) et du climat futur (concentration en CO₂ doublée par rapport au climat pré-industriel) réalisée à l'aide du modèle de climat de l'IPSL (Institut Paul-Simon Laplace). Les résultats sont présentés en différences de température par rapport à une simulation de référence (climat pré-industriel), en moyenne pour juin-juillet-août (en haut) et en moyenne



NEEM-France « Etude de la vulnérabilité de la calotte du Groenland au changement climatique : modélisation et analyse de la glace du nouveau forage profond NEEM » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement). Il associe le LGGE (Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement) et le CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques, Météo-France). Le projet a débuté en janvier 2008 pour une durée de 54 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 1,08 M€ pour un coût global de 4,3 M€, ainsi que du soutien de l'IPEV pour les missions de terrain au Groenland.

annuelle (en bas). La moyenne des différences de température est également représentée en fonction de la latitude (trait noir)

Production scientifique et brevets

Outre la réalisation d'une Série d'affiches grand public « Glaces du Groenland, témoins et acteurs du changement climatique », disponibles sur : <http://www.insu.cnrs.fr/co/environnement/les-glaces-du-groenland-temoins-et-acteurs-du-changement-climatique>, citons les publications récentes suivantes :

Steen-Larsen H.C., *et al.*, 2011. J. of Geophys. Res.-Atmospheres 116 (in press).

Capron E., *et al.*, 2010. Clim. of the Past 6: 345-365.

Masson-Delmotte V., *et al.*, 2010. Proc. Nat. Acad. Sci., doi:10.1073/pnas.0914536107.

Masson-Delmotte V., *et al.*, 2011. Clim. of the Past 6: 1041-1059.

Wang Z., *et al.*, 2010. Science 330 : 1663-1666.

Programme « Blanc », édition 2008

MALINA

Impacts des changements climatiques sur les écosystèmes de l'Océan Arctique

Impact des changements de la banquise, du permafrost et des UV sur la biodiversité et les flux biogéochimiques

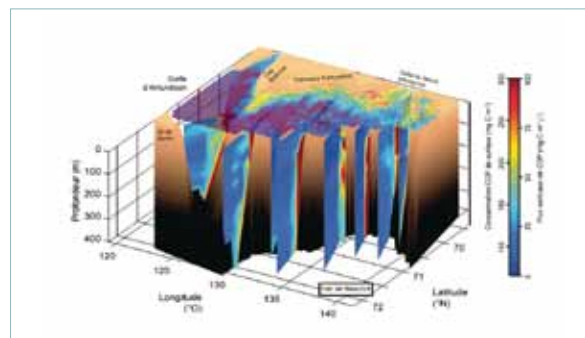
Le réchauffement climatique global induit actuellement en Arctique : i) une réduction du couvert estival de glace qui expose davantage la surface de l'Océan au rayonnement solaire et aux forçages atmosphériques, ii) une fonte du pergélisol et une augmentation du débit des fleuves, qui conduisent à une augmentation de l'export de carbone organique terrigène jadis séquestré dans la toundra, vers l'Océan Arctique, et iii) une détérioration de la couche d'ozone et une augmentation du rayonnement ultraviolet. Ces trois phénomènes induisent une augmentation de la production de CO_2 par l'Océan, principalement à cause de l'amplification de la photo- oxydation et de l'activité bactérienne. Toutefois, l'exposition d'une plus grande surface océanique à la lumière et l'apport accru de nutriments par les fleuves pourraient en même temps favoriser une plus grande production autotrophe et séquestration de carbone par l'Océan. C'est pour comprendre la variabilité passée et présente, et prédire le bilan de ces processus opposés qu'une campagne océanographique s'est déroulée dans le système du plateau continental du fleuve Mackenzie (mer de Beaufort) sur le brise-glace scientifique NGCC Amundsen durant l'été 2009.

Comprendre et prédire la variabilité de l'écosystème de l'Océan Arctique par une approche multidisciplinaire intégrée

Le but de la mission MALINA était de déterminer la distribution spatiale des stocks et flux de carbone vivants et détrituques dans la colonne d'eau et les sédiments, sur le plateau océanique et au-delà. Une grille exhaustive de stations d'échantillonnage a permis la caractérisation des propriétés optiques, physiques et biogéochimiques de l'Océan, le prélèvement d'eau à différentes profondeurs pour le suivi de processus d'intérêt, et le déploiement d'une caméra et de pièges à sédiments pour évaluer la dynamique des flux de matière particulière. Les travaux réalisés en mer ont permis d'évaluer l'équilibre actuel entre l'oxydation par la lumière et les bactéries, et la production photosynthétique et l'export de matière organique vers l'Océan Arctique profond. Des modèles diagnostiques de production primaire, export vertical, activité bactérienne et photo- oxydation, sont combinés à un modèle couplé physique- biologie d'écosystème marin. Les sorties de modèles climatiques globaux sont utilisées comme forçage du modèle couplé afin de prédire le devenir des flux de carbone dans l'Océan Arctique au cours du prochain siècle. De plus, une approche rétrospective, fondée sur l'analyse de proxies géochimiques déterminés sur des sédiments des 1000 dernières années, a permis de situer les liens entre les changements environnementaux et l'écosystème marin Arctique.

Résultats majeurs

La campagne océanographique MALINA a permis d'établir un bilan complet des flux de carbone organique (transport, production et minéralisation) dans les conditions stables et oligotrophes qui caracté-



Modèle géospatial tridimensionnel du système du fleuve Mackenzie en mer de Beaufort illustrant les concentrations de surface en carbone organique particulaire (COP) mesurées par télédétection superposées aux flux de COP modélisés dans la colonne d'eau du plateau et du talus continental grâce aux données recueillies pendant la campagne 2009.

MALINA « How changes in ice cover, permafrost and UV radiation impact on biodiversity and biochemical fluxes in the Arctic » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LOV (Laboratoire d'Océanographie de Villefranche-sur-Mer). Il s'appuie sur un consortium de 7 autres laboratoires affiliés au CNRS/INSU. Il implique également un partenariat international avec le Canada (réseau ArcticNet), la Norvège, et les États-Unis. Le projet a débuté en janvier 2009 pour une durée de 48 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 1 M€ à laquelle s'ajoute une contribution équivalente de l'INSU, du CNRS, du CNES et de l'Agence Spatiale Européenne, le budget consolidé des partenaires français et étrangers atteignant 10 M€.

terisent l'Océan Arctique durant l'été, et de paramétrer les modèles destinés au suivi par télédétection et à la prédiction de ces flux à l'échelle pan- arctique. Les séries temporelles produites à partir des données satellitaires suggèrent que la diminution de la banquise rend l'Océan Arctique plus productif au niveau le plus bas de la chaîne trophique (phytoplancton). Le projet a été à l'origine d'un partenariat France- Canada qui s'est cristallisé en 2011 sous la forme de l'Unité Mixte Internationale Takuvik qui associe le CNRS et l'Université Laval à Québec.

Production scientifique et brevets

Les résultats de MALINA feront l'objet d'un compendium scientifique qui sera publié en 2012 dans la revue Biogeosciences. Certaines études sont déjà publiées, dont notamment :

Forest A., *et al.*, 2011. Size distribution of particles and zooplankton across the shelf-basin system in Southeast Beaufort Sea: combined results from an underwater vision profiler and vertical net tows. Biogeosciences Discuss., 8: 11405-11452, doi:10.5194/bgd-8-11405-2011.

Ortega-Retuerta E., *et al.*, 2011. Evidence of heterotrophic prokaryotic activity limitation by nitrogen in the Western Arctic Ocean during summer. Polar Biol., doi : 10.1007/s00300-011-1109-8.

Programme « Jeunes Chercheurs, Jeunes Chercheuses », édition 2009

MERCY

Quel sera l'effet du changement climatique au cycle du mercure en milieu Arctique ?

Développer les signatures isotopiques du mercure comme traceur des sources et transformations biogéochimiques de cette toxine préoccupante

Les réglementations nationale et européenne vont conduire dans les Le mercure (Hg) est le seul métal lourd qui se trouve sous forme gazeuse dans l'atmosphère. Depuis la révolution industrielle, les émissions de mercure d'origine anthropique, qui résultent de la combustion de matières fossiles et d'activités minières, ont dépassé les émissions naturelles. Dans l'atmosphère, le mercure gazeux a un temps de résidence d'environ un an, ce qui lui permet, via les courants atmosphériques, de rejoindre les zones polaires les plus éloignées. Dans ces régions de haute latitude, une partie importante du mercure atmosphérique est oxydée, puis déposée et piégée dans la neige et la glace. Au printemps, la fonte de la banquise libère du mercure dans l'eau, dont une fraction peut être transformée par des bactéries sous une forme organique toxique, le méthyle-mercure. Les propriétés lipophiles de cette toxine font qu'elle s'intègre facilement dans la chaîne alimentaire, avec des concentrations qui augmentent à chaque niveau trophique. Les prédateurs terminaux en bout de chaîne alimentaire, en particulier les populations « Inuits » qui consomment les mammifères marins sont donc particulièrement exposés à cette toxine. Depuis une vingtaine d'années, les programmes de suivi des concentrations en mercure et méthyle-mercure dans différentes régions de l'Arctique montrent des tendances géographiques et temporelles contrastées. Quelles sont les raisons de ces variations ? Quels processus régissent le cycle du mercure ?



Des guillemots sur une glace dérivante dans la région de Cape Lisburne, Alaska. Les œufs de cette espèce sont utilisés en tant que bio-indicateur du mercure dans les écosystèmes arctiques (Photo D. Roseneau, US Fish and Wildlife Service).

MERCY « Exploring the isotopic dimension of the global mercury cycle » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le GET (Géosciences Environnement Toulouse). Il associe l'ECOLAB (Laboratoire écologie fonctionnelle et environnement), le LCABIE (Laboratoire de Chimie Analytique, Bio-Inorganique et Environnement) et l'Université McGill. Le projet a débuté en septembre 2009 pour une durée de 36 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 230 k€ pour un coût global de 1 M€.

Le fractionnement isotopique indépendant de la masse, phénomène rare mais utile

Pour mieux comprendre ces phénomènes, le projet MERCY a étudié des œufs de guillemots collectés dans plusieurs régions Arctiques et Subarctiques (golfe d'Alaska, mer de Béring, mer des Tchoukes). Situés en haut de la chaîne alimentaire, ces oiseaux marins sont d'excellentes espèces sentinelles pour mesurer l'impact de ce polluant dans les écosystèmes marins. Plus précisément, nous avons mesuré les signatures isotopiques du mercure dans ces œufs et remarqué qu'elles présentaient des variations géographiques significatives. Les variations des signatures isotopiques de la plupart des éléments chimiques (carbone, azote...) sont principalement fonction de leur différence en masse (^{12}C , ^{13}C). Étonnamment, les isotopes du mercure ne suivent pas la même « règle » : ses isotopes impairs (^{199}Hg , ^{201}Hg) se comportent différemment des isotopes pairs (^{198}Hg , ^{200}Hg , etc.). Cette singularité est un phénomène peu observé sur Terre. Pour le mercure, cette anomalie semble étroitement corrélée à la couverture de glace autour des sites de ponte des colonies de guillemots. Connaissant le rôle important joué par la lumière dans la photodégradation du méthyle-mercure, nous avons établi les quantités de cette toxine pouvant être détruites par les rayons du soleil tant en présence qu'en l'absence de banquise. Les résultats suggèrent que le climat joue un rôle essentiel dans le cycle du mercure.

Résultats majeurs

MERCY a permis de compléter le projet MERSAM de l'API 2007-2008 qui porte sur le mercure dans la chaîne trophique arctique. L'équipe a mis en évidence que le changement climatique influencera le comportement des contaminants, tel le mercure, dans notre environnement. A un niveau plus fondamental, les résultats montrent que les signatures isotopiques du mercure sont des indicateurs puissants des transferts de cette toxine à la surface de la Terre. Le projet a conduit au financement du projet « MERCURY ISOTOPES » de l'ERC, qui équilibre nos recherches Arctiques avec des volets sur le mercure en Chine et à l'Observatoire du Pic du Midi.

Production scientifique et brevets

Carignan J., Sonke J.E., 2010. The Effect of atmospheric mercury depletion events on the net deposition flux around Hudson Bay, Canada. *Atmos. Environ.*, 44 : 4372-4379.
Point D., *et al.*, 2011. Methylmercury photodegradation influenced by sea ice cover in Arctic marine ecosystems. *Nature Geoscience* 4 : 188-194.
Sonke J.E., 2011. A global Hg isotope box-model for mass-independent Hg isotope fractionation. *Geochimica and Cosmochimica Acta* 75 : 4577-4590.

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2006

IMPACT-BOREAL

Quel est le rôle des zones humides boréales dans le changement climatique au 21^{ème} siècle?

Quantification de l'impact du changement climatique sur l'évolution des zones humides boréales et le méthane associé

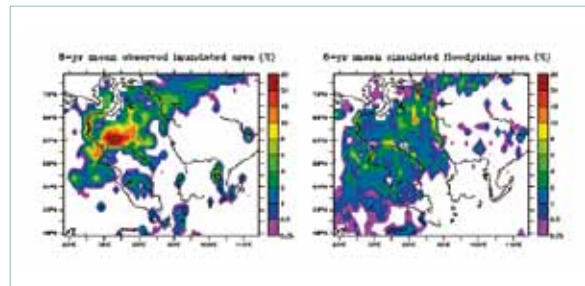
Il est attendu que le changement climatique affecte tout particulièrement les zones boréales, avec des répercussions importantes sur les cycles hydrologiques et biogéochimiques. Les zones marécageuses boréales sont une source importante de méthane (CH_4) atmosphérique (~ 25 % des émissions totales naturelles et anthropiques), un puissant gaz à effet de serre qui a contribué à ~ 20 % du réchauffement au cours du siècle dernier. Ces zones humides ont probablement déjà joué un rôle clé dans les variations naturelles du méthane au cours des derniers cycles climatiques. L'objectif du projet IMPACT-BOREAL est donc d'améliorer les modèles hydrologiques et biogéochimiques, pour quantifier l'impact du changement climatique sur la distribution des zones inondées et la production de CH_4 associée.

Développement de paramétrisations des zones inondées et des émissions de méthane dans les modèles et leur évaluation par les observations

La méthode consiste tout d'abord à développer de nouvelles paramétrisations dans les modèles de surface ISBA et ORCHIDEE. Un modèle de routage a été couplé au modèle hydrologique, entre autre pour simuler l'évolution des zones inondées. La production et l'oxydation du méthane dans les zones marécageuses, ainsi que son transport vers l'atmosphère sont modélisées. Les variations annuelles et inter-annuelles des paramètres hydrologiques sont en parallèle estimées à partir d'observations multi-satellitaires. Une climatologie de la distribution des étendues inondées et de leur saisonnalité est établie et évaluée, sur les 15 dernières années. Ces cartes sont confrontées à des simulations hydrologiques forcées par des flux atmosphériques combinant observations et prévisions météorologiques à courte échéance. Les flux de CH_4 sont évalués par rapport aux inversions des mesures atmosphériques issues des réseaux d'observation. Par ailleurs, de nouvelles données sont acquises sur l'évolution de CH_4 durant les variations rapides de la dernière glaciation, grâce à un dispositif mis au point au cours de ce projet. Elles seront comparées à de nouvelles simulations des zones marécageuses et leurs émissions de CH_4 sur ces mêmes événements.

Résultats majeurs

Les zones inondées ont été simulées par les modèles de surface et comparées aux observations satellitaires et *in situ*. La comparaison des tendances annuelles des débits observés et simulés montre que les tendances observées à l'échelle du globe sont en grande partie expliquées par les fleuves boréaux. Par ailleurs, les flux de méthane ont été modélisés sur les dernières années et comparés aux inversions atmosphériques. Des simulations des émissions de méthane issues des zones humides et de la fonte des pergélisols sont en cours pour le 21^{ème} siècle. En parallèle, un nouveau spectromètre a été mis au point pour l'analyse du CH_4 avec une précision de 0,04 % encore jamais atteinte au monde et ouvrant des perspectives commerciales par la prise d'un brevet.



Comparaison sur l'ouest de la Sibérie entre les surfaces inondées vues par satellite (gauche) et celles simulées à 1° de résolution par le modèle hydrologique ISBA (droite). Les étendues sont données en pourcentage et les moyennes sont établies sur la période 1993-2000.

IMPACT-BOREAL « IMPACT of climate on hydrology and methane on production in anaerobic soils in BOREAL regions » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LERMA (Laboratoire d'Etude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique). Il associe le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement), le LGGE (Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement), le GAME (Groupe d'étude de l'Atmosphère Météorologique, Météo-France) et le LEGOS (Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales). Le projet a débuté en janvier 2007 pour une durée de 42 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 332 k€ pour un coût global de 2,15 M€.

Production scientifique et brevets

Parmi les 15 publications dans des revues internationales à comité de lecture, citons :

- Alkama R., *et al.*, 2010. Global evaluation of the ISBA-TRIP continental hydrologic system. Part I: A twofold constraint using GRACE terrestrial water storage estimates and *in situ* river discharges. *J. of Hydromet.*, 11: 583-600.
- Biancamaria S., *et al.*, 2009. Large-scale coupled hydrologic and hydraulic modelling of the Ob river in Siberia. *J. of Hydrol.*, 379 : 136-150.
- Koven C., *et al.*, 2009. On the formation of high latitude soil carbon stocks: effects of cryoperturbation and insulation by organic matter in a land surface model. *Geophys. Res. Lett.*, 36 L21501, doi : 10.1029/3009GL04150.
- Papa F., *et al.*, 2010. Interannual variability of surface water extent at the global scale. *J. Geophys. Res.*, 115 D12111, doi : 10.1029/2009J,doi : 12674.JGR.
- Ringeval B., *et al.*, 2010a. An attempt to quantify the impact of changes in wetland extent on methane emissions on the seasonal and interannual time scales. *Global Biogeochem. Cycles* 24 GB2003, doi : 10.1029/2008GB003354.

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2007

CLIMAFLU

Impact du réchauffement climatique récent sur la dynamique fluviale de la Lena en Sibérie

Variabilité temporelle hydrologique et géomorphologique des débâcles de la Lena (Yakoutie Centrale)

La Yakoutie Centrale (Sibérie) comporte un pergélisol (sol gelé permanent) particulièrement sensible aux variations climatiques. Ce pergélisol a une température moyenne de -7°C et une profondeur maximale de 1500 m. Depuis la fin des années 1980, ce sol gelé subit un réchauffement de près de $1,5^{\circ}\text{C}$, accompagné d'un approfondissement de la couche active. L'objectif du projet CLIMAFLU concerne une étude de l'influence du réchauffement climatique sur les conditions de déclenchement des crues de débâcle du fleuve Léna et de leur variabilité temporelle en fonction des paramètres climatiques et hydrologiques. Les interactions entre la dynamique fluviale et le pergélisol entraînent des risques lourds pour les populations yakoutes. Ainsi, en 2002, une débâcle catastrophique liée à un printemps précoce suite à un hiver rigoureux a détruit une partie de la ville de Yakoutsk (ville regroupant près de 300 000 habitants) et de son port.

Suivi annuel de l'érosion des îles gelées de la Lena

Les îles en amont de Yakoutsk sont composées pour la plupart d'un pergélisol. Lors des débâcles de printemps, elles sont régulièrement inondées et subissent les coups de butoirs des radeaux de glace. Des campagnes de terrain régulières en Yakoutie permettent d'observer et d'échantillonner les îles de la Lena qui subissent de façon saisonnière un processus actif d'érosion thermique et mécanique lors des débâcles. Nous avons dû mettre au point des centrales de mesures, capables de résister à ces débâcles, pour enregistrer les variations du profil thermique du sous-sol gelé. D'autres capteurs permettent d'estimer la hauteur et la durée de submersion. La variabilité des taux d'érosion et de sédimentation a été étudiée sur un pas de temps annuel à l'aide de relevés de terrain au théodolite laser. Au printemps, des moyens optiques sont utilisés pour observer et quantifier à distance l'érosion des berges gelées des îles de la Lena.

Résultats majeurs

Le projet a mis en évidence l'impact du réchauffement climatique sur la dynamique fluviale de la Lena. L'augmentation de la température de l'eau de la rivière semble exercer un accroissement des taux d'érosion de ses îles. La Lena présente aussi une forte variabilité du régime de débâcle d'une année à l'autre. Lors de la débâcle du printemps de 2010, la propagation de l'onde de crue déclencha une augmentation brutale du débit (plus de 50 000 m^3/s) et du niveau de l'eau (élévation de 8 à 10 m par rapport au niveau des basses eaux hivernales). Les îles gelées ont subi une érosion frontale et un recul des berges de 40 m en l'espace de quelques jours. L'année suivante, la débâcle resta relativement modeste, sans causer de réels impacts sur les taux d'érosion. Nous prévoyons de pérenniser ces sites instrumentés dans le cadre du partenariat avec le Permafrost Institute à Yakoutsk.



La carapace de glace sur la Lena, en se déplaçant, provoque d'épaisses accumulations de glace au front des îles. L'érosion peut atteindre 40 m en l'espace de quelques jours ! Images prises à 7 jours d'intervalle (Photo F. Costard).

CLIMAFLU « CLIMAtic change and FLUvial dynamic of the Lena river, Siberia » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le Laboratoire IDES (Interactions et Dynamique des Environnements de Surface). Il associe le LGP (Laboratoire de Géographie Physique, Meudon) et le Permafrost Institut, Yakoutsk, Russie. Le projet a débuté en janvier 2008 pour une durée de 48 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 179 k€ pour un coût global de 500 k€.

Production scientifique et brevets

Citons notamment :

Costard F., Gautier E., Brunstein D., Hammadi J., Fedorov A., Yang, D., Dupeyrat L., 2007. Impact of the global warming on the fluvial thermal erosion over the Lena river in Central Siberia. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (14): Art. No. L14501 JUL.
Dupeyrat L., Costard F., Randriamazaoro R., Gailhardis E., Gautier E., Fedorov A., 2011. Effects of ice content on thermal erosion of permafrost : Implications for coastal and fluvial erosion. *Permafrost and Periglacial Proc.*, Vol. 22 (2): 179-187, doi: 10.1002/ppp.722.
Costard F., Gautier E., 2007. The Lena River: main hydromorphodynamic features in a deep permafrost zone. In *Large rivers: Geomorphology and Management*, Gupta A. (ed.). John Wiley & Sons : 225-232.
Gautier E., Fedorov A., Costard F., Brunstein D., 2011. Impact du changement climatique sur la dynamique d'un grand fleuve arctique russe, la Lena en Sibérie centrale. In *Le changement climatique. Quatrièmes Dialogues Européens d'Evian*. Ed. EURCASIA: 65-73.

3

LES APPROCHES PHYSIQUES, CHIMIQUES, BIOLOGIQUES ET SOCIÉTALES DES MILIEUX OCÉANIQUES ET CÔTIERS

LES PRINCIPALES AVANCÉES

Les projets de recherche se répartissent à parts sensiblement égales entre les études relatives aux domaines océaniques et côtiers. Ils s'appuient sur des campagnes océanographiques, des expérimentations *in situ* et/ou en milieu contrôlé de laboratoire et des modélisations physiques biogéochimiques et biologiques destinées à mieux comprendre le fonctionnement multi-échelle de ces systèmes complexes et de leur interface. Des développements métrologiques et méthodologiques innovants sont proposés. Plusieurs projets, dont certains menés dans le cadre d'un partenariat public-privé, concernent les aspects socio-économiques et environnementaux des changements climatiques et anthropiques, incluant des stratégies possibles d'adaptation.

Observer la dynamique et les processus biogéochimiques dans l'Océan

Le besoin d'observations complémentaires aux données satellitaires est primordial pour l'étude de l'Océan. Plusieurs grandes campagnes en mer visant à une description la plus complète possible des courants et du cycle du carbone de provinces océaniques importantes pour le climat ont été montées

dans l'Océan Austral, qui reste encore mal connu, dans l'Atlantique Nord en lien avec les changements en cours dans la région Arctique, dans la Mer de Salomon qui contrôle en partie le phénomène El-Niño et dans le Golfe de Gascogne pour l'étude intensive des courants.

Ce besoin d'observations complémentaires passe bien sûr aussi par le développement de nouveaux moyens métrologiques qui permettent de mesurer de nouveaux paramètres sans nécessiter la mise en place de campagnes en mer sur des navires de recherche coûteux.

Ainsi, des petits capteurs ont été développés spécialement pour être installés sur des éléphants de mer dont les déplacements au sein de leurs zones de pêche dans l'Océan Austral permettent une cartographie complète de l'intérieur (les plongées peuvent atteindre plusieurs centaines de mètres) de cette région mal connue.

Un flotteur instrumenté original a été développé pour observer en permanence l'évolution de l'épaisseur de la banquise, un des paramètres les plus sensibles de l'influence du réchauffement climatique dans l'Arctique, et les paramètres physiques qui contrôlent les échanges thermiques à l'origine de cette évolution. Ce flotteur est pris dans la glace au moment de la formation de la banquise et reste piégé et opérationnel pendant toute la durée de vie de la banquise, y compris au moment de la débâcle.

Une flotille de « gliders », équivalents à des planeurs sous-marins, dotés d'une autonomie importante leur permettant d'explorer toutes les profondeurs au rythme des courants qui les portent, a été déployée en Méditerranée.

En complément de ces projets visant à apporter des données inaccessibles aux satellites, la ré-analyse de longues séries de données satellitaires (depuis la fin des années 70) a été mise en œuvre, en utilisant les méthodes de traitement les plus récentes, pour mettre en évidence le changement de la répartition globale du phytoplancton dans l'Océan depuis 30 ans.

Focaliser les études sur des régions primordiales ou mal connues

Les campagnes à la mer permettent d'explorer et d'améliorer notre connaissance de certaines régions de l'Océan encore mal connues et pourtant importantes vis-à-vis du climat comme l'Océan Austral, l'Arctique ou encore la Méditerranée qui fait l'objet depuis quelques années de nombreuses études, notamment dans le cadre du programme MISTRALS co-animé par le CNRS-INSU et l'IRD.

La Méditerranée est une mer particulièrement intéressante à plusieurs égards : elle est facilement accessible pour les chercheurs français et sa circulation est souvent considérée comme un modèle réduit de la circulation océanique mondiale, ce qui la rend particulièrement intéressante. De plus, la Méditerranée présente des spécificités biogéochimiques qui font l'objet de recherches de pointe.

Les études ont porté sur le rôle des apports atmosphériques de minéraux tels que le fer (via les tempêtes de sable soulevé dans les déserts du nord de l'Afrique) sur la biogéochimie des eaux de surface, en particulier la croissance du phytoplancton et sur une meilleure compréhension, à l'aide d'une ap-

proche dite « moléculaire », de l'adaptation du phytoplancton aux contraintes environnementales particulières liées au cycle du fer en Méditerranée.

Modéliser la dynamique et la biogéochimie de l'Océan à haute résolution

Un des défis actuels de la modélisation de l'Océan porte à la fois sur la représentation de la circulation à des échelles de l'ordre du km et sur la prise en compte du couplage entre la dynamique de l'Océan et le vivant (phytoplancton, poissons,...) pour mieux contraindre le cycle du carbone. Plusieurs études concernent la simulation numérique à haute résolution de la circulation dans l'Océan. A ces échelles d'espace, la turbulence, un phénomène complexe à inclure dans les modèles numériques, joue un rôle prépondérant et des travaux alliant théorie de la mécanique des fluides et observations spécifiques sont nécessaires pour assurer la qualité des simulations numériques. Ces aspects ont été abordés dans le cadre de plusieurs projets.

L'étude de l'impact du changement climatique et de la pêche sur l'ensemble de la chaîne trophique marine a été développée en couplant un modèle de circulation océanique à un modèle de croissance du phytoplancton, lui-même couplé à un modèle de développement des niveaux trophiques supérieurs (poissons de différentes tailles).

Une modélisation similaire mais simplifiée (sans les niveaux trophiques supérieurs) a par ailleurs été utilisée pour comprendre le rôle joué par la biogéochimie marine, au travers de son rôle dans le cycle du carbone, sur l'évolution du climat depuis la dernière glaciation, il y a environ 20 000 ans.

Proposer des solutions aux questions socio-économiques mondiales

Au-delà des questions de recherche fondamentale, l'étude de l'Océan a aussi des applications qui concernent plus directement nos sociétés. Plusieurs projets visent à fournir des éléments de réponse à cette problématique telles que l'étude de l'impact du changement climatique en cours sur les réserves halieutiques et les pêches ou les observations systématiques et intensives de la circulation marine dans le Golfe de Gascogne qui ont pour objectif d'améliorer et de valider les modèles d'océanographie opérationnelle utilisés pour la pêche ou pour les applications militaires.

Hormis pour les espèces hauturières telles que le thon, les problématiques liées à l'évolution des ressources halieutiques sont essentiellement côtières puisque ce sont dans ces régions que se font la plus grande partie des pêches. Les études se sont focalisées sur l'upwelling Pérou-Chili, l'une des régions les plus productives du monde mais aussi l'une des plus sensibles aux variations climatiques (El Niño en particulier). La mise au point de modèles à haute résolution couplant la dynamique et la biogéochimie est particulièrement importante dans cette région pour anticiper l'impact du changement climatique sur des ressources halieutiques cruciales pour les pays limitrophes et pour toute l'Amérique du Sud.

Comprendre et quantifier les échanges terre-mer sous contrainte anthropique et climatique

L'étude des apports d'éléments chimiques vers le milieu côtier et leur devenir dans la zone côtière est un préalable à la compréhension de la productivité et des impacts sur la ressource halieutique. Plusieurs types de projets se sont mis en place notamment sous l'impulsion du programme « Vulnérabilité des Milieux, Climat et Sociétés ». La particularité de ces projets par rapport aux projets précédents tient dans leur intégration du domaine fluvial au domaine maritime et sur le degré de cohérence dans les compartiments marins étudiés, du panache fluvial en surface aux sédiments. Les recherches menées ont eu pour but d'identifier les modes de transfert d'éléments chimiques, minéraux ou organiques depuis les continents et les bassins fluviaux vers les mers côtières, ainsi que leur devenir sur le plateau continental.

Les études de processus et l'établissement de bilans ont prévalu dans ces projets qui se sont répartis autour du globe (Amazone, Fleuve Rouge, Iles des Océans Pacifique et Indien, Rhône, etc.). Plusieurs résultats marquants ont été obtenus, comme par exemple la mise en évidence, dans un fleuve comme le Rhône, de l'importance des apports de crues représentant 4/5 des apports totaux à la mer qui impliquent des processus très particuliers de préservation/recyclage lors de ces dépôts massifs. Un autre constat majeur a été fait pour l'Asie et le Fleuve Rouge concernant la nature des apports organiques au bassin versant qui montre que les apports liés à l'érosion naturelle accrue par l'utilisation des sols étaient du même ordre de grandeur que celle des effluents domestiques (villes et industries).

Comprendre le fonctionnement des écosystèmes côtiers et l'évolution de la ressource halieutique

Les écosystèmes côtiers vivant sous des contraintes humaines et climatiques, il est essentiel de comprendre les mécanismes qui régissent leur fonctionnement, de documenter les seuils de stress qui limitent leur viabilité (contamination, hypoxie), et de comprendre les liens des écosystèmes avec leur environnement extérieur.

Plusieurs projets considèrent l'impact des contaminants organiques et inorganiques sur le développement et la préservation de la ressource halieutique, montrant au laboratoire et dans le milieu naturel diverses atteintes des fonctions fondamentales des poissons dans les estuaires et les zones côtières. L'utilisation d'archives naturelles de l'environnement telles que les bivalves a permis de dresser l'historique récent des conditions de vie de la ressource dans le milieu côtier par la compréhension des modes d'enregistrement *in situ* du signal environnemental dans ces archives. Dans des classes de taille microscopique (plancton et bactéries), la croissance des organismes est fortement contrôlée par les virus dont la dynamique est largement ignorée dans la plupart des modèles. Les nouveaux modèles mis au point dans le cadre de ces projets devraient permettre de mieux rendre compte de ces contrôles par les virus.

Des études de stress conjoint sur des populations de poisson soumis à l'hypoxie, aux contaminants et au réchauffement des eaux ont été menées dans des conditions contrôlées et *in situ*. Ces études ont montré que la conjugaison de contraintes climatiques avec

la contamination, voire l'hypoxie, menait à l'affaiblissement de la résilience des populations, ce qui pose des questions sur les évolutions à moyen terme des populations exploitables de poissons dans les eaux côtières.

Evaluer les risques liés à l'évolution du trait de côte

Dans les contraintes climatiques actuelles d'élévation du niveau des mers et compte tenu de l'augmentation prévue de la population en zone côtière, l'évolution du trait de côte et la vulnérabilité des terres qu'il délimite fait partie des enjeux majeurs. La connaissance préalable des processus de dépôt et d'érosion a permis l'élaboration de modèles de fonctionnement dans des contextes de plage sableuse ou de côte mixtes. Ces modèles ont pu être comparés aux données des 50 dernières années et prolongés jusqu'à 2100 dans le contexte d'évolution des niveaux marins. Ces études ont également envisagé l'action des tempêtes, de marée ou de surcôte sur les risques de submersion des terres. Ces recherches démontrent que, parmi tous les mécanismes érosifs, les processus de houle sont le principal agent d'érosion, et que la capacité des côtes à capter les apports de sédiments sera le premier critère de maintien du trait de côte.

La perception sociétale des effets de ces modifications de trait de côte a été étudiée afin d'inscrire les projets de solution dans un processus d'élaboration conjointe avec les parties prenantes. Concernant les sociétés littorales et les risques d'érosion/submersion associés, une confrontation entre perception sociétale et données objectives a été organisée afin d'essayer de rapprocher le point de vue humain sur le climat de la dimension scientifique de son évolution passée et future.

Les approches physiques, chimiques, biologiques et sociétales des milieux océaniques et côtiers

Acronyme et nom du projet		Le projet en un titre
BONUS-GOODHOPE	Etude et suivi des échanges indo-austral-atlantiques dans l'Océan Austral du sud de l'Afrique	L'Océan Austral au cœur de notre climat
PROMI	PROfesseur océanique de Microstructure pour quantifier le mélange des masses d'eau dans les régimes dynamiques variés	Distribution du mélange des masses d'eau dans l'Océan Atlantique Nord
SOLWARA	Alimentation des eaux équatoriales par la mer des Salomon : impacts climatiques et biogéochimiques	La mer des Salomon : lieu de concentration des signaux climatiques et biogéochimiques
EPIGRAM	Etudes Physiques Intégrées en Gascogne et Région Atlantique-Manche	Prévoir la dynamique océanique côtière
IPSOS-SEAL	Investigation of the vulnerability of the productivity of the Southern Ocean Subsystems to climate change: the Southern Elephant seal assessment from mid to high latitudes	Un flotteur autonome pour une observation en temps réel de la banquise
OPTIMISM	Observing dynamical and thermodynamical Processes impacting The sea Ice Mass balance from In Situ Measurements	Un flotteur autonome pour une observation en temps réel de la banquise
LIVINGSTONE	Etude des échanges côte-large et de leur variabilité par l'intermédiaire d'un réseau de planeurs sous-marins (gliders) : application au Golfe du Lion	Les "Gliders" à la découverte des fonds sous-marins
GLOPHY	Analysis of decadal changes in the global ocean phytoplankton through the synergetic use of satellite data and 1-and 3-dimensional models	Les changements décennaux du phytoplancton dans l'Océan mondial
DUNE	a DUsT experiment in a low Nutrient, low chlorophyll Ecosystem	Les poussières du Sahara : plus qu'un "fertiliseur" pour la Méditerranée
BACCIO	Biomolecular Approach of the Cycling of Carbon and Iron in the Ocean	Une vision biomoléculaire des cycles biogéochimiques dans l'Océan
BOA	Biogéochimie du fer à l'interface Océan-Atmosphère : interactions entre apports atmosphériques de fer et réseau trophique	L'importance du couplage océan-atmosphère dans le cycle biogéochimique du fer
REDHOTS	REconstruction de la Dynamique Haute résolution Océanique Tridimensionnelle des couches Supérieures	Reconstituer la dynamique interne de l'Océan depuis l'Espace
SouthernCross	Southern Ocean and Cross-scale interactions	Un microscope pour comprendre les perturbations du système océanique global
MACROES	Macroscopic for Oceanic Earth System	Un microscope pour comprendre les perturbations du système océanique global
GOBAC	Glacial Ocean Biosphere Atmosphere Carbon Climate Coupling	Interactions entre climat et cycle du carbone dans un monde glaciaire

Les approches physiques, chimiques, biologiques et sociétales des milieux océaniques et côtiers

Acronyme et nom du projet		Le projet en un titre
PCCC	Peru Chile Climate Change	Changement climatique dans le système de Humboldt
PEPS	Peru Ecosystem Projection Scenarios	Quel impact du changement climatique sur les ressources halieutiques du Pacifique Sud-Est ?
AMANDES	AMAZone-aNDES: weathering and transport of elements at the crucial land-sea interface	Les flux d'éléments chimiques entre continent et océan : un challenge pluridisciplinaire
CECILE	Coastal Environmental Changes: Impact of sea Level rise	L'érosion côtière et les variations du niveau marin
INTERFACE	Suivi de la lentille d'eau douce comme indicateur de la vulnérabilité des systèmes insulaires récifaux	Les îlots récifaux, indicateurs de la vulnérabilité au changement climatique
DAY RIVER	Influence des rejets urbains et agricoles sur l'eutrophisation dans la zone deltaïque du Fleuve Rouge, Vietnam	Impact de l'urbanisation et des pratiques agricoles sur la dégradation du delta du Fleuve Rouge
CHACCRA	Climate and Human-induced Alterations in Carbon Cycling at the River-sea connection	Influence humaine et climatique sur le devenir des apports fluviaux en Méditerranée
VULSACO	VULnerability of SANDy COast to climate change and anthropic pressure	Vulnérabilité des plages sableuses face aux changements globaux
MISEEVA	Marine Inundation hazard exposure and Social, Economic and Environmental Vulnerability Assessment in regard to global change	Conséquences des submersions marines liées au changement climatique selon les stratégies d'adaptation
ADAPTALITT	Capacités d'adaptation des sociétés littorales aux risques d'érosion, de submersion en prise avec les changements climatiques	Une contribution du croisement aléas / perception aux analyses de vulnérabilité
VASIREMI	Trophic significance of microbial biofilms in tidal flats	Le biofilm des vasières intertidales : construction, production et devenir dans l'écosystème
CHIVAS	Chimie des valves de la coquille Saint-Jacques européenne, archives multiproxies de la dynamique phytoplanctonique	La coquille Saint-Jacques archive chaque jour les variations de son environnement
EEL-SCOPE	Eco-toxicological and Economical Liability of eel exposed to Seasonal and global Change-induced O ₂ -depletion and Pollution in Estuaries	Impact du changement global sur la qualité des eaux et les organismes estuariens
SolBEMol-pop	Sole Bioaccumulation Ecotoxicologie et Modélisation des POP	Devenir et effets des contaminants organiques persistants dans un poisson marin : la sole
EVOLFISH	Effects of global warming and local contamination on evolutionary response of two coastal fishes	Réchauffement climatique et stress anthropiques : impacts sur les poissons marins

Programme « Blanc », édition 2007

BONUS-GOODHOPE

L'Océan Austral au cœur de notre climat

Une initiative française, maillon essentiel d'un effort international sans précédents

Les Océans jouent un rôle fondamental et complexe dans la régulation du climat terrestre. Leur efficacité est fortement dépendante de la nature des échanges d'eau entre les bassins océaniques. Du fait de sa forme annulaire, l'Océan Austral constitue la seule voie d'intercommunication entre les différents Océans. Il permet aux eaux de circuler entre deux bassins tout en les exposant à des conditions climatiques extrêmes. Ce qui génère de très importants échanges de chaleur, d'eau douce, de CO₂ et d'autres éléments chimiques entre l'eau et l'air. Ces paramètres ont un impact sur la circulation océanique à l'échelle globale, sur les échanges air-mer et sur les écosystèmes marins et de ce fait, sur la stabilité de notre climat. Jusqu'ici, cet Océan a été peu étudié, du fait de son éloignement et de ses conditions climatiques. Il est devenu le centre d'intérêt de la campagne BONUS- GoodHope, lancée en 2007 lors de API 2007-2008.

Le climat et les écosystèmes de l'Océan Austral gouvernés par des processus de fine échelle

Dédié à mieux comprendre les échanges et la ventilation des masses d'eau, moteurs de la circulation océanique globale, ainsi que les cycles biogéochimiques dans l'Océan Austral, le projet a réuni des physiciens, des biogéochimistes et des modélisateurs autour du couplage de la dynamique océanique avec la biogéochimie dans la colonne d'eau, l'atmosphère, le sédiment, et l'étude des éléments-trace et des traceurs isotopiques des sources lithogéniques, de la circulation et la ventilation des masses d'eau, de processus biogéochimiques, et qui permettent également de quantifier les flux particuliers exportés de la surface vers les eaux profondes. Les paramètres nécessaires à ces études multidisciplinaires ont été recueillis dans le cadre de la campagne océanographique BONUS-GoodHope qui a eu lieu du 4 février au 24 mars 2008 entre le Cap, 57° 33'S dans l'Océan Austral sur le Méridien de Greenwich et Durban. L'utilisation de la simulation numérique a permis d'intégrer toutes ces données et de construire une image de cet environnement. La campagne BONUS-GoodHope constitue une première par la quantité de paramètres chimiques, biologiques et physiques qui ont été acquis simultanément dans l'Océan Austral.

Résultats majeurs

Les données multidisciplinaires récoltées pendant la campagne montrent que la structuration des processus océaniques qui gouvernent la dynamique de l'Océan Austral et ses interactions aux interfaces s'organisait autour de la petite échelle océanique (tourbillons, jets, filaments, courants de pente). Cette dynamique fortement non-linéaire gouverne la distribution et l'amplitude des échanges air-mer ainsi que les transferts de masse, de chaleur, d'eau douce et des propriétés biogéochimiques à travers les différents secteurs océaniques. En particulier, le rôle capital des tourbillons dans la séquestration du carbone et d'autres éléments biogéochimiques de la surface océanique vers l'intérieur de l'Océan a été documenté et modélisé.



La campagne BONUS-GoodHope a été sans doute la plus complète jamais réalisée à ce jour. Pendant presque deux mois, une moisson de données dans l'eau et dans l'atmosphère a été collectée en mettant en œuvre une large panoplie d'instruments de mesure dont quelques exemples sont présentés ci-dessus.

BONUS-GOODHOPE « Etude et suivi des échanges indo-atlantiques dans l'Océan Austral au sud de l'Afrique » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LPO (Laboratoire de Physique des Océans). Il fédère environ 27 laboratoires (dont 14 français) et Instituts étrangers. Il a rassemblé plus d'une centaine de scientifiques issus de différents domaines scientifiques. Le projet a débuté en novembre 2007 pour une durée de 36 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 700 k€ pour un coût global de 4 M€, grâce notamment au soutien logistique apporté par l'IPEV.

Production scientifique et brevets

Parmi plus de 40 publications dans des revues à comité de lecture, citons notamment:

Swart S., Speich S., 2010. A satellite altimetry based Gravest Empirical Mode South of Africa. Part

II: 1992-2008 Heat, Salt and Mass Transport variability and changes. J. Geophys. Res., 115, C03003, doi:10.1029/2009JC005300.

González-Dávila M., *et al.*, 2011. Carbonate system in the water masses of the Southeast Atlantic sector of the Southern Ocean during February and March 2008. Biogeosciences 8: 1401-1413, doi:10.5194/bg-8-1401-2011.

Bown J., *et al.*, 2011. The biogeochemical cycle of dissolved cobalt in the Atlantic and the Southern Oceans south off the coast of South Africa. Marine Chemistry, doi:10.1016/j.marchem.2011.03.008.

Sarthou G., *et al.*, 2011. Labile Fe(II) concentrations in the Atlantic sector of the Southern Ocean along a transect from the subtropical domain to the Weddell Sea Gyre. Biogeosciences 8: 2461-2479.

Joubert W., *et al.*, 2011. Nitrogen uptake by phytoplankton in the Atlantic sector of the Southern Ocean during late austral summer. Biogeosciences 8: 2947-2959.

Programme « Jeunes Chercheurs, Jeunes Chercheuses », édition 2005

PROMI

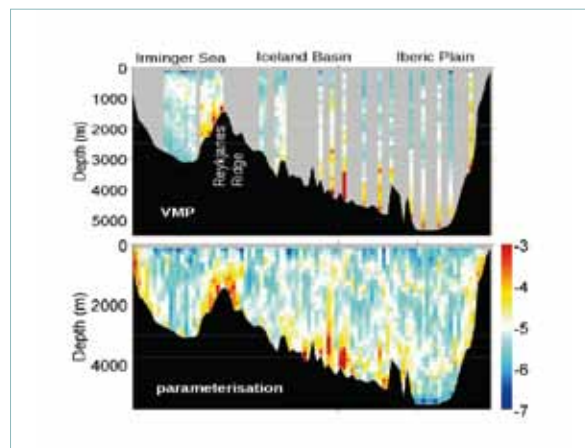
Distribution du mélange des masses d'eau dans l'Océan Atlantique Nord

Sur l'importance d'observer et de comprendre la distribution du mélange de très fine échelle dans les Océans

Le mélange des eaux de propriétés différentes induit par la turbulence affecte directement la circulation océanique, la distribution des masses d'eau sur le globe, mais aussi le développement de la biologie marine. La représentation des effets de la turbulence influence nettement la circulation tridimensionnelle des modèles océaniques. La complexité de la distribution spatiale de la turbulence aux très fines échelles reflète celle des mécanismes générateurs associés à des dynamiques variées. Le caractère intermittent et les échelles spatiales mises en jeu allant du centimètre (la micro-structure) au mètre rendent particulièrement difficile son observation. Le projet PROMI est fondé sur l'observation directe de ces fines échelles associées au mélange par l'utilisation d'un instrument approprié. Le but est d'obtenir une cartographie plus précise de la turbulence, de mettre en évidence les régions où celle-ci est intensifiée et de relier cette intensification aux mécanismes dynamiques sous-jacents. Dans cette optique, les mesures permettent de tester les paramétrisations déjà existantes et de proposer éventuellement des améliorations qui pourront être incorporées in fine aux modèles océaniques.

Observer l'Océan à l'échelle du centimètre !

L'observation de certains paramètres océaniques à ces très fines échelles a débuté dans les années 1970 grâce à des instruments prototypes et peu nombreux. Le projet PROMI a permis d'acquérir un nouveau profileur VMP (Vertical Microstructure Profiler) développé au début des années 2000. Cet instrument autonome mesure, à l'échelle du centimètre, les fluctuations verticales de température, de conductivité et de vitesse de la surface de l'Océan jusqu'à 6000 m de profondeur. Le profileur de microstructure, déployé en surface depuis un navire en position fixe, effectue un aller-retour vers les abysses à une vitesse moyenne de 0.7 m/s avant d'être récupéré à bord. Livré au printemps 2008, il a été embarqué pour la première fois sur la campagne océanographique « OVIDE 2008 ». Celle-ci consiste en une radiale d'environ 90 stations d'hydrologie « classique » réparties entre le Portugal et le Cap Farewell au sud du Groenland. Pour 30 de ces stations, nous avons déployé en parallèle le VMP. L'intensité de la turbulence est alors quantifiée à partir de ces 30 profils surface-fond de fluctuations des vitesses desquels on déduit la dissipation d'énergie cinétique et le coefficient de diffusivité.



Diffusivité (échelle logarithmique) mesurée par le VMP (en haut) et estimée à partir d'une paramétrisation fondée sur les ondes internes (en bas).

PROMI « PROfileur océanique de Microstructure pour quantifier le mélange des masses d'eau dans les régimes dynamiques variés » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LPO (Laboratoire de Physique des Océans). Il associe le LOCEAN (Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentations et Approches Numériques). Le projet a débuté en décembre 2005 pour une durée de 36 ans. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 150 k€ pour un coût total de 665 k€.

Résultats majeurs

Les profils VMP permettent d'identifier certaines caractéristiques importantes : une diffusivité généralement faible voisine de $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ dans la plaine abyssale ibérique et dans la plaine du bassin d'Irminger, caractéristique des zones à faible gradient topographique ; la diffusivité s'intensifie nettement sur le flanc nord de la dorsale de Reykjanes et dans le bassin d'Islande au voisinage de la topographie où les valeurs atteignent $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ à $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. La comparaison avec une paramétrisation (figure du bas) fondée sur l'interaction des ondes internes montre un accord dans un facteur 3 pour 90% des mesures VMP pour un paramètre variant typiquement sur 4 ordres de grandeur.

Production scientifique et brevets

Kokoszka F., 2012 : Estimations du mélange vertical le long de sections hydrologiques en Atlantique Nord. Doctorat de l'Université de Bretagne Occidentale, 191pp.

Programme « Blanc », édition 2009

SOLWARA

La mer des Salomon : lieu de concentration des signaux climatiques et biogéochimiques

Comment les propriétés des eaux équatoriales sont-elles fortement modifiées par leur passage dans la mer des Salomon ?

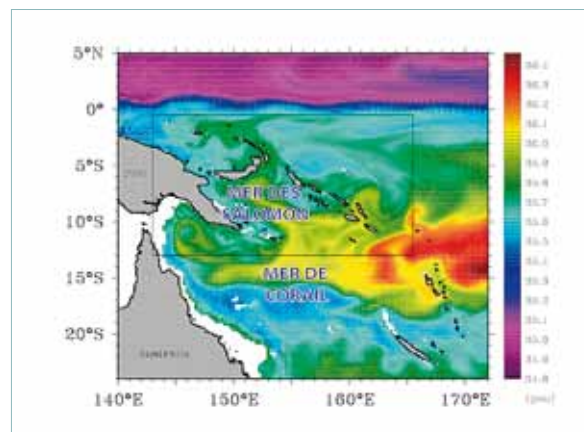
La circulation océanique du Pacifique Sud redistribue l'eau de la grande gyre subtropicale vers l'Equateur par un cheminement subtil, essentiellement suggéré par des résultats de modèles et les gradients méridiens d'éléments trace. Ces eaux sont d'abord transportées vers l'Ouest dans le Courant Equatorial Sud. Une partie atteint l'Equateur par une route relativement directe vers le nord-ouest. Une autre partie entre en Mer de Corail, longe la côte australienne vers le nord, et entre en Mer des Salomon avant de rejoindre l'Equateur. Ces eaux forment la source la plus importante du sous-courant équatorial qui alimente les eaux de surface du Pacifique central à l'Equateur. Ceci engendre des variations de température et salinité susceptibles d'influencer le cycle de l'oscillation ENSO (El Niño Southern Oscillation) à l'échelle décennale et ainsi engendrer des rétroactions climatiques à l'échelle du bassin. Cette circulation est également liée à un apport équatorial en éléments chimiques, nutritifs et métaux, aux propriétés de « fertilisants naturels » qui contrôlent par conséquent l'activité biologique de l'Equateur central-est, un élément déterminant du flux de CO₂ entre l'Océan et l'atmosphère. Cet apport est supposé résulter d'un échange continent/océan au niveau des marges océaniques, notamment en Mer des Salomon.

Simulations numériques à haute résolution et mesures hydrographiques

Les études de la circulation d'eau de thermocline en Mer de Corail ainsi que de leurs propriétés géochimiques en route vers l'Equateur pointent sur la Mer des Salomon comme une composante importante et quasi-inexplorée du système climatique et géochimique. Les caractéristiques océaniques de cette région ne sont pas correctement décrites par les observations ni convenablement représentées par les modèles, et plusieurs aspects clés restent inconnus. Les forts courants de bord, combinés avec la topographie compliquée et les détroits très étroits de la Mer des Salomon rendent les mesures satellitaires et la modélisation numérique difficiles, et la plupart du temps inaptes pour les échelles à considérer. Le projet SOLWARA combine un important volet de mesures, de suivi et de modélisation dans cette région pour améliorer la connaissance des flux entrants et sortants, des sources géochimiques et des transformations des masses d'eau cheminant vers l'Equateur. L'approche multidisciplinaire est fondée sur des simulations numériques océaniques à haute résolution et des mesures *in situ*, dont une campagne de mesures en 2012 à partir du navire océanographique l'Atalante (campagne PANDORA), focalisées sur les échanges côte/large d'éléments, d'isotopes et des cheminement et transformations des masses d'eau.

Résultats majeurs

L'analyse combinée produira une synthèse complète de cette région, de son rôle dans le système climatique, et de sa variabilité. Une description du transport de ces eaux et de l'évolution de toutes leurs propriétés depuis leur zone de subduction jusqu'à leur zone de résurgence fournira des informations pour améliorer notre compréhension



Salinité océanique à 110 m de profondeur à partir d'une simulation numérique. La résolution est de 10 km dans le rectangle entourant la Mer des Salomon et de 28 km ailleurs. La « flamme » horizontale montre l'intrusion d'eau de la thermocline fortement salée provenant du gyre subtropical, cheminant vers la Mer de Corail et finalement vers la Mer des Salomon (tiré de Melet *et al.*, 2010).

SOLWARA « Alimentation des eaux équatoriales par la mer des Salomon : impacts climatiques et biogéochimiques » est un projet de recherche fondamentale coordonné par l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement). Il associe le LEGOS (Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales), le LEGI (Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels) et trois collaborateurs américains et australiens : SIO (Scripps Institution of Oceanography), PMEL (Pacific Marine Environment Laboratory, NOAA) et CMAR (CSIRO Marine and Atmospheric Research). Le projet a débuté en septembre 2009 pour une durée de 48 mois. Il bénéficie d'un financement de l'ANR de 506 k€ pour un coût global de 6 M€, grâce notamment au soutien logistique de l'Ifremer. Il s'inscrit dans le contexte des programmes internationaux « CLIVAR/SPICE » (variabilité climatique) et GEOTRACES (géochimie globale de l'Océan).

de la modulation basse fréquence d'ENSO et de l'apport équatorial en éléments trace. À terme, cela conduira à améliorer cette partie océanique dans les modèles de climat et éventuellement, à concevoir un dispositif de mesure à longue échéance afin d'augmenter le réalisme des prévisions climatiques.

Production scientifique et brevets

Citons notamment :

- Melet A. *et al.*, 2010. J. Phys. Oceanography 40 : 1302-1319.
- Melet, A. *et al.*, 2010. Ocean Dynamics
- Melet, A. *et al.*, 2011. J. Phys. Oceanography 41 : 810-826.
- Cravatte S. *et al.*, 2011. Prog. Oceanography 88 : 116-130.
- Gasparin F. *et al.*, 2011. Deep Sea Res., part I : 58, 956-959.
- Grenier M. *et al.*, 2011. J. Geophys. Res., 116, doi:201110.1029/2011JC007477.

Programme « Blanc », édition 2008

EPIGRAM

Prévoir la dynamique océanique côtière

Comprendre et modéliser les phénomènes physiques majeurs qui régissent la dynamique océanique du plateau continental de la façade Atlantique française

Les régions côtières ont récemment mobilisé les recherches scientifiques en dynamique océanique, grâce au développement de l'océanographie opérationnelle côtière et au besoin de suivi en temps réel de cette région pour des raisons économiques, de sécurité, de santé publique ou militaires. Le but scientifique principal du projet est d'améliorer notre compréhension des processus dynamiques principaux de la plate-forme continentale et des marges dans les régions « Manche » et « Golfe de Gascogne », ainsi que la capacité des modèles numériques à représenter ces processus pour prévoir les évolutions de ce milieu. Les processus hydrodynamiques étudiés dans EPIGRAM vont de la haute fréquence (quelques heures) à la variabilité saisonnière (quelques mois).

Observer pour modéliser

L'un des retards scientifiques principaux est associé aux observations à la mer. Il n'existait en effet pas de campagnes à la mer « d'envergure » récente sur cette région, la plupart des données scientifiques ayant été obtenues au mieux au début des années 1990. C'est pourquoi, nous avons proposé la mise en place d'un programme d'observation de grande envergure des processus majeurs sur cette zone. Le projet est ainsi fondé sur : i) la réalisation de campagnes à la mer pour tous les processus régissant la dynamique de la zone « Manche-Gascogne », ii) l'analyse des observations pour l'amélioration de notre compréhension des processus physiques majeurs de la zone et iii) la mise en place de modèles numériques réalistes et leur évaluation sur la zone d'étude, par comparaison aux observations.



Déploiement du Seasoar (poisson remorqué permettant l'acquisition en continu de profils verticaux de température et de salinité) à bord du bâtiment hydro-océanographique « Beautemps-Beaupré » (campagne EPIGRAM/MOUTON 2009).

EPIGRAM « Etudes Physiques Intégrées en Gascogne et Région Atlantique-Manche » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LEGOS (Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales). Il associe 14 laboratoires rattachés au CNRS/INSU (Institut National des Sciences de l'Univers), au SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine), à l'Ifremer (Institut français pour la recherche et l'exploitation de la mer) et à Météo-France. Le projet a débuté en janvier 2009 pour une durée de 48 mois. Il bénéficie d'un financement de l'ANR de 490 k€ pour un coût global de 6,5 M€.

Résultats majeurs

Les résultats acquis sont importants pour la communauté scientifique océanographique en général: avec environ 200 jours d'observation à la mer, le projet apporte des informations sur une zone dont la physique est extrêmement riche. Les résultats permettent de plus la construction et l'amélioration de systèmes opérationnels en temps réel, en particulier dédiés à : i) la lutte contre les pollutions marines de diverses origines, ii) la dérive d'objets, iii) la prévision des surcotes littorales, iv) l'évaluation des capacités du milieu marin en matière d'énergie renouvelable (vagues, courants, énergie thermique de l'eau de mer, ...).

Production scientifique et brevets

Le projet EPIGRAM a, jusqu'à ce jour, conduit à la publication de 40 articles dans des revues scientifiques internationales.

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2007

IPSOS-SEAL

Les Eléphants de mer océanographes

Le manque de mesures *in situ* de concentration en phytoplancton

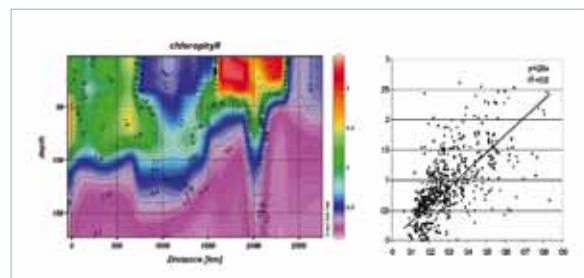
La productivité biologique de l'Océan Austral est largement contrôlée par des processus physiques d'une grande complexité. De gros efforts visent à modéliser ces processus afin de prévoir la réponse de cet océan aux changements climatiques. Pour cela, une bonne évaluation de la distribution et du niveau de production primaire est nécessaire. La mesure spatiale de la couleur de l'océan fournit une vision synoptique de la distribution de surface en chlorophylle-a. Cependant, seule l'obtention de profils de fluorescence permet d'intégrer cette grandeur sur l'ensemble de la colonne d'eau et d'identifier les couches de maximum de sub-surface. Néanmoins, l'importante couverture nuageuse et la présence de la banquise réduisent considérablement les mesures satellitaires et très peu de profils de fluorescence sont obtenus. Cette absence de données limite notre compréhension de processus clés à l'échelle de l'océan Austral. En déployant sur les éléphants de mer une nouvelle génération de balises Argos développée en partenariat avec le Sea Mammal Research Unit enregistrant simultanément des profils de température, de salinité et de fluorescence, il a été possible d'évaluer les variations spatio-temporelles des concentrations de phytoplancton pour de vastes secteurs de cet océan, d'élucider les facteurs environnementaux responsables de ces variations et d'évaluer les conséquences de ces variations aux niveaux trophiques supérieurs.

Evaluer les variations à court et moyen terme de la productivité primaire de l'Océan Austral

Le projet IPSOS-SEAL vise à évaluer comment les anomalies du système climat-océan affectent les variations de la production primaire de l'Océan Austral et les performances de pêche des éléphants de mer. Les profils de fluorescence combinés aux données satellitaires ont été utilisés pour reconstruire les champs 3-D de chlorophylle-a. En utilisant les rapports isotopiques du carbone ($\delta^{13}C$) et d'azote ($\delta^{15}N$) comme indicateurs des sites d'alimentation et des proies consommées, nous avons évalué l'influence des variations de la productivité des habitats sur le succès de pêche, le régime alimentaire et/ou la reproduction de ce prédateur. En effectuant ces mesures au niveau des stries dentaires annuelles, la fidélité v.s. la flexibilité des individus vis-à-vis de leurs sites d'alimentation et de régime alimentaire a été évaluée. En reconstruisant des séries temporelles en $\delta^{13}C$ et $\delta^{15}N$ à partir de dents collectées de 1950 à nos jours, nous avons cherché à vérifier si la diminution de la population de Kerguelen entre 1970 et 1985 était concomitante à un changement de la productivité de ce secteur de l'Océan Austral.

Résultats majeurs

Outre le développement d'une méthode originale d'intercalibration des fluorimètres, les résultats mettent en évidence les aspects suivants: i) les éléphants de mer sont devenus la principale source de données de fluorescence pour l'Océan austral, ii) une sous-estimation satellitaire de la couleur de l'eau des concentrations en phytoplancton, iii) une différenciation de l'écologie alimentaire de ces animaux en fonction de leur âge et sexe obtenue par les analyses



Mesure de la concentration en chlorophylle-a en fonction de la profondeur par éléphant de mer entre Kerguelen et l'Antarctique. Les données de surface collectées par les éléphants de mer révèlent que les informations satellitaires de couleur de l'eau tels que MODIS sous-estiment par un facteur 3 les concentrations en chlorophylle-a dans l'Océan Austral.

IPSOS-SEAL « Investigation of the vulnerability of the productivity of the Southern Ocean Subsystems to climate change: the Southern Elephant seal assessment from mid to high latitudes » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le CEBC (Centre d'Etudes Biologiques de Chizé). Il associe des chercheurs des stations marines (de Banyuls et Villefranche-sur-Mer), de l'ISEM (Institut des Sciences de l'Evolution de Montpellier), du LOCEAN (Laboratoire d'Océanographie et du Climat Expérimentations et Approches Numériques) et de l'INRA (Institut National de Recherche Agronomique). Le projet a débuté en février 2008 pour une durée de 48 mois. Il bénéficie d'un financement de l'ANR de 617 k€ pour un coût global de 1,7 M€. Les autres partenaires du projet sont le CNES, l'IPEV et la Fondation Total.

isotopiques combinées aux trajets des éléphants de mer, iv) la qualité des jeunes animaux qui est influencée par l'habitat de pêche de leur mère, les zones antarctiques et le plateau de Kerguelen étant les plus favorables mais paradoxalement peu utilisés par les femelles, v) dans les eaux plus claires (i.e. moins riches en phytoplancton), les éléphants de mer plongent plus profondément pour pêcher. Ainsi, une diminution de la production primaire aurait non seulement un effet sur l'abondance des ressources mais aussi sur leur accessibilité verticale, et par conséquent sur l'efficacité de pêche de ce prédateur.

Production scientifique et brevets

Le projet a conduit à la publication de 18 articles dans des revues d'écologie et d'océanographie. Deux articles portent plus particulièrement sur des aspects méthodologiques concernant la correction et la validation des estimations des concentrations en chlorophylle-a à partir de mesures *in situ* en fluorescence par des plateformes autonomes. Parallèlement, deux documentaires de 52 et 26 minutes coproduits par CNRS Image et Bonne Pioche illustrent les travaux réalisés dans IPSOS-SEAL.

Programme « Blanc », édition 2007

OPTIMISM

Un flotteur autonome pour une observation en temps réel de la banquise

Documenter les échanges thermiques à l'interface océan-glace-atmosphère : un enjeu majeur

C'est probablement en Arctique que le changement climatique est le plus palpable. Sur plus de 30 ans d'observations satellitaires de la superficie de la banquise, les cinq derniers étés figurent ainsi tous au palmarès des années de plus faible étendue, le minimum absolu de 2007 ayant pratiquement été égalé en 2011. Les modèles de climat du GIEC suggèrent une disparition de la banquise estivale pour la fin du siècle. Les observations montrent quant à elles, une trajectoire de déclin encore plus pessimiste: le record de 2007 n'était pas attendu avant 2040. La banquise Arctique est non seulement un indicateur du changement climatique, elle est également un acteur majeur du climat. Son déclin affecte entre autres le bilan radiatif de la Terre, tandis que l'eau de fonte joue potentiellement un rôle inhibiteur pour la circulation thermohaline globale. Documenter l'évolution de l'épaisseur de glace et les processus qui régissent les échanges de chaleur aux interfaces océan-glace-atmosphère par des observations *in situ* sont une étape indispensable pour améliorer les paramétrisations des modèles. Les mesures *in situ* restent également déterminantes pour calibrer les observations satellitaires d'épaisseur de glace telles celles de CryoSat2, lancé en 2010.

Une instrumentation innovante pour l'étude du bilan de glace de mer

Le projet OPTIMISM s'appuie sur le développement d'un instrument autonome permettant de mesurer en temps réel les évolutions parallèles de l'épaisseur de glace et des flux thermiques intervenant dans le bilan de masse de la glace. Les paramètres glaciologiques et océaniques sont mesurés par le flotteur Ice-T (Ice Thickness), tandis que le bilan d'énergie en surface est déterminé par les mesures du mât météorologique BEAR (Budget of Energy for Arctic Research), coiffant le flotteur. A partir de cet instrument, le projet ambitionne de collecter des mesures permettant de documenter et d'étudier un certain nombre de processus clés telle que la production de glace dans une polynie côtière du Svalbard, zone d'un intérêt particulier en océanographie, car associée à la formation d'eau profonde. L'instrument a également vocation à participer à l'effort international d'observation de la banquise Arctique, notamment à travers l'Observatoire NPEO (North Pole Environmental Observatory) déployé chaque année au Pôle Nord. Les processus ciblés, étudiés avec l'appui de modèles numériques, vont de l'étude du contenu en sel de la glace au rôle du mélange océanique turbulent dans le bilan de glace.

Résultats majeurs

Nous disposons d'un prototype d'instrument qui a récemment fait ses preuves en Arctique, avec en particulier un jeu de données de grande qualité, actuellement en cours d'analyse, collectées au Pôle Nord dans le cadre d'une collaboration internationale. De nouvelles observations doivent être acquises en 2012 à partir du flotteur mais également à partir d'un mouillage océanographique à relever dans la polynie du Svalbard. Un certain nombre d'études scientifiques, s'appuyant notamment sur la modélisation numérique, ont néanmoins



Flotteur Ice-T et mât BEAR en test sur les toits de Paris (gauche) ; trajectoire de dérive du flotteur Ice-T déployé au Pôle Nord (droite).

OPTIMISM « Observing dynamical and thermodynamical Processes impacting The sea Ice Mass balance from *In Situ* Measurements » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LOCEAN (Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentation et Approches Numériques). Il associe le LATMOS (Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales), le LMF (Laboratoire de Mécanique des Fluides de l'Ecole Centrale de Nantes), le CEN (Centre d'Etudes de la Neige de Météo-France) et la DT-INSU (Division Technique de l'Institut National des Sciences de l'Univers). Le projet a débuté en septembre 2009 pour une durée de 48 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 540 k€ pour un coût global de 2,7 M€. Il bénéficie également du soutien de l'IPEV pour les campagnes de terrain.

d'ores et déjà été conduites. A titre d'exemple, on retiendra l'étude théorique et numérique sur la convection des saumures emprisonnées dans la glace, qui met en évidence un seuil de température au-delà duquel les saumures cascaded à travers la couche de glace, conduisant à une désalinisation substantielle de la banquise jeune.

Production scientifique et brevets

Outre la soutenance d'une thèse, citons les publications suivantes : Jardon F., *et al.*, 2011. Internal waves and vertical mixing in the Storfjorden Polynya, Svalbard, J. Geophys. Res., 116, C12040, doi:10.1029/2010JC006918. Weill A., *et al.*, 2012. First observations of energy budget and bulk fluxes at NyAlesund (Svalbard) during a 2010 transition period as observed with the BEAR station. ISRN Meteorology (in press). Winters K., *et al.*, 2011. Critical reflexion and abyssal trapping of near-inertial waves on a beta plane, J. Fluid Mech., 684: 111-136. Loisel R., *et al.*, 2011. BEAR, une station de mesure pour l'Océan Arctique. La Météorologie, Vol. 74 (ISSN : 0026-1181). Jardon F., *et al.*, 2012. Full-depth desalination of warm sea ice. J. Geophys. Res., (in revision). Jardon F., *et al.*, 2012. Ice production in Storfjorden (Svalbard) estimated from a simple model based on AMSR-E observations: impact on water masses properties. J. Geophys. Res., (in revision).

Programme « Blanc », édition 2005

LIVINGSTONE

Les « gliders » à la découverte des fonds sous-marins

Les « gliders » pour la recherche et l'observation systématique de l'Océan profond

La télédétection satellitaire a été une véritable révolution pour l'observation de l'Océan de surface dans les années 80. Mais celle de l'Océan profond restait alors tributaire de moyens classiques, tels que navires de recherche ou lignes de mouillages, ne permettant qu'un échantillonnage très limité. Ce sont de petites plateformes peu coûteuses, les gliders, véritables planeurs sous-marins très autonomes, qui ont commencé à bouleverser les méthodes d'observation de l'Océan profond à partir des années 2000. Ils offrent en effet d'immenses perspectives à la recherche en dynamique océanique et en biogéochimie marine, mais aussi pour l'océanographie opérationnelle. Leur utilisation en flottilles devrait permettre d'accéder à une exploration puis à la surveillance d'une région océanique très détaillée et à un coût modéré. Mais le glider est encore un instrument en plein développement demandant encore de nombreuses améliorations principalement au plan de son maniement et des plans de campagnes. L'objectif général du projet LIVINGSTONE est d'organiser l'utilisation de cette nouvelle plateforme instrumentale très exigeante technologiquement, tout en développant les méthodes scientifiques pour exploiter les données collectées.

L'expérience « European Glider Observatories » de l'hiver 2008 dans le Golfe du Lion

Le projet est décomposé en les quatre tâches suivantes: caractérisation des processus et des échelles responsables des échanges entre les eaux du large et celles du plateau continental et évaluation des flux physiques et biogéochimiques correspondant ; déploiement d'un réseau de gliders en Méditerranée Nord-Occidentale dimensionné pour l'étude des échanges sur le talus du Golfe du Lion ; développement des méthodes de pilotage d'une flottille de gliders pour parcourir un réseau fixe ou bien pour l'échantillonnage adaptatif ; proposition de méthodes objectives de dimensionnement, position, fréquence d'échantillonnage d'un réseau de gliders et optimisation des conditions initiales et aux limites des modèles de circulation générale et côtière. C'est au travers d'une expérience pionnière en Europe que ces objectifs pouvaient le mieux être atteints. Le déploiement de dix gliders pour étudier la convection profonde dans le golfe du Lion, facteur qui contrôle en hiver la circulation du Courant Nord a permis d'exploiter le simulateur « glider », les interfaces informatiques qui ont été développées pour pouvoir piloter pendant de longues périodes une flotte de gliders depuis la terre, mais aussi de réaliser une synthèse des données au travers de leur assimilation dans un modèle de circulation générale de la Méditerranée.

Résultats majeurs

En réalisant la première grande expérience européenne avec une flotte de gliders, le projet a permis de décrire la convection hivernale dans le Golfe du Lion et l'observation directe des plumes convectives avec la mesure de vitesses verticales de plus de 10 cm/s. LIVINGSTONE a aussi permis la création du centre « Gliders » à la Division Technique de l'INSU/CNRS sur le site de la Seyne-sur-Mer. Ce centre assure la mise à disposition de gliders aux équipes fran-



Une partie du Parc National de Gliders opéré par la Division Technique de l'INSU/CNRS. Il s'agit ici de cinq gliders de type SLOCUM.

LIVINGSTONE « Etude des échanges côte-large et de leur variabilité par l'intermédiaire d'un réseau de planeurs sous-marins (gliders) : application au Golfe du Lion » est un projet de recherche fondamentale à vocation finalisée coordonné par le LOCEAN (Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentations et Approches Numériques). Il associe l'UME/ENSTA-ParisTech (Unité de Mécanique de l'Ecole Nationale Supérieure de Techniques Avancées - ParisTech). Le projet a débuté en décembre 2005 pour une durée de 42 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 400 k€ pour un coût global de 1,14 M€.

çaises et la maintenance d'une flotte actuelle de 15 appareils. Enfin, le projet est à l'origine du réseau « Everyone's Gliding Observatories » (EGO) rassemblant utilisateurs et constructeurs de gliders à travers le monde et du projet européen « Glider for Research, Ocean Observations and Management -GROOM » pour la définition d'une Infrastructure de Recherche Européenne.

Production scientifique et brevets

Citons notamment:

Taillandier V., *et al.*, 2009. Controlling the open ocean forcing of baroclinic coastal jets with a 4D-var method. *Dyn. of Atmos. and Oceans* 48 (1-3):155-174.

Taillandier V., *et al.*, 2011. Integration of ARGO trajectories in the Mediterranean Forecasting System and impact on the regional analysis of the Western Mediterranean circulation. *J. of Geophys. Res.*, (accepted).

Testor P., *et al.*, 2009. Gliders as a component of future observing systems. *OceanObs'09*, Venice Italy.

Site web pour le pilotage des gliders: <https://gfcp.ego-network.org/>

Programme « Blanc », édition 2006

GLOBPHY

Les changements décennaux du phytoplancton dans l'Océan mondial

Analyse des changements décennaux de la biomasse phytoplanctonique globale par des observations satellitaires et la modélisation

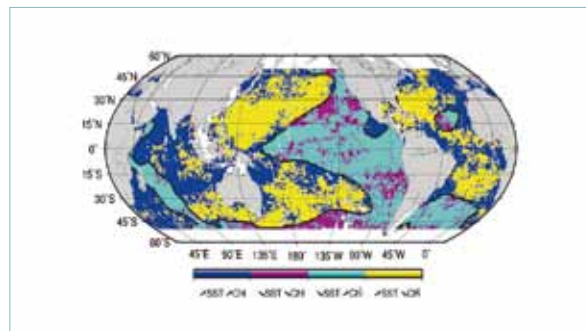
De fortes incertitudes existent sur les changements récents (quelques décennies) de la biomasse primaire de l'Océan global, à savoir le phytoplancton, premier maillon de la chaîne alimentaire et régulateur du CO₂ atmosphérique. Ces incertitudes tiennent en particulier à la difficulté de disposer des données nécessaires sur des périodes de temps suffisamment longues, mais également aux incertitudes des modélisations globales couplant la physique et la biogéochimie, et qui permettent en principe de reproduire les évolutions passées et de prédire celles qui interviendront dans le futur, en réponse à divers scénarios. La problématique générale du projet GLOBPHY était liée à la détection des changements décennaux du phytoplancton à l'échelle de l'Océan mondial, et à la compréhension de l'impact des changements environnementaux (climatiques) sur ce compartiment majeur du cycle du carbone planétaire. L'objectif général était de confirmer, mais surtout d'interpréter, des changements mis en évidence sur les 20 années passées grâce aux données satellitaires de la « couleur de l'océan ». Il s'agit d'une étape préliminaire, nécessaire avant de prétendre prédire les évolutions futures.

Enregistrements décennaux de la « couleur de l'Océan », nouveaux produits dérivés et analyse conjointe avec les forçages physiques

Le projet GLOBPHY était organisé en plusieurs volets et dont les objectifs plus spécifiques sont brièvement résumés ci-après. Il s'agissait tout d'abord de confirmer les changements déjà observés sur les années 1980-2000, en incorporant de nouvelles données puis d'inférer d'autres indicateurs que la seule concentration en chlorophylle, à partir des séries générées pour les réflectances marines (propriétés optiques inhérentes par exemple). L'objectif est alors d'enrichir l'enregistrement et d'affiner le diagnostic sur les changements observés (des changements réels du phytoplancton ou d'autres composantes de l'écosystème). Enfin, il convenait de confronter l'enregistrement de la couleur de l'Océan à ceux d'autres paramètres qui sont susceptibles d'avoir joué un rôle dans l'évolution de la biomasse phytoplanctonique globale : température, éclaircissement, vent à partir de données satellitaires et *in situ*, de ré-analyses des sorties des modèles de prévision globale. L'objectif était ici une première phase d'interprétation des changements observés, en vérifiant leur cohérence avec ceux observés dans les variables de forçage du compartiment biologique.

Résultats majeurs

Le projet GLOBPHY a permis de montrer en particulier que les changements décennaux du phytoplancton dans l'Océan global suivent les variations multi-décennales de l'environnement physique (température, stratification des eaux de surface), elles-mêmes liées aux oscillations climatiques telles que l'oscillation multi décennale du Pacifique. Nous avons également pu mettre en évidence des changements importants dans la phénologie du phytoplancton sur les 20



Cartographie des relations entre le changement de la température de surface des océans (SST) et la variation de leur concentration en chlorophylle (Chl), entre les décennies 1980 et 2000 (données satellitaires des missions CZCS et SeaWiFS de la NASA). La répartition des régions où SST et Chl évoluent en sens inverse (en jaune et bleu ciel) correspond à la signature spatiale des oscillations multi décennales des propriétés physiques de l'Océan, en particulier dans le Pacifique (Extrait de la Figure 1 de Martinez *et al.*, 2009, Science, Vol. 326).

GLOBPHY « Analysis of decadal changes in the global ocean phytoplankton through the synergistic use of satellite data and 1-dimensional and 3-dimensional models » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LOV (Laboratoire d'Océanographie de Villefranche-sur-Mer). Il associe le LOG (Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences de Wimereux) et le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement). Il a débuté en novembre 2006 pour une durée de 42 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 456 k€ pour un coût global de 1,2 M€.

dernières années (c'est à dire des changements du cycle saisonnier), indicateurs de changements du fonctionnement des écosystèmes. Une post-doctorante ayant participé au projet a été recrutée comme enseignante-chercheuse à l'Université du Littoral Côte d'Opale et une autre comme chargée de recherche à l'IRD.

Production scientifique et brevets

Parmi les huit publications dans des revues internationales à comité de lecture (et deux en révision), nous pouvons citer : Martinez E., *et al.*, 2009. Climate-driven basin-scale decadal oscillations of oceanic phytoplankton. *Science* 326: 1253-1256. Duforêt-Gaurier L., *et al.*, 2010. Estimates of Particulate Organic Carbon over the euphotic depth from *in situ* measurements. Application to satellite data over the global ocean. *Deep Sea Res.*, 57:351-367. Martinez E., *et al.*, 2011. Phytoplankton spring and fall blooms in the North Atlantic in the 1980s and 2000s. *J. Geophys. Res.*, 116, C11029, doi:10.1029/2010JC006836.

Programme « Blanc », édition 2007

DUNE

Les poussières du Sahara : plus qu'un « fertilisateur » pour la Méditerranée

Les apports atmosphériques contribuent-ils au fonctionnement des écosystèmes marins ?

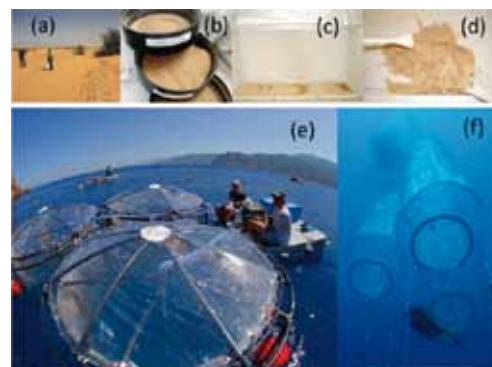
Les dépôts atmosphériques sont désormais reconnus comme source significative de macro et micro-nutriments pour l'Océan de surface, mais la quantification de leur rôle dans la pompe biologique du carbone reste mal définie, notamment à cause de la diversité des processus mis en jeu : i) dans le cycle atmosphérique des particules (depuis les processus d'émission jusqu'au dépôt à la surface de l'Océan, en passant par les transformations physico-chimiques subies durant leur transport), ii) dans la colonne d'eau (utilisation des éléments associés à ces particules par les bactéries et le phytoplancton et l'exportation du carbone résultant de la fertilisation induite par ces apports). La mer Méditerranée -étymologiquement, mer entourée de terres- est soumise à une diversité d'apports atmosphériques variables en fréquence et en intensité. Ces dépôts, pendant la période de stratification thermique, constituent la principale source d'éléments nutritifs de ces eaux rendues très oligotrophes par l'appauvrissement en ces éléments suite à la floraison printanière. L'objectif principal du projet DUNE est d'estimer, par le biais d'expérimentations en mésocosmes, l'impact de ces dépôts sur un tel écosystème oligotrophe.

Des approches méthodologiques originales appliquées avec succès pour la première fois

La stratégie expérimentale proposée dans DUNE reposait sur deux défis méthodologiques qui ont pu être relevés avec succès pendant le projet. Ces méthodes sont : i) la reproduction du processus de dépôt atmosphérique nécessaire aux expériences d'ensemencement contrôlé en mer. Il s'agissait de produire plusieurs centaines de grammes de matériel particulaire similaire aux aérosols déposés à la surface de la mer. Ceci a pu être réalisé par simulation expérimentale de la production éolienne d'aérosols désertiques et de leur passage en phase aqueuse nuageuse (illustration a-d), ii) la conception d'expériences d'ensemencement en larges mésocosmes « propres ». En partant d'un cahier des charges précis (notamment les systèmes devaient être entièrement démontables, composés de matière non métallique et pouvoir être mouillés sur des fonds de 20 m), le consortium a travaillé à la conception des structures, des enceintes (52 m³), des systèmes de prélèvements et des mouillages. Ces dispositifs ont été déployés avec succès dans la réserve naturelle de Scandola (Corse) au cours des deux campagnes DUNE1 en 2008 (6 mésocosmes) et DUNE2 en 2010 (7 mésocosmes) avec des évolutions techniques entre les deux (illustration e-f).

Résultats majeurs

L'approche pluridisciplinaire mise en œuvre qui associe atmosphériques et océanographes, a montré que les cycles des éléments d'intérêt biogéochimique sont modifiés par les apports atmosphériques ; que les éléments nutritifs nouveaux introduits sont consommés très rapidement ; qu'il existe une compétition en faveur des bactéries hétérotrophes pour la ressource nutritive nouvelle ; que parmi le phytoplancton, les organismes diazotrophes sont bien stimulés par



Du désert à l'expérimentation en mer, les différentes étapes de DUNE sont : (a) la collecte de sol en Tunisie, (b) la récupération par tamisage de la fraction « éolisable », (c, d) le traitement chimique reproduisant les processus chimiques s'opérant pendant le transport (e, f) et un groupe de 3 mésocosmes vus de dessous et vus du dessus (Crédits photos : (a, b) F. Dulac, LSCE, (c, d) LISA, (e, f) D. Luquet, OOV).

DUNE « a DUst experiment in a low Nutrient, low chlorophyll Ecosystem » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LOV (Laboratoire d'Océanographie de Villefranche sur Mer). Il associe le LISA (Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques), le LEMAR (Laboratoire des Sciences de l'Environnement Marin), le LOCEAN (Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentations et Approches Numériques), en collaboration avec 8 autres laboratoires (dont 4 étrangers) et le Parc Régional Naturel de Corse, Réserve de Scandola. Le projet a débuté en novembre 2007 pour une durée de 43 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 500 k€ pour un coût global de l'ordre de 1,5 M€. DUNE a été labellisé par le programme international SOLAS en février 2009.

l'apport atmosphérique ; que l'export de carbone particulaire est en partie lié à des processus d'agrégation de la matière organique avec les particules lithogéniques, ce qui montre que l'effet des apports atmosphériques ne peut pas être réduit à un simple effet fertilisant pour les organismes de l'Océan de surface. Les méthodes originales développées et validées dans DUNE peuvent désormais être utilisées dans le cadre d'autres projets.

Production scientifique et brevets

Bressac M., *et al.*, 2011. Geo- Marine Lett.
Ye Y., *et al.*, 2011. Biogeosciences.
Wagener T., *et al.*, 2010. Biogeosciences.
Laghdass M., *et al.*, 2011. Aquatic Microbial Ecology.
Guieu C., *et al.*, 2010. Biogeosciences.
Pulido-Villena E., *et al.*, 2010. Geophys. Res. Lett.

Programme « Blanc », édition 2008

BACCIO

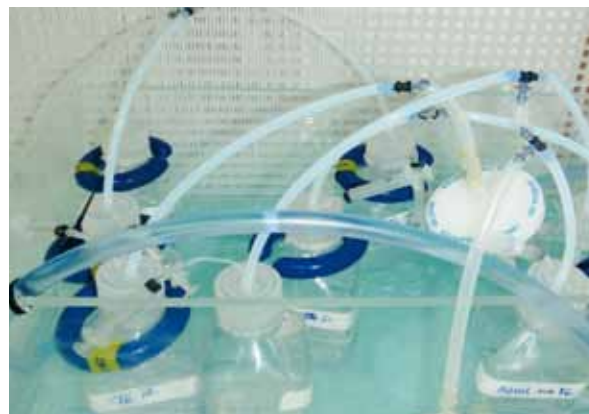
Une vision biomoléculaire des cycles biogéochimiques dans l'Océan

Interroger les microorganismes pour mieux comprendre les cycles du fer, du carbone et leur interaction dans l'océan

Le fer est un élément déterminant dans le cycle océanique du carbone et donc dans le contrôle du climat. Malgré trois décennies d'efforts, de nombreuses énigmes subsistent encore sur les fonctionnements et les interactions entre ces deux cycles. Les microorganismes marins sont le pivot qui relie ces deux cycles. Pour faire progresser les connaissances dans ce domaine, BACCIO a choisi de placer les microorganismes au cœur du projet de recherche et de les interroger sous différents angles. Que nous apprennent les changements de diversité des microorganismes face à des conditions environnementales contrastées ou en réponse à des perturbations expérimentales contrôlées ? Que nous apprennent les distributions des génomes microbiens dans les océans ? Comment les microorganismes gèrent-ils du point de vue physiologique des carences en fer ou en carbone ? Telles sont les questions que nous nous sommes posées. Le projet apporte à la fois des réponses à ces différentes questions mais aussi propose de nouvelles approches et de nouvelles hypothèses à tester, qu'il s'agisse d'expérimentations en laboratoire ou de campagnes océanographiques.

La biogéochimie marine et les techniques « omic »

La démarche expérimentale développée repose sur une combinaison d'approches fondée sur : i) les méthodes classiques utilisées dans l'étude des microorganismes en biogéochimie marine (cultures en continu-chemostat- de communautés bactériennes naturelles, cultures de souches bactériennes marines en condition ultra propre, mesures *in situ* et collectes d'échantillons dans des campagnes océanographiques) et ii) les techniques moléculaires issues de l'ère génomique et post génomique se fondant sur l'analyse de la trilogie : gènes-transcrits-protéines. Parmi celles-ci, nous avons notamment utilisé la métagénomique, la métatranscriptomique, la protéomique ainsi que les méthodes d'analyses « single cell ». Par ailleurs, dans le cas de l'analyse des données de métagénomiques du projet Global Ocean Survey, des simulations de la concentration en fer dans l'Océan mondial, issue de la modélisation globale couplée physique-biogéochimie de l'Océan, ont été utilisées.



Culture en salle blanche de bactéries marines limitées en fer.

BACCIO « Biomolecular Approach of the Cycling of Carbon and Iron in the Ocean » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LOM (Laboratoire d'Océanographie Microbienne de Banyuls). Il associe le LBPS (Laboratoire Polymères Biopolymères et Surfaces de Rouen) et l'Unité Biotechnologie et Signalisation Cellulaire de Strasbourg. Le projet a débuté en janvier 2009 pour une durée de 36 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 440 k€ pour un coût global de 1,6 M€.

Résultats majeurs

Le projet a réalisé la première analyse exhaustive de la distribution dans l'Océan des gènes impliqués dans le métabolisme du fer, en liaison avec la concentration de celui-ci. Cette approche a fait émerger la diversité des stratégies des microorganismes pour acquérir le fer en fonction de l'environnement qui l'entoure. BACCIO a aussi développé de nouveaux outils moléculaires permettant de mieux discerner à l'intérieur d'une communauté de bactéries quelles sont celles qui assimilent le plus efficacement le fer. Des études en laboratoire ont également permis de montrer pour la première fois que les voies métaboliques bactériennes impliquant le fer (i.e. la respiration) présentaient une grande plasticité favorisant l'adaptation de ces microorganismes face à une ressource rare et changeante. Enfin, les cultures en chemostats ont démontré que la diversité d'une communauté bactérienne naturelle est influencée par la diversité de la ressource en matière organique.

Production scientifique et brevets

Toulza E., Tagliabue A., Blain S., Piganeau G., 2012. Analysis of the Global Ocean Sampling (GOS) project for trends in iron uptake by surface Ocean microbes. *PLoS ONE* (in press).
Obernosterer I., 2010. Can different sources of organic matter shape heterotrophic bacterial diversity? Gordon conference on "Marine Microbes: from genes to global cycles", July 4-9, Tilton School, Tilton, NH, (Invited speaker).

Programme « Blanc », édition 2005

BOA

L'importance du couplage océan-atmosphère dans le cycle biogéochimique du fer (Fe)

Comprendre et quantifier comment le couplage océan-atmosphère influence les processus chimiques, physiques et biologiques du cycle du fer

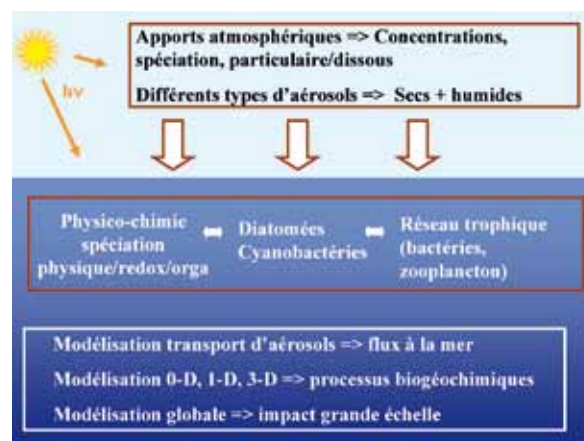
Le rôle du fer dans le cycle biogéochimique du carbone dans l'Océan a été mis en évidence au cours des deux dernières décennies. Un des paramètres clés qui contrôle l'impact de l'apport atmosphérique de fer sur l'écosystème marin est sa forme chimique et physique dans l'atmosphère et dans la couche de surface de l'Océan. L'objectif du projet BOA est de mieux comprendre et quantifier la biodisponibilité des différentes formes chimiques et physiques du Fe. Une originalité forte du projet est de considérer le cycle du fer dans son ensemble, en s'intéressant à la fois à son cycle atmosphérique, sa chimie dans l'Océan et ses interactions avec le réseau trophique (des bactéries au micro- zooplancton). Une autre originalité est l'approche pluridisciplinaire et multi- outils mise en oeuvre. Les résultats obtenus posent de nombreuses questions scientifiques nouvelles, notamment sur les caractéristiques biogéochimiques du milieu marin au moment où se fait l'apport ou sur l'importance des ligands organiques (atmosphériques et océaniques) et des aérosols biogéniques primaires (bactéries, virus,...). Les thématiques du projet BOA font partie des axes privilégiés des programmes internationaux SOLAS, GEOTRACES et IMBER.

Une étude innovante du cycle biogéochimique du fer à l'interface océan-atmosphère

Le fer reste un des éléments chimiques les plus difficiles à mesurer dans l'eau de mer et une étape indispensable pour mener à bien le projet était le développement et la mise en œuvre de techniques analytiques performantes : spectrométrie de masse associée à un plasma inductif d'argon ICP/MS, voltamétrie, injection de flux,... Il s'agit d'étudier les apports atmosphériques et les processus de dissolution de ces poussières en fonction de différents paramètres environnementaux (température, lumière, ligands organiques,...). Des études d'interactions entre les apports atmosphériques de Fe et le réseau trophique ont été menées avec différents compartiments du réseau trophique. Les expériences ont été réalisées soit *in situ* sur le site DYFAMED, Méditerranée occidentale, soit en laboratoire sur des espèces clés : la diatomée *Thalassiosira oceanica*, la cyanobactérie *Trichodesmium erythraeum* et le dinoflagellé *Oxhyrris marina*. L'interaction forte entre l'expérimentation et la modélisation a permis une meilleure quantification de l'impact du fer sur la composition et la structure de l'écosystème marin.

Résultats majeurs

Les expériences en laboratoire mettent en évidence le rôle clé des ligands organiques présents dans les pluies et du flux solaire sur la dissolution du fer de l'aérosol. Les études d'interactions entre fer/apports atmosphériques/réseau trophique au laboratoire ou *in situ* ont permis de mieux quantifier : i) l'impact des apports atmosphériques sur la spéciation et la biodisponibilité du fer, ii) la part des processus biotiques et abiotiques sur la spéciation et la biodisponibilité du fer et



Stratégie scientifique développée dans le projet BOA.

BOA « Biogéochimie du fer à l'interface Océan-Atmosphère : interactions entre apports atmosphériques de fer et réseau trophique » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LEMAR (Laboratoire des sciences de l'Environnement MARin). Il associe le LISA (Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques), le LOCEAN (Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentations et Approches Numériques), le LOV (Laboratoire d'Océanographie de Villefranche-sur-mer) et le LPO (Laboratoire de Physique des Océans). Le projet a débuté en décembre 2005 pour une durée de 36 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 485 k€ pour un coût global de 1,3 M€.

iii) la rétroaction du réseau trophique sur le cycle biogéochimique du fer. Le couplage entre expérimentation et modélisation a permis une meilleure hiérarchisation et paramétrisation des processus impliqués dans le cycle biogéochimique du fer et de sa source atmosphérique, apportant ainsi une meilleure quantification de son impact sur la structure de l'écosystème marin. Les résultats obtenus ouvrent de nouvelles perspectives, notamment sur les caractéristiques biogéochimiques du milieu marin au moment où se fait l'apport atmosphérique ou sur l'importance des ligands organiques (atmosphériques et océaniques) et des aérosols biogéniques primaires (i.e. bactéries, virus,...) et leur rôle sur le cycle biogéochimique du fer.

Production scientifique et brevets

Bucciarelli E., *et al.*, 2010. Biogeosciences 7: 657-669.
Godrant A., *et al.*, 2009. Limnol. Oceanogr.: Methods 7: 682-692.
Journet E., *et al.*, 2007. Int. J. Environ. Anal. Chem., 87647 -658, doi 10.1080/03067310701297837.
Journet E., *et al.*, 2008. J. Geophys. Res. Lett., 35, doi 10.1029/2007GL031589.
Paris R., *et al.*, 2011. Atmospheric Environment 45 : 6510-6517.
Pulido-Villena E., *et al.*, 2008. Global Biogeochemical Cycles 22, GB1020, doi:10.1029/2007GB003091

Programme « Blanc », édition 2009

REDHOTS

Reconstituer la dynamique interne de l'Océan depuis l'Espace

Cartographier à haute résolution les vitesses horizontales et verticales des 300-500 premiers mètres des océans

L'influence des petites échelles (horizontale et verticale) de la dynamique océanique sur le cycle du carbone, le conditionnement des écosystèmes marins ou encore la dérive et l'évolution de pollutions diffuses ou accidentelles ne fait aujourd'hui plus de doute. Depuis près d'une trentaine d'années, les mesures satellitaires d'Observation de la Terre, obtenues sur l'ensemble du globe et souvent avec des résolutions très fines, contribuent à cette révélation évidente de la richesse des caractéristiques turbulentes de la dynamique océanique des couches supérieures de l'Océan. La manifestation souvent systématique de fronts et de tourbillons océaniques de très petites échelles dans les images de température de surface ou de réflectance optique (couleur) prouve une variabilité organisée aux petites échelles et les liens entre les processus physiques et biogéochimiques. Toutefois, une telle variété des phénomènes observés est longtemps apparue comme un frein pour l'exploitation de ces mesures de très haute résolution. C'est seulement récemment qu'une opportunité réaliste de combler ce « déficit d'interprétation » est apparue en se fondant sur un nouveau cadre dynamique et des analyses ciblées des données satellitaires existantes de très haute résolution.

Un nouveau cadre dynamique permettant d'exploiter les observations satellite de haute résolution

Les résultats théoriques et numériques obtenus récemment en utilisant la puissance du « Earth Simulator » offrent en effet de nouvelles perspectives. A partir de ces simulations rigoureuses, un certain nombre d'études (décrites dans plusieurs publications récentes) suggèrent et confirment l'existence, dans la gamme d'échelles incluant les fines échelles (i.e. de 1 à 3000 km), d'un mode dynamique particulier gouvernant l'évolution des couches supérieures océaniques. Ce mode, gouverné par les anomalies de densité de surface, est en compétition avec le mode dynamique intérieur régi par les anomalies de vorticité potentielle. Ce mode de surface, dont une version simplifiée est la dynamique de surface quasi-géostrophique (SQG), est actuellement utilisé dans un certain nombre d'études pour représenter la dynamique de la tropopause atmosphérique. Dans un contexte océanique, l'existence de ce mode de surface et de son couplage avec l'intérieur, n'impose pas d'utiliser des séries chronologiques, et permet la reconstruction quantitative de la dynamique 3-D des 500 premiers mètres, sous la couche mélangée, seulement à partir de la connaissance de la densité de surface et de caractéristiques de plus grande échelle des conditions océaniques.



L'océan turbulent : efflorescence algale en Mer de Barents, nord de la péninsule scandinave, captée par imagerie satellitaire (ENVISAT MERIS, résolution 300 m, 17 Août 2011).

REDHOTS « REconstruction de la Dynamique Haute résolution Océanique Tridimensionnelle des couches Supérieures » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LOS (Laboratoire d'Océanographie Spatiale, Ifremer). Il associe le LMD (Laboratoire de Météorologie Dynamique), le LOCEAN (Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentations et Approches Numériques) et le LPO (Laboratoire Physique des Océans). Le projet a débuté en avril 2010 pour une durée de 36 mois. Il bénéficie d'un financement de l'ANR de 343 k€ pour un coût global de l'ordre de 1,75 M€.

Résultats majeurs

Parmi les résultats importants du projet REDHOTS, des simulations numériques résolvant les échelles de 1 à 3 000 km ont permis d'estimer précisément le spectre d'énergie cinétique turbulente dans différentes régions océaniques. Ces résultats nouveaux confirment une cascade inverse, sans distinction énergétique particulière. Le rôle de la couche limite de mélange a également été étudié. La prise en compte du mélange vertical a permis de mieux interpréter de récentes observations, et de confirmer le potentiel de combiner les informations de température de surface et de hauteur dynamique à haute résolution.

Production scientifique et brevets

Citons notamment :

Klein P., *et al.*, 2012, Departure of ocean mixed-layer current from geostrophy: impact of mixing. *Geophys. Res. Lett.*, (submitted).
Kudryavtsev V.N., *et al.*, 2012. Imaging meso-scale upper ocean dynamics using SAR and optical data. *J. of Geophys. Res.*, doi:10.1029/2011JC007492 (in press).
Sasaki H., Klein P., 2012. SSH wavenumber spectrum in the North Pacific from a high-resolution realistic simulation. *J. Phys. Ocean.*, (in press).

Programme « Jeunes Chercheurs, Jeunes Chercheuses », édition 2009

SOUTHERNCROSS

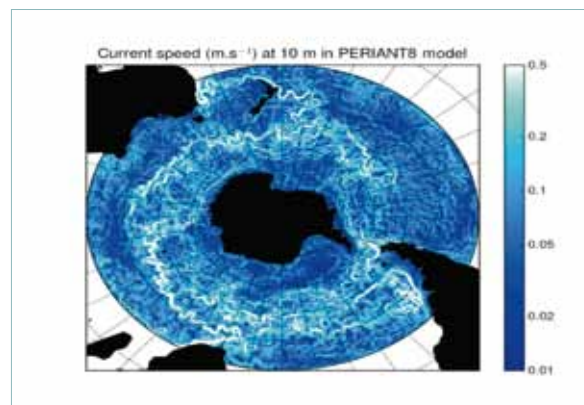
Le rôle des tourbillons océaniques dans la variabilité de l'Océan Austral

Mieux prendre en compte le rôle des processus océaniques dans la réponse de l'océan Austral à la variabilité climatique

L'océan austral joue un rôle central dans la machine climatique. La circulation au travers de l'intense courant circumpolaire antarctique (ACC) contrôle en effet la formation de masses d'eaux qui pilote en partie le cycle de carbone global. Or, la circulation de l'océan Austral semble très sensible à l'intensification des vents observée dans l'hémisphère sud depuis quelques décennies. La capacité des modèles de prévision climatique à capturer cette réponse est l'objet de nombreuses questions. En effet, la réponse océanique à la variabilité atmosphérique serait très sensible à des processus de fine échelle. Parmi ceux-ci, citons les tourbillons (~ 10 - 100 km) qui transportent de la chaleur et du sel au travers de l'ACC et les filaments (~ 1 km - 10 km) qui participent aux mélanges des propriétés physico-biogéochimiques dans l'océan austral : deux processus qui ne sont pas représentés explicitement dans les composantes océaniques des modèles de prévision climatique. Le projet SouthernCross se propose d'étudier comment ces processus océaniques de fine échelle affectent la réponse de l'océan Austral au changement climatique afin de d'améliorer leur prise en compte dans les modèles de prévision climatique.

Une hiérarchie de modèles océaniques régionaux de résolution croissante

Bien que d'énormes progrès aient été faits sur ce plan depuis dix ans, l'océan Austral reste le bassin océanique le moins bien observé. Ceci en grande partie à cause de l'éloignement géographique et des difficultés opérationnelles aux hautes latitudes. Les modèles numériques sont alors un précieux outil quantitatif pour tester des hypothèses sur le fonctionnement dynamique de cet océan. Au cours de ce projet, une hiérarchie de modèles océaniques régionaux de résolution spatiale croissante a été mise en place. Elle est fondée sur le système de modélisation NEMO et l'expertise du groupe DRAKKAR. Le modèle à plus haute résolution utilisé permet ainsi de résoudre explicitement la dynamique associée aux tourbillons océaniques. Une originalité de l'approche est de mener des expériences de sensibilité au forçage atmosphérique afin de simuler l'effet de l'intensification des vents dans l'océan austral. Une autre originalité tient au couplage du modèle dynamique avec le modèle PISCES de biogéochimie et d'écosystèmes. SouthernCross est ainsi l'un des premiers efforts mondiaux de modélisation explicite de l'effet des tourbillons océaniques sur le cycle du carbone dans l'océan Austral.



Intensité des courants à 10 m de profondeur dans le modèle PERIANT8 (moyenne sur 5 jours typiques en été austral). La résolution de PERIANT8 (~ 7 km à 60°S) permet de résoudre explicitement une large gamme de processus océaniques. Cette image montre en particulier une intense activité de tourbillons de méso-échelle.

SOUTHERNCROSS « Southern Ocean variability and Cross-scale interactions » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LEGI (Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels, Equipe Modélisation des Ecoulements Océaniques à Moyenne et grande échelle). Il associe le LOCEAN (Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentations et Approches Numériques) et le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement). Le projet a débuté en janvier 2009 pour une durée de 42 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 165 k€ pour un coût total de 809 k€.

Résultats majeurs

Le projet a permis de décrire comment une représentation explicite des fines échelles est susceptible de modifier la sensibilité du modèle de circulation à la variabilité atmosphérique. Il a ainsi été montré que la structure spatiale de la tendance des vents est un paramètre clé de la réponse océanique. Il a également permis d'illustrer le rôle joué par les tourbillons océaniques dans les échanges verticaux au coeur de l'ACC et dans le transport de chaleur au travers de celui-ci. Une méthode permettant d'améliorer la représentation des filaments océaniques dans les modèles de circulation a également été proposée.

Production scientifique et brevets

Citons notamment :

Dufour *et al.*, 2012. Standing and transient eddies in the response of the meridional overturning to the Southern annular mode. *J. of Climate* (in revision).

Le Sommer *et al.*, 2011. Parameterization of subgrid stirring in eddy resolving ocean models. Part 1: Theory and diagnostics. *Ocean Modelling* 39 (1-2): 154-169.

Zika *et al.*, 2012. Vertical eddy fluxes in the Southern Ocean. *J. of Phys. Oceanography* (in revision).

Programme « Changements Environnementaux Planétaires », édition 2009

MACROES

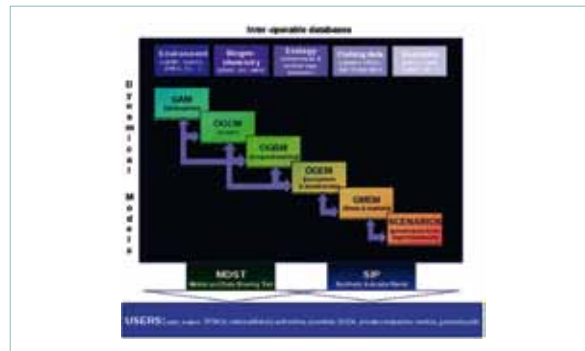
Un microscope pour comprendre les perturbations du système océanique global

Mieux comprendre et prédire la dynamique intégrée des écosystèmes marins dans un contexte de sur-pêche et de changement global

Les écosystèmes marins et les services qu'ils procurent aux sociétés humaines (nourriture, fixation de carbone, ...) sont menacés par la pression combinée des changements planétaires environnementaux (changement climatique, acidification,...), par la sur-pêche généralisée, et par la globalisation de l'économie qui rend difficile la gouvernance de leur exploitation. Le projet MACROES se propose de développer un microscope du système océanique global incluant la dynamique océanique, la biogéochimie, les écosystèmes et leur diversité, les pêcheries hauturières ainsi que les marchés des espèces pélagiques associées. Associant des bases de données interopérables et des modèles mécanistes couplés, ce macroscopie sera ensuite utilisé pour aborder trois questions scientifiques spécifiques : i) le rôle des interactions réciproques et de la biodiversité dans le fonctionnement et la structure des écosystèmes marins, ii) la réponse de ces derniers aux changements planétaires environnementaux (sur-pêche, changement global) et l'altération potentielle des services qu'ils rendent aux sociétés humaines et iii) la caractérisation de ces changements par des indicateurs synthétiques ayant du sens pour la communication et la gestion des ressources. L'ambition du projet est de parvenir à établir une synergie forte entre des spécialistes reconnus de disciplines actuellement indépendantes allant de la physique au droit, en passant par la biologie et l'économie, pour aboutir à une intégration multidisciplinaire efficace et pérenne.

Articulation de bases de données interopérables à une suite de modèles mécanistes couplés représentant l'ensemble du système océanique

Le projet repose très largement sur le développement et l'utilisation d'un modèle intégré du système marin (modèle « end-to-end ») à l'échelle globale. Cette intégration est obtenue par le couplage complet de trois modèles existants : le modèle de dynamique océanique NEMO, le modèle biogéochimique marin PISCES et le modèle d'écosystème APECOSM. Ce couplage permet de tenir compte explicitement des contrôles ascendants et descendants (« bottom-up » et « top-down ») de la dynamique écosystémique, de la dynamique physique jusqu'aux niveaux trophiques supérieurs qui interagissent, se propagent et finalement déterminent la dynamique du système marin. À notre connaissance, un tel niveau d'intégration entre les compartiments physiques, biogéochimiques et écologiques n'a jamais été atteint jusqu'à présent. Par ailleurs, une attention particulière est portée à la consistance formelle entre les composantes physique, biogéochimique et biologique du modèle intégré grâce à l'utilisation de la théorie DEB (Dynamic Energy Budget, Kooijman, 2000) pour les modèles PISCES et APECOSM. Ce modèle intégré du système océanique sera forcé par différents scénarii du changement planétaire, par exemple ceux de l'exercice 5 du GIEC, ainsi que par différentes stratégies de gouvernance des pêcheries hauturières (thonières) qui seront définies dans le cadre du projet.



Un macroscopie pour le système océanique terrestre s'appuyant sur le développement et l'utilisation d'un modèle intégré représentant les différentes composantes du système marin, de la physique à l'économie, en passant par la biogéochimie et les écosystèmes marins.

MACROES « Macroscopie for Oceanic Earth System » est un projet de recherche fondamentale à vocation finalisée coordonné par le LPO (Laboratoire de Physique des Océans). Il associe les laboratoires EME (Écosystèmes Marins Exploités), LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement), LOCEAN (Laboratoire d'Océanographie et de Climatologie : Expérimentations et Analyses Numériques), LEMNA (Laboratoire d'Économie et de Management de Nantes-Atlantique), CER-TAP (Centre d'Étude et de Recherche sur les Transformations de l'Action Publique) et LMGM (Laboratoire de Microbiologie, de Géochimie et d'Écologies Marines). Le projet a débuté en mars 2010 pour une durée de 48 mois. Il bénéficie d'un financement de l'ANR de 1,33 M€ pour un coût global de 3,9 M€. Le projet est labellisé par le Pôle Mer Bretagne.

Résultats majeurs

Le projet MACROES doit aboutir à la mise en place d'une plateforme de modélisation intégrée du système océanique hauturier, avec un accent particulier mis sur les thonidés. Afin d'assurer leur accessibilité par la communauté scientifique et leur large diffusion, les observations ainsi que les résultats issus de cette plateforme de modélisation seront diffusés au travers d'un outil de partage des données et des modèles MDST (Model Data Sharing Tool) et synthétisés par un panel d'indicateurs synthétiques SIP (Synthetic Indicator Panel). Le MDST et le SIP seront accessibles librement au travers d'un portail convivial aussi bien aux scientifiques qu'au grand public ou aux décideurs.

Production scientifique et brevets

Quatre publications dans des revues internationales à comité de lecture ainsi qu'un article de valorisation ont été publiés mi-2011. De nombreuses communications ont été présentées dans des conférences internationales. Le projet est en outre à ce jour, co-organisateur de deux conférences internationales. Il est également à noter que le portail de distribution des données (MDST) est fonctionnel (<http://vmmdst-dev.mpl.ird.fr:8080/MDST/>).

Programme « Jeunes Chercheurs, Jeunes Chercheuses », édition 2005

GOBAC

Interactions entre climat et cycle du carbone dans un monde glaciaire

Modélisation des échanges de CO₂ entre l'atmosphère, l'Océan et la biosphère depuis 20 000 ans

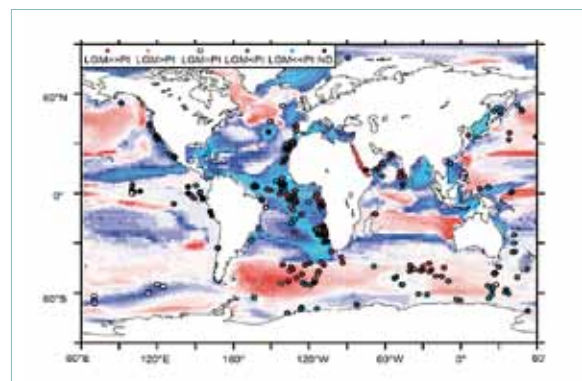
Le réchauffement actuel est causé par les émissions anthropiques de CO₂ et leur augmentation future conduira à un réchauffement encore accru. À l'aide de modèles représentant à la fois le système climatique et le cycle du carbone, il a été montré que ce changement climatique allait réduire la capacité des réservoirs naturels de carbone à absorber le carbone anthropique. Bien que les incertitudes soient importantes, ces études ont montré que cette rétroaction positive pouvait amplifier le réchauffement attendu. L'étude des enregistrements paléoclimatiques a mis en évidence l'existence d'un lien fort entre climat et cycle du carbone pour les cycles glaciaires. Ce couplage entre ces changements climatiques majeurs et le cycle du carbone reste encore mal compris. Le meilleur exemple est l'absence de théorie convaincante pour expliquer la faible teneur en CO₂ atmosphérique lors du Dernier Maximum Glaciaire (DMG), il y a 18 000 ans. En utilisant les modèles couplés climat-carbone appliqués à l'étude des changements climatiques glaciaire- interglaciaire, le projet GOBAC vise: i) à mieux comprendre les interactions entre le cycle du carbone et le climat en étudiant la dynamique des différents réservoirs de carbone dans un monde glaciaire et ii) à mieux valider ces modèles couplés dans l'optique de leur utilisation pour des scénarii futurs.

Utilisation d'une palette de modèles climat- carbone de complexité variable appliqués aux cycles glaciaires-interglaciaires

La synergie qui avait permis de mener à terme les premières simulations couplées climat- carbone a été appliquée avec succès à la thématique du climat quaternaire. Le projet a permis de rassembler plusieurs modélisateurs autour de ces questions (modélisations du climat, du cycle du carbone océanique et de la biosphère continentale), en utilisant une palette de modèles (de complexité différente) et en les couplant les uns aux autres. Une attention particulière a été portée au lien avec la communauté des paléoclimatologues qui travaille sur l'acquisition de nouvelles données.

Résultats majeurs

Les résultats obtenus peuvent être résumés en trois points: i) le développement de nouvelles versions des modèles du cycle du carbone : PISCES (cycle du fer et ¹³C) et de CLIMBER (saumures), ii) l'exploration et la quantification du rôle de nouveaux mécanismes sur la pCO₂ au DMG (changement des vents dans l'hémisphère sud, de la formation des saumures, des rapports élémentaires de la matière organique du phytoplancton et d'accumulation de carbone dans les sols gelés) et iii) l'établissement d'un nouveau scénario permettant d'expliquer les variations du CO₂ en sortie de période glaciaire, faisant intervenir la formation de saumures dans l'Océan en période glaciaire, des changements de la biogéochimie marine (en réponse aux dépôts de poussières et aux modifications des rapports élémentaires de la matière organique) et une ré-évaluation du stock de carbone continental dans les sols gelés au Dernier Maximum Glaciaire.



Modification de la production primaire océanique au Dernier Maximum Glaciaire, simulée par le modèle IPSL-CM4-PISCES (couleurs) et à partir de reconstructions paléoclimatiques marines (points).

GOBAC « Glacial Ocean Biosphere Atmosphere Carbon Climate Coupling » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement). Il associe le LPO (Laboratoire de Physique des Océans) et le LGGE (Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement). Le projet a débuté en janvier 2006 pour une durée de 36 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 136 k€ pour un coût global de 621 k€.

Production scientifique et brevets

- Bouttes N., *et al.*, 2011. Last Glacial Maximum CO₂ and delta C-13 successfully reconciled. *Geophys. Res. Lett.*, 38: 5.
- Ciais P., *et al.*, 2011. Inert carbon pool in the terrestrial biosphere during the last glacial maximum. *Nature Geosciences*, doi :10.1038/ngeo1324.
- Tagliabue A., *et al.*, 2010. On the importance of hydrothermalism to the oceanic dissolved iron inventory. *Nature Geosciences* 3: 252-256, doi:10.1038/ngeo818.
- Tagliabue A., *et al.*, 2009. Influence of light and temperature on the marine iron cycle: From theoretical to global modeling. *Global Biogeochem. Cycles* 23, GB2017, doi: 10.1029/2008GB003214.
- Tagliabue A., *et al.*, 2009. Evaluating the importance of atmospheric and sedimentary iron sources to Southern Ocean biogeochemistry. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L13601, doi: 10.1029/2009GL038914, 2009.
- Tagliabue A., *et al.*, 2009. Quantifying the roles of ocean circulation and biogeochemistry in governing atmospheric carbon dioxide at the last glacial maximum. *Clim. of the Past* 5:695-706.
- Tagliabue A., Bopp L., 2008. Constraining the spatio-temporal variability in ocean carbon-13. *Global Biogeochem. Cycles* 22, GB1025, doi:10.1029/2007GB003037.
- Tagliabue A., *et al.*, 2008. Ocean biogeochemistry exhibits contrasting responses to a large scale reduction in dust deposition. *Biogeosciences* 5: 11-24.

Programme « Jeunes Chercheurs, Jeunes Chercheuses », édition 2005

PCCC

Changement climatique
dans le système de HumboldtRégionaliser les simulations globales avec
scénarii climatiques pour mieux comprendre
les tendances de l'upwelling dans la région du
Pérou/Chili

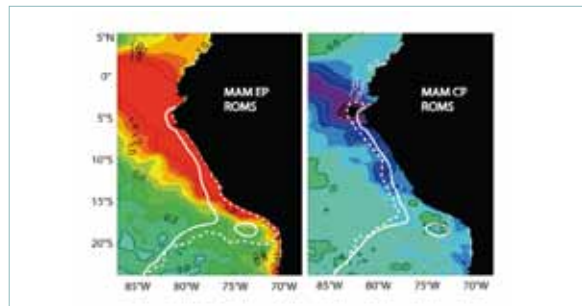
L'Océan côtier ne représente que 10% de la surface totale des océans et une part négligeable de leur volume total. Il concentre en revanche des activités économiques importantes, en particulier celles liées à la pêche. Parmi ces régions, les zones d'upwelling (remontée d'eau froide) ont un intérêt particulier parce qu'elles sont les plus productives en terme de pêche et pourraient influencer le climat global. Evaluer comment la circulation océanique de ces régions va évoluer dans un climat chaud est une question prioritaire pour la société et la communauté scientifique. Le projet PCCC s'est intéressé au système de Courants de Humboldt (côtes Pérou-Chili), la zone d'upwelling la plus productive au monde. L'approche mise en œuvre s'est appuyée sur la modélisation océanique à haute- résolution et les méthodes de régionalisation statistiques pour fournir des simulations océaniques régionales réalistes de l'évolution de l'upwelling côtier dans un climat en réchauffement. Les résultats ont permis de relier l'évolution de la variabilité équatoriale (en particulier celle associée aux événements El Niño) aux tendances de l'upwelling côtier ainsi que d'évaluer les limites actuelles des méthodes de régionalisation pour l'étude de l'impact du changement climatique dans ces régions.

Régionalisation statistique et dynamique : des
ré-analyses atmosphériques et océaniques
aux simulations climatiques avec scénario de
réchauffement

La régionalisation océanique se base sur un modèle océanique à haute- résolution (projet ROMS_Agrif, www.romsagrif.org) forcé aux frontières ouvertes par les produits de simulations globales et à l'interface air-mer par des forçages atmosphériques eux-mêmes régionalisés. La méthodologie mise en œuvre était donc constituée de deux étapes : une première étape tire partie d'une méthode statistique et des observations pour fournir des forçages atmosphériques à résolution suffisante pour appréhender de manière réaliste les mécanismes de l'upwelling (pompage et transport d'Ekman) et une seconde étape utilise ces forçages pour contraindre un modèle dynamique de la circulation océanique. La quantification des incertitudes des projections régionales atmosphériques réalisées a été obtenue par des simulations d'ensemble (12 modèles globaux du projet CMIP3-phase 3 d'intercomparaison des modèles couplés dans le cadre du GIEC). Le projet s'appuyait aussi sur une composante observationnelle (données *in situ* et satellitaires) pour la validation des modèles régionaux et l'interprétation des tendances (données « proxies » obtenues à partir de carottes sédimentaires prélevées au large du Pérou).

Résultats majeurs

Le projet a fourni pour la première fois des projections océaniques régionales pour le système de Humboldt aussi bien pour les conditions contemporaines que pour le climat futur. Ces simulations ont permis de mieux comprendre la sensibilité du système de courant



Conditions « typiques » (composites) de la température de surface de la mer simulées par un modèle océanique haute-résolution (ROMS au 1/12°) pour la période 1958-2008 pendant les événements El Niño dits « classiques » (ou El Niño du Pacifique Est) et pendant les événements El Niño dits « Modoki » (ou El Niño du Pacifique Central) pour la saison mars- avril-mai. La simulation océanique est forcée par les produits de vent régionalisés à partir des ré-analyses atmosphériques NCEP selon la méthode de Goubanova *et al.*, (2011) et par la ré-analyse océanique SODA aux frontières ouvertes.

PCCC « Peru Chile Climate Change » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LEGOS (Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales). Il associe le laboratoire LOCEAN (Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentations et Approches Numériques), l'IMARPE (Institut des Mers du Pérou) et l'IGP (Institut de Géophysique du Pérou). Le projet a débuté en janvier 2006 pour une durée de 36 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 120 k€ pour un coût global de 350 k€.

côtier à l'évolution de la circulation atmosphérique grande échelle ainsi qu'aux changements de propriété des événements El Niño. Les résultats appellent aussi à mieux prendre en compte l'effet du couplage océan- atmosphère à l'échelle régionale pour régionaliser les simulations climatiques globales. Le projet PCCC a permis de consolider les collaborations entre chercheurs français, péruviens et chiliens, et de structurer la communauté nationale autour de la question du changement climatique dans cette région.

Production scientifique et brevets

- Dewitte B., *et al.*, 2012. Change in El Niño flavors in 1958-2008: Implications for long term upwelling trend off Peru. *Deep Sea Res.*, (revised).
- Echevin V., *et al.*, 2011. Sensitivity of the Humboldt current system to global warming: A downscaling experiment with the IPSL_CM4 model. *Clim. Dyn.*, doi:10.1007/s00382-011-1085-2.
- Goubanova K., *et al.*, 2011. Statistical downscaling of sea-surface wind over the Peru-Chile upwelling region: diagnosing the impact of climate change from the IPSL-CM4 model. *Clim. Dyn.*, doi: 10.1007/s00382-010-0824-0.
- Gutierrez D., *et al.*, 2011. Coastal cooling and increased productivity in the main upwelling zone off Peru since the mid-twentieth century. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L07603, doi:10.1029/2010GL046324.

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2008

PEPS

Quel impact du changement climatique sur les ressources halieutiques du Pacifique Sud-Est ?

Régionaliser les scénarii climatiques en couplant une cascade de modèles physiques et biologiques

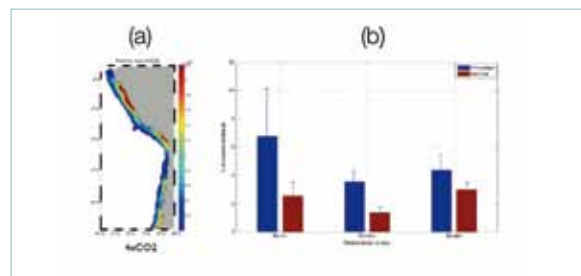
Les côtes du Pérou sont parmi les plus poissonneuses du monde. Cette richesse est liée aux vents côtiers qui, la plupart du temps, soufflent le long des côtes et génèrent localement un « upwelling » (i.e. une remontée d'eaux profondes, froides et riches en sels nutritifs). Dans ces régions tropicales, l'abondance de lumière et de nutriments produit une abondante floraison phytoplanctonique à la base d'un écosystème marin très riche et largement exploité par les pays limitrophes. La ressource, constituée principalement de petits pélagiques (sardines, anchois), connaît de très fortes fluctuations d'abondance à des échelles de temps allant de quelques années (par exemple pendant les événements El Niño-La Niña) à plusieurs décennies, forcées avec les fluctuations climatiques dans le Pacifique Nord. Il est donc important pour les pays du Sud d'étudier l'impact du changement climatique régional et ses conséquences sur l'écosystème marin. Les modèles océan- atmosphère globaux du GIEC produisent des simulations numériques de scénarii climatiques très utiles mais largement entachées d'incertitudes aux échelles régionales, en raison de leur maille trop grossière. Il convient donc de coupler une cascade de modèles régionaux à aire limitée, à même de mieux représenter les mécanismes physiques (atmosphère, océan), biologiques régionaux et forcés par des conditions de bord provenant des scénarii du GIEC.

Forçage physique atmosphérique et océanique et de la réponse de l'écosystème pour les scénarii climatiques pré-industriels et de fort réchauffement (4 x CO₂)

Une méthode statistique a permis de définir une fonction de transfert permettant de reproduire les fines échelles spatiales (~50 km) du vent de surface à partir des grandes échelles (~200-500 km), correctement représentées par les modèles du GIEC. Cette approche a été validée par une méthode dynamique beaucoup plus coûteuse en temps calcul, qui s'appuie sur le modèle régional atmosphérique (LMDZ). Ensuite, la régionalisation à des échelles de ~20 km de la circulation océanique et de la réponse planctonique a été effectuée avec le modèle régional ROMS, couplé au modèle biogéochimique PISCES. Enfin, les simulations produites ont été utilisées par deux types de modèles biologiques. Le premier (ICHTHYOP) s'appuie sur une hypothèse simple selon laquelle le renouvellement d'une population d'anchois est intimement lié à la survie de la nouvelle génération pendant le stade larvaire. Le deuxième modèle (SEAPODYM), plus complexe, représente explicitement la croissance, le déplacement actif et la prédation des individus juvéniles puis adultes dans différents habitats de l'écosystème. C'est l'articulation de ces différents modèles et processus qui permet d'estimer l'impact des modifications de l'environnement sur les ressources.

Résultats majeurs

Le résultat majeur du projet PEPS est méthodologique: il a permis de réaliser pour la première fois un tel couplage de modèles physiques et biologiques dans un système d'upwelling. Les mécanismes phy-



(a) Zone dite de « rétention » larvaire en scénario 4xCO₂. 3 zones côtières (nord, centre et sud) favorables à la survie des larves sont identifiables. (b) Variation du nombre de larves dans les zones nord (gauche), centre (milieu) et sud (droite), avec le changement climatique (scénario pré- industriel « froid » en bleu, 4xCO₂ « chaud » en rouge), en tenant compte des changements de circulation et d'abondance de nourriture (zooplancton) pour les larves.

PEPS « Peru Ecosystem Projection Scenarios » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LOCEAN (Laboratoire d'Océanographie et de Climatologie: Expérimentation et Approches Numériques). Il associe le LMD (Laboratoire de Météorologie Dynamique), EME (Ecosystème Marins Exploités), le LEGOS (Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales), le Département « Ecosystèmes Marins » de CLS-Argos et l'IMARPE (Instituto del Mar del Peru). Le projet a débuté en janvier 2009 pour une durée de 48 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 486 k€ pour un coût global de 2 M€.

siques et biologiques clés, de grande et de fine échelle qui déterminent les fluctuations de la ressource dans des scénarii climatiques idéalisés, ont été mis en évidence. Les pistes à poursuivre sont d'une part, le développement de la modélisation couplée régionale océan-atmosphère qui permettra de mieux prendre en compte les rétroactions locales de l'Océan sur la basse atmosphère et de lever les incertitudes sur les tendances futures en s'appuyant sur les nouvelles simulations du GIEC et d'autre part, de poursuivre le développement et la validation des modèles biologiques.

Production scientifique et brevets

- Albert A., *et al.*, 2010. Impact of nearshore wind stress curl on coastal circulation and primary production in the Peru upwelling system. *J. Geophys. Res.*
- Brochier T., *et al.*, 2011. Small pelagic fish reproduction in the Humboldt Current system under climate scenarios. *Global Change Biology* (submitted).
- Echevin V., *et al.*, 2011. Sensitivity of the Northern Humboldt Current System near shore modeled circulation to initial and boundary conditions. *J. Geophys. Res.*
- Echevin V., *et al.*, 2011. Sensitivity of the Humboldt Current system to global warming: a downscaling experiment of the IPSL-CM4 model. *Climate Dyn.*
- Hernandez O., *et al.*, 2011. Modeling the spawning habitat and larvae dynamics of Peruvian anchovy within the Eulerian SEAPODYM framework. *Ecological Modelling* (submitted).

Programme « Blanc », édition 2005

AMANDES

Les flux d'éléments chimiques
entre continent et océan : un challenge pluridisciplinaire**Comprendre les processus physico-chimiques
qui contrôlent les apports d'éléments vers
l'océan : l'exemple de l'Amazonie**

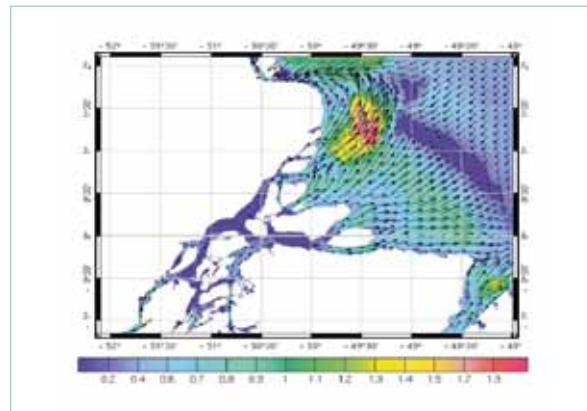
Déterminer la nature des flux chimiques entre continent et océan est fondamental: ces flux sont essentiellement portés par les sédiments, produits de l'érosion transportés par les fleuves vers le littoral, mais dont on connaît mal les processus qui induisent la libération d'éléments chimiques, de matière organique ou de contaminants vers le milieu marin. La compréhension de l'évolution de cette matière solide est primordiale pour une meilleure gestion de la qualité des eaux (douces comme marines) ainsi que pour quantifier les flux libérés par les continents vers les océans, lesquels jouent un rôle essentiel dans le contrôle du climat. L'embouchure de l'Amazonie est à ce titre un chantier idéal : caractérisée par de très forts apports continentaux mesurés régulièrement en amont, l'Amazonie délivre à l'Atlantique des éléments naturels qui peuvent servir de « traceurs de processus » ainsi que des contaminants comme le mercure. La circulation sur le plateau est très complexe, soumise à de violents courants océaniques et de marée. Or, la dispersion des éléments en mer dépend fortement de ces courants. La compréhension de ces processus constitue donc un défi pluridisciplinaire important.

**Campagnes en mer, séries temporelles,
données satellites, modélisation et mesures
géochimiques**

Les équipes impliquées ont conjugué leurs compétences pour tracer le devenir des espèces chimiques entre les domaines continental et océanique, en associant trois approches pour : i) développer des mesures d'éléments trace et d'isotopes pertinents pour tracer ces apports (Terres Rares, Nd, Ra, Hg...), ii) échantillonner la région grâce à quatre campagnes en mer (4 saisons différentes), avec déploiement de mouillages (courantométrie) et prélèvements d'eau et iii) développer un modèle de la dynamique dominée par la marée, cohérent avec les forçages locaux (fleuve, courants de bord ouest) et validé par les données de terrain (marégraphes, courants) et satellitaires. Le développement du modèle (T-UGOm) est fondé sur une grille « non structurée » autorisant une maille lâche en Océan ouvert et très fine près des côtes, particulièrement utile dans le cas de l'estuaire de l'Amazonie, à la géographie extrêmement complexe. Ce modèle a été validé par les données de marégraphes et satellitaires. En parallèle, ont été développées des mesures de traceurs géochimiques : chronomètres de processus, traceurs d'échange entre particules et solution. Bien que très complexe, le couplage de ces traceurs dans la circulation modélisée est une clé pour les objectifs du projet AMANDES.

Résultats majeurs

L'approche originale proposée par le projet AMANDES met en commun les compétences des dynamiciens, des modélisateurs et des géochimistes. Ces derniers ont développé des analyses fines de traceurs et de contaminants : chronomètres naturels du transfert vers



Simulation numérique hydrodynamique aux éléments finis, développée dans le cadre du projet AMANDES : instantané de l'intensité (m/s) et de la direction des courants au niveau de l'embouchure de l'Amazonie sous l'effet combiné de la marée (qui se propage profondément dans le système estuarien) et du débit du fleuve (environ 150 000 m³/s).

AMANDES « AMAzone-aNDES: weathering and transport of elements at the crucial land-sea interface » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LEGOS (Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales). Il associe le GET (Géosciences Environnement Toulouse) et le CEREGE (Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement) avec des collaborations avec les Universités de Recife et Brasília (Brésil). Le projet a débuté en janvier 2005 pour une durée de 42 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 386 k€ pour un coût global de 3 M€.

le large de la plume amazonienne, teneurs en mercure, traceurs de processus entre particules et solution. Les dynamiciens ont proposé une description améliorée de la circulation dans l'estuaire et sur le plateau amazonien, reproduisant les courants et les ondes de marée jusqu'à près de 300 km à l'intérieur des terres. Le couplage de ces deux informations (chimie et dynamique) permet une quantification originale des flux entre continent et océan.

Production scientifique et brevets

Bonnet M.P., Barroux G., Martinez J.M., Seyler F., Moreira-Turcq P., Cochonneau G., Melack J.M., Boaventura G., Maurice-Bourgoin L., Leon J.G., Roux E., Calmant S., Kosuth P., Guyot J.L., Seyler P., 2008. *J. of Hydrol.*, 349 (1-2): 18-30.
Le Bars Y., Lyard F., Jeandel C., Dardengo L., 2010. *Ocean Modelling* 31:132-149, doi:10.1016/j.ocemod.2009.11.001.
van Beek P., Souhaut M., Reyss J.L., 2010. *J. Env. Radioactivity* 101 : 521-529.
Bouchez J.L., Gaillardet J., France-Lanord C., Maurice L., Dutra M.P., 2011. *Earth and Planetary Sci. Lett.*, 311: 448-451.

CFCII F

Mieux comprendre l'impact des variations du niveau marin sur l'érosion côtière depuis 1950 et pour le 21^{ème} siècle

[illegible]

Observer et modéliser les variations du niveau marin pour les confronter aux observations de l'érosion

CECILE « Coastal Environmental Changes : Impact of sea Level rise » est un projet de recherche fondamentale à vocation finalisée coordonné par le BRGM (coordination du projet) et le LEGOS (coordination scientifique). Il associe le GAME (Groupe d'étude de l'Atmosphère Météorologique, Météo-France), le LIENsS (Laboratoire Littoral Environnement et Sociétés), le Bureau d'études CREOCEAN, le SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) et le CERFACS (Centre Européen de Recherche et de Formation en Calcul Scientifique). Le projet a débuté en janvier 2010 pour une durée de 45 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 866 k€ pour un coût global de 2,53 M€. Le projet est labellisé par le pôle de compétitivité « Aerospace Valley ».

localement importants comme c'est le cas pour les deux atolls. Des taux d'élévation supérieurs dans le futur modifieront peut-être les rôles respectifs de ces facteurs. Une conférence a aussi été co-organisée en novembre 2010 sur le thème des « Impacts du changement climatique sur les risques côtiers ».

Production scientifique et brevets

Becker M., *et al.*, 2012. Sea level variations at Tropical Pacific Islands during 1950-2009. *Global and Planetary Change* 80/81: 85-98.

Wöppelmann G., Marcos M., 2012. Coastal sea level rise in southern Europe and the non-climate contribution of vertical land motion. *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2011JC007469 (in press).

Meyssignac B., *et al.*, 2012. An assessment of two-dimensional past sea level reconstructions over 1950-2009 based on tide gauge data and different input sea level grids. *Surveys in Geophys.* (inpress).

Le Cozannet G., *et al.*, 2011. L'élévation récente du niveau marin et l'érosion côtière: le cas d'îles récentes du Pacifique. *Géosciences* 14.

Meyssignac B., *et al.*, 2011. Spatial trend patterns in observed sea level: internal variability and/or anthropogenic signature? *Climate of the Past* (submitted).

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2006

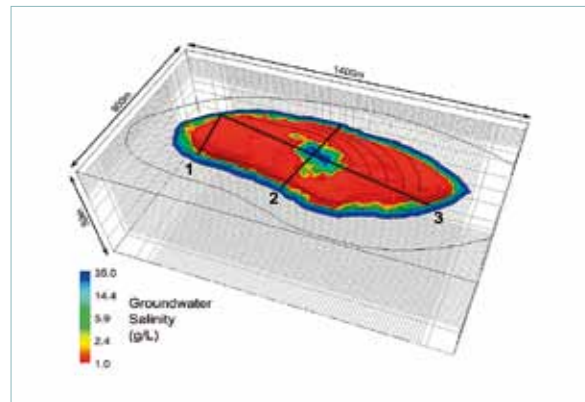
INTERFACE

Les îlots récifaux,
indicateurs de la vulnérabilité au changement climatique**A l'interface entre terre et mer, l'îlot récifal est un laboratoire des interactions du climat sur l'environnement**

La remontée du niveau marin est sans doute la conséquence la plus significative de l'impact du changement climatique en cours et les petites îles de la zone intertropicale sont déjà fortement impactées. Pourtant, les relations de causes à effets restent difficiles à mettre en évidence. Pour répondre à cette question, le projet INTERFACE s'est appuyé sur une approche expérimentale impliquant les sciences de la terre et du vivant. Il s'est ainsi attaché à caractériser la variabilité des indicateurs potentiels de la vulnérabilité du milieu. Parmi ceux-ci, le suivi de la qualité des eaux souterraines côtières constitue une focale d'approche originale dont l'intérêt est étudié au regard d'autres indicateurs plus usuels. Le projet a contribué à proposer de nouveaux outils pour évaluer et simuler l'aléa climatique et son impact sur ces environnements insulaires.

Caractériser des milieux physiques et biologiques éloignés et isolés par des stations automatiques de mesure

Le projet INTERFACE a été développé sur deux îles coralliennes choisies dans la même province océanique (Indopacifique) mais soumises à différents régimes climatiques dans l'Océan Indien (Grande Glorieuse) et l'Océan Pacifique (Nouvelle Calédonie). Ces deux sites sont isolés de toute action anthropique directe. Sur ces îlots, biologistes et géologues ont implanté plusieurs stations d'observation (continue ou périodique) dont l'évolution du caractère observé a pu être mise en relation avec les données climatiques ou océaniques enregistrées à très haute fréquence. Sur les deux îles, l'équipement commun réalisé comprenait cinq forages suivis en continu en température, pression et conductivité électrique, une station océanographique sous-marine (marégraphe, courantomètre, station vidéo sous-marine à enregistrement continu) et des stations terrestres de profil de plage. Au cours des missions d'entretien des stations, des mesures complémentaires ont été effectuées et ont permis d'évaluer l'hétérogénéité spatiale des îlots (profils géophysiques et topographiques, transects de référence pour l'évaluation de la biodiversité).



Rôle de l'évapotranspiration sur le développement d'une lentille d'eau douce, intrusion salée au centre d'un îlot (Comte *et al.*, 2010).

INTERFACE « Suivi de la lentille d'eau douce comme indicateur de la vulnérabilité des systèmes insulaires récifaux » est un projet de recherche fondamentale coordonné par l'Université d'Avignon (via l'Unité EMMAH : Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes de l'INRA). Il a associé l'Université de la Réunion et l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement). Le projet a débuté en janvier 2007 pour une durée de 57 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 500 k€ pour un coût global de l'ordre de 2 M€.

Résultats majeurs

Les mesures et les simulations numériques effectuées sur l'hydro-système ont montré l'influence de l'évapotranspiration, comme variable essentielle de l'existence et de la résilience des nappes d'eau douce et de la vulnérabilité de ces milieux insulaires au changement climatique. Par ailleurs, l'analyse des données obtenues à très haute fréquence a permis d'améliorer les techniques d'échantillonnage utilisées dans les suivis environnementaux.

Production scientifique et brevets

Le projet a conduit à la production de 9 articles dans des revues internationales à comité de lecture, à 19 communications dans des congrès internationaux ainsi qu'à de nombreuses actions de valorisation nationale dont un film scientifique de 52 mn (http://www.audiovisuel.ird.fr/fiches_film/eau_iles.htm). Les résultats ont également été valorisés par un brevet international portant sur une caméra vidéo sous-marine autonome (Patent Cooperation Treaty n° WO 2011/055099 - juin 2011).

Programme « Blanc », édition 2005

DAY RIVER

Impact de l'urbanisation et des pratiques agricoles sur la dégradation du delta du Fleuve Rouge (R.S. VIETNAM)

Origine, nature et impact des pollutions

La dégradation de la qualité des eaux douces, en particulier l'eutrophisation due aux apports de phosphore et d'azote induits par les rejets agricoles, urbains et industriels non maîtrisés, augmentés de l'érosion et du lessivage des sols, représente un des problèmes environnementaux majeurs en Asie du Sud -Est. Le projet DAY RIVER, qui s'inscrit dans la suite d'une action pluriannuelle de formation de jeunes chercheurs Vietnamiens en France (9 thèses de doctorat en cotutelles), répondait à une demande de coopération dans le cadre d'un développement durable de l'agriculture et de l'urbanisation de la région d'Hanoi. Une double démarche a été mise en œuvre : i) la caractérisation *in situ* des bilans hydrologiques et biogéochimiques grâce à l'utilisation, et au développement, de méthodes de mesures performantes (sites de mesures automatiques et continues avec sondes et préleveurs; bateau avec sonde multi capteurs et GPS ; débitmètre à effet Doppler ; pièges à sédiments et cloche benthique), ii) la réalisation d'une série d'enquêtes au niveau des municipalités, des industries et des exploitations agricoles pour définir une base de données géoréférencées permettant de quantifier les flux d'émission de polluants et les pratiques grâce au développement d'un modèle hydrobiogéochimique de cet ensemble complexe.

Mise au point et application d'un modèle prédictif géo-référencé

Dans le prolongement d'un modèle du fonctionnement biogéochimique du bassin amont du Fleuve Rouge développé précédemment dans une thèse en co-tutelle, le modèle Seneque / Riverstrahler du bassin de la DAY RIVER, principal défluent de la rive droite du Delta, a été élaboré. Une base de données spatialisée des contraintes géomorphologiques et hydrométéorologiques, ainsi que des apports diffus et ponctuels a été élaborée, la difficulté majeure étant la représentation numérisée aussi fidèle que possible du réseau hydrographique, très complexe dans ce Delta, soumis à une forte artificialisation et à l'influence des marées. Le modèle a été validé à partir de la synthèse de travaux antérieurs de modélisation et de mesures directes *in situ*. Deux applications ont été réalisées : i) l'établissement d'un bilan des transferts d'eau, de matières en suspension et de nutriments entre les différents sous-bassins, ce qui a permis d'identifier les zones particulièrement sensibles au niveau de l'émission des pollutions, ii) l'élaboration de scénarii de l'évolution future du bassin versant du Fleuve Rouge et de son Delta, prenant compte des modifications de pratiques.

Résultats majeurs

Le bilan hydrologique et de détritaments (N, O, Si) du Delta ont permis d'identifier la pression anthropique sur la ressource en eau et sa qualité et ce, par sous-bassin. Les apports par le lessivage des sols (agricoles et forestiers) et par les effluents domestiques et industriels ont montré l'importance des rejets lessiviels. Une base de données géo-référencées a permis de modéliser le bassin le plus anthropisé de la rive gauche du Delta et d'étudier des scénarii d'évolution future, devenant ainsi un outil disponible pour étudier de nouvelles questions scientifiques. En outre, le projet a permis la réalisation d'un doctorat en cotutelle.



La rivière Day dans le delta du Fleuve Rouge.

DAY RIVER « Influence des rejets urbains et agricoles sur l'eutrophisation dans la zone deltaïque du Fleuve Rouge, Vietnam) est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LTHE (Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement). Il associe les Unités SISYPHE (Structure et Fonctionnement des Systèmes Hydrologiques), BloEMCO (Biogéochimie et Ecologie des Milieux Continentaux), ECU (Erosion et Changements d'usage de l'IRD) et, côté Vietnamiens, les Instituts de Technologie de l'Environnement (IET) et de Chimie (IC) de l'Académie des Sciences et Technologie du Vietnam, VAST, en collaboration avec l'Institut de Météorologie, Hydrologie et Environnement (IMHE) du Ministère des Ressources Naturelles et de l'Environnement (MONRE). Le projet a débuté en janvier 2006 pour une durée de 36 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 140 k€ et de 60.000 US\$ côté Vietnamiens.

Production scientifique et brevets

Le Thi Phuong Q., Garnier J., Billen G., Théry S., Chau Van M., 2007. Hydrological regime and suspended load of the Red River system (Vietnam): observation and modelling. J. Hydrol., 334: 199-214.
Le Thi Phuong Q., Billen G., Garnier J., Théry S., Ruelland D., Nguyen X.A., Chau V.M., 2010. Modelling nutrient transfer in the sub-tropical Red River system (China and Vietnam): implementation of the Seneque/Riverstrahler model. Asian Earth Sci. J., 37: 259-274.
Luu Thi Nguyet M., Garnier J., Billen G., Orange D., Nemery J., Le Thi Phuong Q., Tran Hong Thai, Le Lan Anh, 2010. Hydrological regime and water budget of the Red River delta (Northern Vietnam). Asian Earth Sci., J., 37: 219-228.
Luu Thi Nguyet M., 2010. Water quality and nutrient transfers in the continuum from the upstream Red River basin to the Delta: budget and modeling. PhD Univ. Paris 6, 29 september.

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2006

CHACCRA

Influence humaine et climatique sur le devenir des apports fluviaux en Méditerranée

Mesurer, comprendre et modéliser les apports du Rhône et leur devenir en Méditerranée et estimer leur sensibilité aux pressions humaines et climatiques

Depuis 150 ans, la révolution agricole et l'urbanisation des territoires ont profondément modifié les apports des fleuves aux Océans, en quantité et en qualité. En favorisant l'érosion des sols et l'export de particules carbonées, en utilisant massivement les engrais pour accroître la production agricole, l'homme a altéré son environnement à la fois sur le continent et dans les zones côtières. Ceci a entraîné l'eutrophisation du domaine côtier et ses conséquences : floraisons d'algues toxiques, développement de zones anoxiques détruisant les écosystèmes, contamination de la chaîne trophique. Le changement climatique en cours va modifier le régime des fleuves, la fréquence des périodes de sécheresses et de pluies intenses et influencer sur ces systèmes déjà fragilisés. Dans un but d'adaptation à ces changements, il est essentiel de comprendre le devenir des apports organiques et des sels nutritifs apportés par les fleuves au milieu marin. Nous avons entamé une étude du système Rhône- Méditerranée en couplant des mesures sur les trois grandes composantes du système qui sont le fleuve, le panache fluvial en mer et la zone benthique. Un effort de modélisation a été entrepris pour synthétiser les résultats, évaluer les modifications futures et estimer l'importance des apports de crue.

Etude intégrée du système Rhône-Méditerranée couplant des mesures sur le fleuve, le panache fluvial en mer, la zone benthique et la modélisation

La méthodologie a consisté en l'obtention simultanée de données dans le fleuve, le panache fluvial en mer et dans les sédiments, couplée à un modèle représentant la circulation et la biologie du système Rhône- Méditerranée. Les données d'apport du fleuve en carbone et nutriments ont été acquises en continu pendant trois ans à la station d'Arles, avec une fréquence journalière. Des campagnes océanographiques réparties sur deux ans ont permis d'appréhender les variations basses fréquences du système et de mener des études de processus sur le panache et les sédiments. L'intégration des données dans un modèle a permis d'envisager le devenir des apports du Rhône en Méditerranée dans toutes ses composantes. Il est apparu que l'accumulation de phytoplancton est largement contrôlée par le zooplancton mais aussi par les virus dans toutes les couches d'eau. Par ailleurs, la variabilité temporelle du panache à haute fréquence (la journée) domine le devenir des nutriments issus du fleuve et est extrêmement liée à la physique (vent, hydrologie). Le couplage de ces résultats avec la modélisation indique qu'une stratégie d'étude de ces panaches fluviaux fondée sur des séries temporelles haute fréquence (sub-journalière) serait la seule à même de résoudre la dynamique biogéochimique du panache. La partie sédiment du système sert d'intégrateur temporel mais l'importance des événements de crue a pu être mise en évidence.



Limite du panache turbide du Rhône lors de la crue exceptionnelle de mai 2008 prise du NO Tethys II. A gauche les eaux « bleues » de la Méditerranée, à droite les eaux « brunes » du Rhône.

CHACCRA « Climate and Human-induced Alterations in Carbon Cycling at the River-seA connection » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement). Il associe le CEREGE (Centre Européen de Recherche en Géosciences de l'Environnement), le COM (Centre Océanologique de Marseille), le LA (Laboratoire d'Aérodynamique), le LOBB (Laboratoire Océanographie Biologique de Banyuls), le CEFREM (Centre Européen de Formation et de Recherche sur l'Environnement Marin), le LGE (Laboratoire de Géochimie des Eaux), le BIAF (Bio-Indicateurs Actuels et Fossiles), l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire) et l'Ifremer-Brest (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer). Le projet a débuté en janvier 2007 pour une durée de 42 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 765 k€ pour un coût global de 2,8 M€.

Résultats majeurs

Le projet a montré que les bilans de matière pour les nutriments et le carbone issus des fleuves sont largement dominés pour les particules par le dépôt et le recyclage dans les sédiments alors que la production marine fondée sur les nutriments du panache est exportée hors de la zone côtière ou recyclée sur place. L'importance de la variabilité temporelle (crue, coup de vent, hydrologie) influencée par le changement climatique indique que des nouvelles méthodologies de mesure en continu capables de capturer cette variabilité sont à mettre en place.

Production scientifique et brevets

Outre que CHACCRA ait fait l'objet d'un volume spécial de la revue Biosciences, citons :

- Lansard B., et al., 2009. Estuar. Coast. Shelf Sci., 81: 544-554.
- Rabouille C., et al., 2008. Contin. Shelf Res., 28: 1527-1537.
- Kim J.H., et al., 2010. Limnol. Oceanogr., 55 : 507-518.
- Goineau A., et al., 2011. J. Sea Res., 65: 58-75.
- Cathalot C., et al., 2010. Biogeosci., 7: 1187-1207.
- Pastor L., et al., 2011. Contin. Shelf Res., 31: 1008-1019.

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2006

VULSACO

Vulnérabilité des plages sableuses face aux changements climatiques et pressions anthropiques

Evaluer la sensibilité des plages face aux changements climatiques et anthropiques à l'échéance de 2030

La dynamique de la zone littorale est directement dépendante des vagues et des courants. Ces facteurs hydrodynamiques sont quant à eux liés à la dynamique du système océan- atmosphère, et donc à l'évolution du climat, aussi bien en termes de variabilité climatique que de changements climatiques. Ainsi, les systèmes côtiers devraient être fortement vulnérables à ces derniers. C'est dans ce contexte que le projet VULSACO avait pour objectif d'une part, d'identifier et d'estimer des indicateurs de vulnérabilité physique à l'érosion et à la submersion marine pour les côtes sableuses basses, face au changement climatique à échéance des années 2030. D'autre part, le rôle aggravant ou modérateur que peut avoir le facteur d'occupation humaine du littoral sur cette vulnérabilité a été étudié. Les échelles temporelles vont du court- terme (quelques jours) au moyen-terme (décennies). Le projet est basé sur l'étude de quatre plages sableuses métropolitaines, à savoir les plages du lido de Sète (34), du Truc Vert (33), de La Tresson (85) et de Dewulf (59). Ces sites sont caractérisés par des environnements hydrodynamiques et socio-économiques représentatifs des plages sableuses basses métropolitaines.

Collecter, observer, mesurer, analyser et modéliser la vulnérabilité des plages sableuses

Une approche commune aux quatre sites a été adoptée. Tout d'abord les caractéristiques physiques, environnementales et socio-économiques de chaque site ont été identifiées. Ensuite, une analyse des données physiques passées (trait de côte, volume de plage,...) a été réalisée pour identifier l'existence ou non de tendances ou corrélations entre la dynamique des plages et le climat. La vulnérabilité des sites par rapport aux changements climatiques possibles futurs a alors été estimée, en utilisant deux approches : la modélisation numérique morpho-dynamique et l'étude de la gouvernance. Des modèles numériques reproduisant les courants, les vagues et les évolutions topo-bathymétriques des plages ont été mis en place afin d'étudier le comportement physique du système pour le climat actuel et pour des scénarios « futurs ». L'analyse des prises de décision par les parties prenantes s'est appuyée sur des questionnaires, des interviews et des ateliers de mise en situation. Enfin, sur la base de la caractérisation des sites, des analyses de données passées, de la connaissance de chaque site et des résultats de modélisation, une revue des indicateurs existants a été réalisée dans la perspective d'une application sur les quatre sites pour estimer leur vulnérabilité à l'échelle d'un événement et à moyen- terme. Ces éléments ont aussi été utilisés pour proposer de nouveaux indicateurs.



Article journalistique fictif utilisé lors de l'Atelier de mise en situation des parties prenantes pour le site du Truc Vert.

VULSACO « VULnerability of SANDy COast to climate change and anthropic pressure » est un projet de recherche fondamentale à vocation finalisée coordonné par le BRGM. Il associe le Bureau d'étude BRL Ingénierie, l'Association Sans But Lucratif SYMLOG, ainsi que les laboratoires EPOC (Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux), LOG (Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences), IMAGES (Institut de Modélisation et d'Analyse en Géo-Environnement et Santé), Géosciences Montpellier, LEGI (Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels) et LETG (Littoral, Environnement, Télédétection, Géomatique). Le projet a débuté en juin 2007 pour une durée de 42 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 793 k€ pour un coût global de 2,28 M€.

Résultats majeurs

Le projet, mené dans le cadre d'un partenariat public- privé de qualité, a conduit tout d'abord à une meilleure compréhension du comportement des plages aussi bien sur la base d'observations *in situ* que par modélisation numérique. Il a également mis en évidence la sensibilité des plages aux directions des vagues. L'étude de la gouvernance a fait ressortir entre autres choses, la notion de seuil de risque acceptable. Enfin, l'application d'indicateurs de la vulnérabilité à l'érosion/submersion a montré ses limites pour hiérarchiser la vulnérabilité de plages sableuses dans un contexte de changement climatique.

Production scientifique et brevets

Le projet a donné lieu à une quinzaine d'articles publiés ou soumis dans des revues scientifiques internationales et à plus de 35 communications scientifiques nationales et internationales. Il a par ailleurs, fait l'objet de nombreux communiqués dans différents médias (TV, radio, presse). Une conférence a aussi été co-organisée en novembre 2010 sur le thème des « Impacts du changement climatique sur les risques côtiers ».

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2007

MISEEVA

Conséquences des submersions marines liées au changement climatique, selon les stratégies d'adaptation

Evaluer l'impact social, économique et environnemental de l'augmentation de l'aléa de submersion marine dans un contexte de changement climatique

Alors que la modélisation du changement climatique à venir anticipe une élévation du niveau de la mer de l'ordre du mètre, celle relative au futur régime des tempêtes est moins précise. On peut anticiper que l'effet cumulé de ces forçages induit un risque progressivement croissant de submersion. Le projet MISEEVA, appliqué à la région Languedoc-Roussillon, appréhende ce risque à venir de façon holistique, aux échéances de 2010, 2030 et 2100. Il s'est agi : i) de définir les différents types d'exposition selon les forçages considérés (élévation du niveau de la mer, marées, surcotes de tempête), ii) d'évaluer la vulnérabilité spécifique des enjeux exposés, en termes de processus et de coût des dommages et iii) d'évaluer la capacité de réponse des décideurs et la représentation du risque de la population. Pour pouvoir transposer cette analyse aux échéances proposées, il a été nécessaire de se fonder sur des hypothèses d'évolution démographique et économique, et d'imaginer des futurs possibles selon les perspectives de gestion du risque. Le projet a visé à évaluer la vulnérabilité du littoral à la submersion dans le contexte à venir du changement climatique et, en dépit de l'incertitude qui accompagne une telle démarche prospective, d'envisager l'impact de choix futurs de gestion sur cette vulnérabilité.

Evaluation croisée de l'exposition des enjeux actuels et futurs à la submersion et des conséquences sociales économiques et environnementales

Les méthodes ont été élaborées par un questionnement interdisciplinaire poussé, appuyé sur le choix de vocabulaires communs, d'outils SIG facilitant les échanges et la compilation de données de nature différente. La définition de l'exposition à la submersion permanente ou récurrente a été faite en choisissant des scénarii d'élévation du niveau de la mer en 2100 (GIEC, 2007). L'exposition aux submersions exceptionnelles, liées aux tempêtes est estimée à partir de la surcote qui se cumulerait à ces élévations (modélisée ou calculée à partir des valeurs de forçage d'une tempête centennale de référence), à l'échelle régionale puis locale. L'analyse socio-économique et environnementale a pris en compte, selon les types d'exposition, les dommages potentiels sur la population côtière, l'habitat résidentiel ou permanent, les activités économiques, la ressource en eau, les zones humides et les plages. Diverses méthodes de valorisation directe ou contingente de ces enjeux ont été croisées pour obtenir une estimation du coût des dommages. La capacité d'adaptation à la submersion est évaluée en analysant la capacité de réponse des décideurs sur la base des documents prospectifs régionaux et d'interviews, ainsi que la représentation du risque et la capacité de réaction qu'a la population résidente actuelle de la zone exposée. Les conséquences possibles en termes de dommages et de coût des dommages ont été appréciées en imaginant différentes perspectives de stratégies de gestion du risque (dénai, laisser-faire, protection totale, retrait stratégique).



Modélisation d'une submersion exceptionnelle sur le lido de Palavas (hauteur de la surcote en m) liée à une tempête en 2100 (hypothèse d'élévation de la mer de 1 m et conditions météorologiques de la tempête de référence novembre 1982 en Méditerranée).

MISEEVA « Marine Inundation hazard exposure and Social, Economic and Environmental Vulnerability Assessment in regard to global change » est un projet de recherche fondamentale à vocation finalisée coordonné par le BRGM. Il associe le LAMETA (Laboratoire Montpellierain d'Economie Théorique et Appliquée), la MESHS (Maison Européenne des Sciences Humaines et Sociales), le LVMT (Laboratoire Ville Mobilités Transports), EPOC (Environnements et Paléo-environnements Océaniques) et la société SOGREAH (Groupe Artelia). Le projet a débuté en janvier 2008 pour une durée de 48 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 711 k€ pour un coût global de 1,87 M€.

Résultats majeurs

Le projet a permis d'acquies, dans le cadre d'un partenariat public-privé, une vision holistique et prospective de l'évolution du risque de submersion dans la région du Languedoc-Roussillon, et de souligner l'importance des choix futurs de gestion du risque sur la vulnérabilité du littoral et les coûts des dommages potentiels. Des approches méthodologiques, tant au niveau des modélisations, qu'en croisant des méthodes de valorisation marchandes et non-marchandes des enjeux et des dommages ont été développées. Imaginer les futurs possibles quant à la gestion du risque, à la lumière de l'évaluation des capacités d'adaptation, a été une étape importante pour donner aux résultats leur dimension prospective, montrant les différentiels de dommages selon des stratégies et des gains relatifs pour certains enjeux (zones humides). Une conférence a aussi été co-organisée en novembre 2010 sur le thème des « Impacts du changement climatique sur les risques côtiers ».

Production scientifique et brevets

Parmi la quinzaine de publications parues dans des revues internationales, citons :

Baron-Yellès N., 2011. In Clément François (Ed). Presses Universitaires de Rennes :285-302.

Hellequin A.P., *et al.*, 2012. Natures Sciences Sociétés (in press).

Bonneton P., *et al.*, 2011. Phys., 230 (4): 1479-1498, doi:10.1016/j.jcp.2010.11.015.

Tessier M., *et al.*, 2012. J. Coastal Res. SI64 (in press).

* Prix de la meilleure thèse au Colloque International « Coastal Engineering » (Shanghai, 2010).

Programme « Gestion et Impacts du Changement Climatique », édition 2008

ADAPTALITT

Une contribution du croisement aléas/perception aux analyses de vulnérabilité

Prendre en compte les compétences cognitives et expérientielles des habitants : quels enjeux ?

Les compétences cognitives, expérientielles des habitants sont rarement prises en compte dans les études de vulnérabilité. Un des enjeux majeurs des espaces littoraux est la forte pression urbaine aggravant les risques : il convient déjà de comprendre les motivations des habitants à vouloir habiter ces territoires. Ensuite, s'adapter aux risques et in fine aux changements climatiques, nécessite une reconnaissance de ces effets sur les milieux de vie : autrement dit comprendre la capacité des habitants à percevoir ces perturbations et à les mettre en relation avec les changements climatiques. Les populations littorales risquent d'être les premières à être touchées par les phénomènes accélérés d'érosion côtière. Au vu de ces enjeux, on peut penser que les politiques publiques « climatiques » seront plus contraignantes quant aux pratiques en matière d'urbanisation et de prévention des risques. Cependant la non-prise en compte des populations concernées risque d'aboutir à un rejet pur et simple des décisions. Sans être prescriptive, la recherche en sciences humaines peut aider à mieux prendre en compte ce vécu.

Quels critères de choix pour l'étude ?

Le choix du collectif de recherche s'est porté sur deux sites littoraux (Gâvres-Morbihan et Guisseny-Finistère Nord) selon les critères suivants : i) milieux connaissant une tendance à l'érosion-submersion (cordons dunaires étroits, falaises meubles, zones basses etc.) pouvant s'accroître dans la perspective des changements climatiques et subissant des dommages récurrents mais aussi exceptionnels (i.e. la tempête Johanna le 10 mars 2008), ii) terrains présentant des caractéristiques socio-démographiques variées (i.e. ruraux, urbains, habitants en résidence secondaire, principale etc...), iii) zones faisant l'objet de politiques de protection et de prévention contre les risques d'une part, d'une appropriation et d'un fort attachement des habitants d'autre part, ainsi que de la présence de controverses. Le projet avait pour objectifs : la prise en compte des aléas comme pleinement constitutifs de la vulnérabilité, l'analyse de la vulnérabilité par la question du sensible et la mise en œuvre d'une expérimentation de recherche participative.

Résultats majeurs

Le projet a développé une approche de la perception entendue non pas sous l'angle de la seule subjectivité, mais comme une compétence cognitive située entre l'objectif et le subjectif. Un entre-deux permettant de faire tenir ensemble la dimension physique du climat et sa dimension expérientielle et ce, par la caractérisation i) des niveaux d'eaux récurrents et exceptionnels mis en perspective 2100, ii) des systèmes d'artificialisation littoraux et des logiques de prises d'action sur ces milieux, iii) des modalités de perception de l'environnement proche (éléments, transformations de l'espace) et informée par les imaginaires de l'eau et de la submersion. Les modalités d'existence du changement climatique (plausibilité/causalité/ambiance/fiction) sont également développées.



Gâvres (56), source, GEOS, 2009.

ADAPTALITT « Capacités d'adaptation des sociétés littorales aux risques d'érosion submersion en prise avec les changements climatiques » est un projet de recherche fondamentale coordonné par PACTE (Laboratoire de Recherche en Sciences Sociales/UJF- Grenoble). Il associe le LETG (Littoral, Environnement, Télédétection, Géomatique), le CRES-SON (Centre de recherche de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture), le CERSES (Centre de Recherche Sens, Ethique et Société) et le GSPM (Groupe de Sociologie Politique et Morale/EHESS). Le projet a débuté en février 2010 pour une durée de 28 mois. Il a bénéficié d'un financement du GICC de 181 k€ pour un coût global de 331 k€.

Production scientifique et brevets

Fodor F., 2012. Les jeunes face au changement climatique dans l'imaginaire romanesque. *Communication et Langues*, N° 172, pp 83-95.

Lolive J., Tricot A., 2012. Habiter l'espace public à l'ère de l'image : la vie politique des formes. In A. Krasteva et G. Rouet (dir.), *Medias Internet, Démocratie, l'Harmattan*, coll. Local et global (A paraître).

Meur-Ferec C., Henaff A., Lageat Y., Leberre I., 2012. Changement climatique et dynamique géomorphologique des côtes bretonnes : l'imbrication d'échelles spatio-temporelles. *Cybergeogéographie* (A paraître).

Tricot A., Lolive J., 2012. Artificialisation, controverses et trajectoires d'actions. Contribution à l'ouvrage collectif « L'adaptation au changement climatique : les défis d'une approche intégrée pour les territoires ». L. Rocher, F. Bertrand et P.I.E. Peter Lang Eds. (A paraître)

Programme « Blanc », édition 2006

VASIREMI

Le biofilm des vasières intertidales :
construction, production et devenir dans l'écosystème**Avoir une vision intégrée du fonctionnement
écologique des vasières intertidales en étudiant
le déterminisme et le devenir du biofilm**

Les vasières intertidales sont un système clé formant la transition entre le bassin versant et l'Océan. Leur forte productivité est liée à l'activité d'un biofilm d'algues, dont le fonctionnement et le devenir sont assez bien connus. En revanche, le déterminisme et le devenir de la production bactérienne associée à la sécrétion d'exopolymères sont peu connus. L'objectif du projet VASIREMI était d'obtenir une vision intégrée du fonctionnement écologique de ces vasières en se focalisant sur le compartiment bactérien. Il a permis une compréhension du fonctionnement : i) de la production bactérienne associée aux exopolymères du biofilm, ii) du contrôle par les virus, iii) de la consommation du biofilm par les organismes benthiques et les vecteurs biotiques vertébrés (mulets et oiseaux), iv) de l'érosion et la remise en suspension du biofilm et v) des interactions entre microorganismes planctoniques et benthiques remis en suspension dans la colonne d'eau.

**Des approches couplées physique-écologie en
laboratoire, sur le terrain et de modélisation**

Les vasières étant des milieux peu profonds, il est nécessaire de coupler une approche physique de la remise en suspension et du transport hydrodynamique dans la colonne d'eau à des études de processus trophiques pour en comprendre le fonctionnement global. Des mises au point méthodologiques ont porté sur : i) la mesure physiologique de la photosynthèse des algues, ii) l'extraction des exopolymères du sédiment, iii) l'énumération des virus benthiques, iv) le broutage des bactéries par un marquage des proies bactériennes, v) le broutage du biofilm par les vecteurs biotiques: capture d'oiseaux et étude de l'impact du mulot (en mésocosme) et vi) la calibration de l'érodimètre sur des sédiments naturels. Les mesures des processus trophiques ont concerné le benthos et le pelagos par des approches directes de consommation, par la décroissance des stocks de proies en incubation, par des suivis de traceurs naturels et par des mesures d'enrichissement de consommateurs nourris de proies marquées artificiellement. L'intégration des résultats physiques et écologiques, benthiques et pélagiques a été réalisée par une approche multi-modèles combinant la modélisation dynamique de l'écosystème couplant les processus trophiques et de production à ceux de la remise en suspension et du transport par advection des flux de matière.

Résultats majeurs

Alors qu'à l'échelle saisonnière, les biomasses des algues et des bactéries sont positivement reliées, à l'échelle de la journée, les phases productives des bactéries sont des phases où les algues ne sont pas actives, principalement aux marées hautes. En effet, des exopolymères liés inhiberaient la production bactérienne. La régulation de l'oxygénation des sédiments par la marée avec des périodes de fortes limitations aux moments des étiages, suggère la possibilité d'un contrôle de la production bactérienne durant ces phases. Les virus benthiques lysent entre 11 et 40% de la production bactérienne. Il apparaît que la production bactérienne du sédiment n'est que très

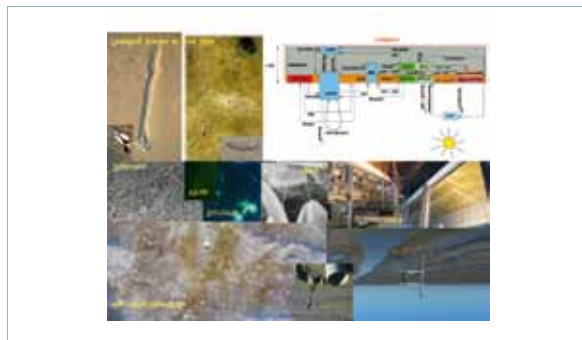


Schéma de fonctionnement écologique des vasières et exemple de dispositifs expérimentaux mis en œuvre.

VASIREMI « Trophic significance of microbial biofilms in tidal flats » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LIENSs (Laboratoire Littoral, Environnement et Sociétés). Il associe l'UCBN (Université de Caen Basse-Normandie) et l'OOB (Observatoire Océanologique de Banyuls sur Mer). Le projet a débuté en novembre 2006, pour une durée de 55 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 540 k€ pour un coût global de 2,44 M€.

peu intégrée au réseau trophique benthique avec 3 à 6% de la production consommée. Les consommateurs benthiques montrent une grande stabilité dans leur alimentation, les algues représentant entre 35 et 70% des ressources. A marée basse, le Tadorne de Belon, se nourrit principalement de la macrofaune et de végétaux et le réseau trophique hivernal peut subvenir aux besoins nutritifs des oiseaux limicoles migrateurs. A marée haute, les mulets, exportateurs de matière, s'alimentent principalement sur la micro-méiofaune et en faible proportion sur le biofilm. Les masses d'eau traversant le bassin de Marennes-Oléron s'enrichissent par remise en suspension en microorganismes autotrophes, l'hiver étant plus favorable à cette exportation vers la colonne d'eau. La remise en suspension stimule toujours l'activité de la boucle microbienne planctonique. Le shunt viral n'est stimulé qu'en période estivale. Le mésozooplancton ne se nourrit que sur des proies très productives, modifiant ainsi leur production. Le projet montre combien le biofilm supporte la production secondaire et tertiaire du bassin de Marennes-Oléron.

Production scientifique et brevets

Citons notamment :

- Pascal P.Y., *et al.*, 2009. Seasonal variation in consumption of benthic bacteria by meio- and macrofauna in an intertidal mudflat. *Limnol. Oceanogr.*, 54: 1048-1059.
- Takahashi E., *et al.*, 2009. Optimising extraction of extracellular polymeric substances from diatoms: comparing seven methods. *Marine and Freshwater Res.*, 60: 1201-1210.
- Lefebvre S., *et al.*, 2011. Duration of rapid light curves for determining activity of microphytobenthos biofilm *in situ*. *Aquatic Botany* 95 : 1-8.

Programme « Blanc », édition 2009

CHIVAS

La coquille Saint-Jacques archive chaque jour les variations de son environnement

Calibration et utilisation des traceurs de la production primaire pélagique et benthique

L'objectif général du projet est la calibration puis l'application de plusieurs proxies de la production micro-algale des marges continentales, à une échelle journalière. L'utilisation de proxies pour reconstruire les processus physiques et biologiques qui se déroulent au niveau des marges continentales est essentielle compte tenu du rôle qu'elles jouent : i) dans les cycles biogéochimiques du carbone et des éléments biogènes associés (rôle de source ou puits, filtre vis-à-vis des apports continentaux) et ii) dans la production de ressources halieutiques. Ils sont aussi d'un grand intérêt pour replacer les observations actuelles dans une perspective à plus long terme afin de déconvoluer les signaux naturels et anthropiques. CHIVAS propose d'exploiter de nouveaux proxies et d'en affiner d'autres, tous contenus dans une archive biologique ubiquiste (coquilles de bivalves) permettant des reconstructions journalières de l'environnement (i.e. température) et de la productivité en surface. Trois proxies sont calibrés en parallèle puis utilisés le long d'un gradient latitudinal (de la Norvège à l'Espagne) pour reconstruire les variations passées dans la productivité de ces régions.

Couplage d'un monitoring environnemental à des dosages isotopiques et élémentaires au sein des valves de coquilles Saint-Jacques

Les coquilles de bivalves présentent des marques de croissance journalière qui permettent de replacer les variations du proxy étudié sur une échelle calendaire et ainsi de reconstruire les variations intra-saisonnières des conditions environnementales. Les études portant sur la recherche de proxies de la productivité biologique dans ces archives se sont concentrées sur les variations isotopiques du carbone. Au cours de la dernière décennie, les nouvelles techniques analytiques, comme l'ablation laser couplée à des spectromètres de masse à plasma induit ont permis de mettre en évidence des variations brutales des concentrations coquillières en baryum (Ba) au cours de la vie de plusieurs espèces de bivalves. Des augmentations soudaines de molybdène (Mo) ont été décrites par plusieurs membres du consortium chez deux espèces de bivalves sur les côtes européennes et en Nouvelle-Calédonie. Plusieurs hypothèses ont été avancées afin d'expliquer ces pics de Mo dont : i) l'émission de Mo depuis le sédiment lors de conditions anoxiques à l'interface eau-sédiment, ii) l'ingestion par les bivalves de cellules phytoplanctoniques présentant une forte concentration intracellulaire en molybdène.



Coquille Saint-Jacques photographée *in situ*.

CHIVAS « Chimie des valves de la coquille Saint-Jacques européenne, archives multiproxies de la dynamique phytoplanctonique » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LEMAR (Laboratoire des sciences de l'Environnement MARin). Il associe le LCABIE (Laboratoire de Chimie Analytique, Bio-inorganique et Environnement, Pau) et le LOBB (Laboratoire d'Océanographie Biologique de Banyuls). Le projet a débuté en septembre 2009 pour une durée de 36 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 442 k€ pour un coût global de 3,5 M€.

Résultats majeurs

CHIVAS a réalisé simultanément une description à haute fréquence des productions primaires pélagique et benthique, ainsi que des cycles du molybdène et du baryum dans un environnement marin variable (Rade de Brest). Le potentiel du Ba comme marqueur environnemental a été validé. Les outils développés ont été appliqués aux populations de coquilles Saint-Jacques de la façade atlantique européenne, à des restes archéologiques, à d'autres mollusques et à d'autres éléments chimiques. Nous avons montré que le lithium incorporé dans la coquille est aussi un marqueur du rythme de croissance.

Production scientifique et brevets

Parmi les 10 publications dans des revues internationales à comité de lecture, citons les plus récentes suivantes :

Chauvaud L., Patry Y., Jolivet A., Cam E., Le Goff C., Strand O., Charrier G., Thébaud J., Lazure P., Gotthard K., Clavier J., 2012. PLOS ONE.

Royer C., Thébaud J., Chauvaud L., Olivier F., 2012. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology.

Tabouret H., Pomerleau S., Jolivet A., Pecheyran C., Thébaud J., Chauvaud L., Amouroux D., 2012. Marine Environ. Res.

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2007

EEL-SCOPE

Impact du Changement Global sur la qualité des eaux et les organismes estuariens

Comprendre la vulnérabilité du système estuarien face à l'évolution sur 30 ans de la pression anthropique

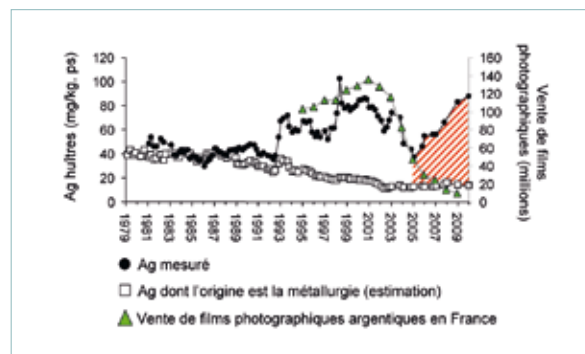
Le projet EEL-SCOPE vise à contribuer à une meilleure compréhension de la vulnérabilité écologique et socio-économique du système fluvio-estuarien de la Gironde. Il se place dans le contexte du déclin dramatique des populations d'anguille européenne, de l'interdiction d'exploitation suite aux pollutions historiques (huîtres-Cd et anguilles-PCB) et de la baisse sensible des débits des rivières avec un réchauffement et une baisse des taux d'oxygène dans les eaux estuariennes. Le consortium étudie les relations entre la trajectoire du système estuarien et les impacts des pollutions métalliques et organiques sur des espèces sentinelles de grande valeur écologique, économique et patrimoniale : les anguilles, les huîtres et les crevettes. Les approches d'observation (qualité de l'eau) et d'expérimentation développées *in situ* et en laboratoire se placent à l'interface des milieux naturels et socio-économiques pour comprendre et hiérarchiser les impacts des différentes pressions au cours du temps et dans la perspective d'une gestion adaptée du milieu et des ressources estuariennes.

Approche multi-disciplinaire intégrant une bancarisation d'échantillons, un suivi environnemental et une enquête socio-économique

Les approches d'observation (qualité de l'eau) et d'expérimentation sur le terrain et en laboratoire, comme la mise en cage d'anguilles qui sont développées, visent à étudier la réaction physiologique des poissons, l'accumulation de contaminants dans les tissus et les otolithes et leur réponse de détoxification jusqu'au niveau génétique. Les effets individuels et cumulés des polluants métalliques et organiques majeurs et de la sous-oxygénation des eaux sont évalués afin d'en déduire des effets potentiels sur la vulnérabilité du milieu naturel. Les méthodes expérimentales mises en oeuvre doivent répondre aux questions scientifiques et aux diverses contraintes (milieu estuarien, règles éthiques, besoins analytiques, etc.). Ces nouvelles méthodes permettent d'optimiser les expérimentations et sont ou seront utilisés dans d'autres projets et sur d'autres systèmes. L'analyse chimique des otolithes (concrétions calcaires) dans la tête des poissons vise à reconstruire leur histoire de vie et de leur exposition aux contaminants. L'analyse de la bancarisation d'échantillons d'huîtres permet de comprendre la pression des contaminants sur les organismes depuis ~30 ans. Une enquête auprès des acteurs socio-économiques vise à hiérarchiser les problèmes identifiés.

Résultats majeurs

L'analyse de banques de données et d'échantillons (évolution sur ~30 ans) a montré une vulnérabilité croissante du système girondin et une contamination en argent des huîtres provenant d'une succession de sources (métallurgie, films photographiques, viticulture, milieu urbain, voir figure ci-dessus). La microanalyse des métaux accumu-



Historique (1979-2010) des concentrations en Argent (Ag) dans les huîtres sauvages de l'estuaire de la Gironde (site de La Fosse) et estimation de la contribution métallurgique et de la vente des films photographiques argentiques en France. La zone hachurée symbolise la bioaccumulation d'Ag provenant de sources contemporaines qui restent à identifier.

EEL-SCOPE « Eco-toxicological and Economical Liability of eel exposed to Seasonal and global Change-induced O2-depletion and Pollution in Estuaries » est un projet de recherche fondamentale à vocation finalisée coordonné par le Laboratoire EPOC (Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux). Il associe l'IRSTEA (Institut de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture de Bordeaux), le Centre Ifremer de Nantes (Biogéochimie des contaminants métalliques), le GREThA (Groupe de Recherche en Economie Théorique et Appliquée) et le ISM-LPTC (Institut des Sciences Moléculaires, Laboratoire de PhysicoToxico-Chimie de l'Environnement). Le projet a débuté en janvier 2008 pour une durée de 48 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 540 k€ pour un coût global de 2,58 M€.

lés au cours de la vie des anguilles dans les couches des otolithes et l'analyse génétique (indicateur de stress) sont de nouveaux outils. La réalisation de deux thèses, l'intensification des échanges avec les gestionnaires régionaux et l'établissement de plusieurs nouveaux projets ou contrats de recherche avec des collaborations internationales constituent également des retombées majeures du projet.

Production scientifique et brevets

Parmi la vingtaine de publications dans des revues internationales à comité de lecture, citons :

- Schäfer J., *et al.*, 2010. Estuary Coast Shelf Sci., 90:80-90.
- Lanceleur L., *et al.*, 2011. Chemosphere 85:1299-1305.
- Renault S., *et al.*, 2011. Ecotoxicol. Environ. Saf., 74:1573-1577.
- Tapie N., *et al.*, 2011. Chemosphere 83:175-185.
- Daverat F., *et al.*, 2011. Ecol. Freshwater Fish, 20:42-51.
- Bournot A., *et al.*, 2009. Cognitiques 13.

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2006

SOLEBEMOL-POP

Devenir et effets des contaminants organiques persistants dans un poisson marin : la sole

Etudier et quantifier le devenir de trois familles de contaminants organiques et leurs effets sur les fonctions physiologiques

Préserver la qualité de l'environnement et promouvoir l'utilisation durable des ressources marines sont des enjeux majeurs en milieu côtier où la pression anthropique est forte. Dans ce contexte, le projet SoleBEMol-pop a pour principal objectif d'étudier chez des juvéniles de soles le devenir et les effets des contaminants chimiques de l'individu à la population. L'originalité de l'étude est la combinaison d'une triple approche alliant la mesure *in situ*, l'expérimentation en milieu contrôlé et la modélisation aux échelles de l'individu et de la population. Alors que les systèmes côtiers subissent des contaminations diverses, les effets d'une substance sont par conséquent difficiles à dissocier dans le milieu naturel. La description et la compréhension des processus responsables du devenir des contaminants nécessitent que l'acquisition des données *in situ* soit complétée par des approches expérimentales en milieu contrôlé et de modélisation.

Le devenir et les effets des PCB, PBDE et HAP : de la mesure *in situ* et de l'expérimentation en milieu contrôlé à la modélisation

L'estuaire de la Seine a été identifié comme le plus impacté par ces contaminants et c'est également la nurserie qui présente les meilleurs indices de condition. A l'échelle locale, les facteurs biotiques et abiotiques interagissent avec les contraintes anthropiques, faisant des nurseries des systèmes complexes. Toutefois, les densités de juvéniles dans l'estuaire restent inférieures à sa capacité d'accueil, et les taux de recrutement ne semblent pas responsables de ces effectifs. Les résultats obtenus sur les fonctions physiologiques en conditions expérimentales semblent confirmer que les effets des contaminants constituent une hypothèse probable. Ainsi, des altérations de la fonction immunitaire, du comportement et de la reproduction peuvent conduire à une diminution de l'adaptation du poisson à son milieu et nuire à sa participation au recrutement. Le projet apporte un éclairage nouveau en termes de doses, de durée et de stade d'exposition (juvéniles et jeunes adultes) sur une espèce marine à cycle de vie long. Les mesures des contaminants ont confirmé la mobilisation des PCB (Polychlorobiphényles) et PBDE (PolyBromoDiphénylEthers) en lien avec les lipides lors de la maturation gonadique. Ces résultats combinés aux effets sur les taux d'hormones stéroïdiennes et le nombre d'œufs incitent à renforcer les études mécanistes en lien avec le métabolisme des lipides et la vitellogénèse. La modélisation DEB (Bilan d'Energie Dynamique) permet de tester différentes hypothèses pour expliquer cette variabilité individuelle et prédire l'évolution du système.

Résultats majeurs

Les résultats montrent que la combinaison des trois approches est pertinente pour appréhender le devenir et les effets des contaminants. Le modèle bio énergétique de croissance couplé au modèle de bioaccumulation des PCB constitue une base solide pour tester différents scénarii sur les coûts métaboliques que peuvent générer les effets des contaminants. L'approche développée pourra être transfé-



Effets des contaminants organiques persistants sur les différents stades de vie de la sole.

SOLEBEMOL-POP « Sole Bioaccumulation Ecotoxicologie et Modélisation des POP » est un projet de recherche fondamentale coordonné par l'Ifremer. Il associe Agrocampus Ouest/ Rennes (Ecologie Halieutique), le LPTC (Laboratoire de Physico-et Toxicochimie des Systèmes Naturels, Bordeaux 1) et le LIENSs (Littoral Environnement et Sociétés, La Rochelle). Le projet a débuté en mars 2007 pour une durée 48 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 750 k€ pour un coût global de 2,7 M€.

rée à d'autres contaminants. De plus, la modélisation DEB des soles de la Manche- Est est en cours d'adaptation pour les nurseries du Golfe de Gascogne. Enfin, le projet a montré que, dans un souci de réalisme environnemental, il semble très pertinent de s'intéresser aux effets sur les géniteurs (fonction reproduction) et les stades précoces (développement embryonnaire et larvaire) afin de tenter de modéliser l'ensemble du cycle de vie et les effets potentiels des contaminants sur les différents stades.

Production scientifique et brevets

La plateforme expérimentale développée et son schéma d'épuration associé ont servi d'autres projets (i.e. EVOLFISH, VMCS 2008). Le projet a conduit à 5 thèses, et à 11 publications dans des revues internationales. Parmi ces dernières, citons :

Eichinger M., *et al.*, 2010. Modelling growth and bioaccumulation of persistent organic contaminants of the common sole (*Solea solea*). J. of Sea Res., 64: 373-385.

Munsch C., *et al.*, 2010. Dietary exposure of juvenile common sole (*Solea solea* L.) to polybrominated diphenyl ethers (PBDEs). Part 2: Formation, bioaccumulation and elimination of hydroxylated metabolites. Environ. Pollution 158: 3527-3533.

Munsch C., *et al.*, 2011. Dietary exposure of juvenile common sole (*Solea solea* L.) to polybrominated diphenyl ethers (PBDEs). Part 1: Bioaccumulation and elimination kinetics of individual congeners and their debrominated metabolites. Environ. Pollution 159: 229-237.

Rochette S., *et al.*, 2010. Effect of nursery habitat destruction on flatfish population renewal. Application to common sole (*Solea solea* L.) in the Eastern Channel (Western Europe). J. of Sea Res., 64: 34-44.

Wessel N., *et al.*, 2011. The toxicity of benzo[a]pyrene on sole (*Solea solea*) hepatocytes: assessment of genotoxic and enzymatic effects. Polycyclic Aromatic Compounds (accepted).

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2008

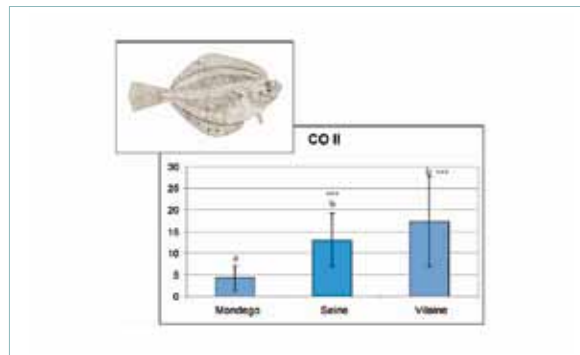
EVOLFISH

Réchauffement climatique et stress anthropiques :
impacts sur les poissons marins**Les populations de poissons peuvent-elles
s'acclimater, voire s'adapter, vis-à-vis de stress
multiples dans les zones côtières ?**

L'accroissement général de la température des océans, particulièrement aux hautes latitudes, exerce une forte pression sur les poissons inféodés aux eaux tempérées, et présentant une phase de vie juvénile en milieux côtiers peu profonds. Les espèces peuvent disparaître ou migrer, rester sur place en s'acclimant aux nouvelles conditions (plasticité phénotypique) ou en s'adaptant (processus évolutif impliquant des modifications génétiques). Le projet EVOLFISH explore les effets des stress thermiques, hypoxiques et chimiques sur des populations naturelles d'un poisson estuarien, le flet (*Platichthys flesus*), sur un cline latitudinal allant de l'Angleterre au Portugal, la limite Sud de l'aire de répartition du flet étant Lisbonne. L'originalité du projet est de développer une approche multi-disciplinaire (biologie moléculaire, physiologie, génétique de populations, écologie) pour mieux comparer les statuts physiologiques et les performances des populations sur différents sites. Une approche expérimentale complémentaire de type « Common Garden » menée en laboratoire, a permis de comparer les performances des différentes populations vis-à-vis de défis expérimentaux, l'objectif étant d'explorer la part relative de la plasticité phénotypique versus de celle de l'adaptation, dans la différenciation des traits biologiques mesurés dans les populations.

**Approche intégrative pour explorer les
réponses des populations aux stress *in situ* et
lors de challenges expérimentaux**

Les réponses de populations de flet ont été explorées dans cinq estuaires présentant des conditions environnementales contrastées : au Portugal (le Mondego : système « chaud » marquant la limite Sud de l'aire de répartition), en France (la Vilaine : système à hypoxie chronique ; la Seine : estuaire très pollué et la Canche : système peu stressé), en Angleterre (la Tamar : estuaire pollué par les métaux). Les réponses moléculaires *in situ* ont été focalisées sur les niveaux d'expression de différents gènes impliqués dans le métabolisme énergétique. Le taux de croissance individuel des poissons a été estimé en analysant la microstructure des otolithes. Des défis hypoxiques ont été conduits pour détecter un possible différentiel de résistance des populations à ce stress. La structure génétique des différentes populations a été explorée par des marqueurs neutres (Cytochrome C Oxydase sous unité 1 et huit marqueurs microsatellites), et par un gène candidat, l'AMP-désaminase isoforme 1, impliqué dans le métabolisme énergétique et susceptible de subir des pressions de sélection. Enfin, des challenges thermiques et/ou chimiques ont été conduits en laboratoire (expériences de type « Common Garden » sur des poissons issus des populations des estuaires de la Seine, de la Vilaine et du Mondego.



Niveaux d'expression du gène de la Cytochrome C Oxydase sous unité 2 (CO II), dans la population du Sud (estuaire du Mondego) relativement aux populations plus au Nord (estuaires de la Seine et de la Vilaine).

EVOLFISH « Effects of global warming and local contamination on the evolutionary response of two coastal fishes » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LEMAR (Laboratoire des Sciences de l'Environnement Marin). Il associe l'Ifremer- Brest (Laboratoire Biogéochimie des Contaminants Organiques), l'ISEM (Institut des Sciences de l'Evolution de Montpellier) et ORPHY (Optimisation des Régulations Physiologiques, Brest). Le projet a débuté en janvier 2009 pour une durée de 42 mois. Il bénéficie d'un financement de l'ANR de 559 k€ pour un coût global de 1,7 M€.

Résultats majeurs

Les résultats suggèrent une profonde modification des phénotypes dans la population la plus au Sud, sous stress thermique, relativement aux populations situées plus au Nord (altérations du métabolisme énergétique, de la croissance individuelle, des capacités de résistance au stress hypoxique). Ces travaux pourraient à terme conduire à l'identification de nouveaux marqueurs de stress, pour le suivi des populations soumises au réchauffement climatique. Par ailleurs, les résultats de l'expérimentation lourde « Common Garden » (en cours d'analyse) devraient permettre de détecter une possible composante adaptative dans la modification de certains traits biologiques. Ce travail souligne par ailleurs que les populations sous stress thermique pourraient présenter une capacité de résilience réduite face à d'autres stress de nature anthropique, ce résultat devant être pris en compte pour de futurs programmes de conservation de ces populations périphériques.

Production scientifique et brevets

Outre plusieurs publications acceptées ou soumises dans des revues internationales à comité de lecture et une dizaine de communications à des colloques internationaux ou nationaux, le projet a conduit à la soutenance en 2011 d'un doctorat sur « les effets du réchauffement climatique, de l'hypoxie et de la contamination chimique sur les réponses évolutives de populations de flet (*Platichthys flesus*) ».

4

LES APPROCHES PHYSICO-CHIMIQUES DE L'ATMOSPÈRE

LES PRINCIPALES AVANCÉES

Un des préalables à toute action de remédiation efficace, est d'identifier et de quantifier précisément les sources des polluants gazeux ou particulaires et pour ces derniers, que ces sources soient primaires (i.e. émission directe de particules dans l'atmosphère) ou secondaires (i.e. particules résultant de la transformation dans l'atmosphère de composés gazeux en particules).

Les projets s'appuient sur des campagnes aéroportées de mesure atmosphérique, des services d'observation de la qualité de l'air, des observations satellitaires, des expériences innovantes de laboratoire et des modélisations, notamment de chimie-climat. Ils concernent des études menées en France et à l'étranger ainsi sur les milieux Arctique et Antarctique.

Quantifier les sources des polluants gazeux ou particulaires

De nombreux projets se sont intéressés ces dernières années à quantifier ces sources dans différentes zones ou à développer des approches permettant de disposer de traceurs de ces sources. A cette fin, des réseaux de mesures ont été mis en place ou renforcés tant pour le CO_2 , le CH_4 que pour le N_2O et leurs résultats sont exploités le plus souvent en liaison avec des modèles atmosphériques incluant une description plus ou moins sophistiquée du fonctionnement des écosystèmes terrestres.

Concernant les aérosols, des campagnes intensives très exhaustives sur le plan des composés mesurés ont été conduites dans des villes comme Paris ou Pékin. Au-delà de la contribution plus forte que prévue des émissions liées au trafic routier, les résultats montrent, notamment en été, l'importance de la production d'aérosols organiques secondaires à partir de composés organiques volatils d'origine anthropique et la contribution également plus importante qu'attendue des émissions d'aérosols dus à la combustion du bois.

Améliorer la connaissance sur les propriétés physico-chimiques, microphysiques et radiatives des aérosols

Le corollaire à cette meilleure connaissance qualitative et quantitative des sources de polluants est de cerner également les propriétés d'intérêt des composés émis. Si celles-ci sont assez bien connues pour les espèces gazeuses et notamment pour les GES, elles demeurent très mal connues pour les aérosols. Ceci résulte en grande partie du fait que le terme « aérosol » ne se réfère pas à une espèce chimique unique mais est un vocable générique recouvrant un ensemble des particules différentes les unes des autres sur les plans de leurs propriétés chimiques, physiques, optiques...

Des travaux pour caractériser ces propriétés ont donc été conduits, soit *in situ*, le plus souvent simultanément à ceux visant à identifier les sources de particules, soit dans des enceintes de simulation dédiées permettant d'étudier précisément telles ou telles grandeurs (propriétés d'absorption, propriétés de nucléation, facteurs de croissance hygroscopique, spectres de taille...).

Ces travaux, assez longs et laborieux, qui peuvent sembler très amont par rapport aux problèmes posés par ces particules en termes de santé ou de climat, sont pourtant essentiels pour réduire les incertitudes actuelles sur le rôle de ces particules.

La chimie atmosphérique aux hautes latitudes

Par ailleurs, en raison de l'API 2007-2008, une attention plus particulière a été portée ces dernières années à la chimie atmosphérique très spécifique qui se développe aux hautes latitudes (notamment en raison des basses températures, du rayonnement solaire particulier tant en intensité qu'en durée, de la présence de grandes étendues de glace et de neige...).

Suite à la mise en place du protocole de Montréal et l'interdiction de l'utilisation des CFC, un des enjeux forts est d'étudier la vitesse avec laquelle se reconstitue la couche d'ozone, en particulier en Antarctique. De même, les questions liées aux échanges « neige-atmosphère » ont fait l'objet d'une attention particulière, notamment en lien avec le très fort pouvoir oxydant de l'atmosphère Antarctique.

Enfin, une des spécificités des hautes latitudes de l'hémisphère Nord est que la troposphère et la basse stratosphère y sont soumises à une pollution atmosphérique intense liée à la fois à des transports à longue distance de polluants émis depuis l'Asie et l'Amérique du Nord, mais également à des épisodes de feux intenses en été.

Les approches physico-chimiques de l'atmosphère

Acronyme et nom du projet		Le projet en un titre
AEROCLOUDS	AEROSol Impact on tropospheric CLOUDS	Aérosols et nuages entre climat et qualité de l'air
N-TWO-O	Network study to improve top-down and bottom-up modeling of the global Warming potential of N ₂ O emissions Operationally	Les émissions françaises et européennes du gaz à effet de serre N ₂ O
CO₂-MEGAPARIS	Quantification des émissions de CO ₂ de la mégapole parisienne et suivi de son panache vers la région Centre	Paris, une mégapole fortement émettrice de CO ₂ , principal GES additionnel dû à la combustion d'énergies fossiles
MEGAPOLI-PARIS	Megacities: Emissions, urban and Global Atmospheric POLLution and climatic effects, and Integrated tools for assessments and mitigation	La qualité de l'air d'une grande Mégapole passée au crible
AEROCOV	Etude expérimentale des aérosols et composés organiques volatils dans les mégapoles : quantification des interactions et des impacts	Caractérisation expérimentale des sources de polluants atmosphériques à Paris et Pékin
PHOTOAERO	Photosensitized processes occurring on tropospheric organic/inorganic aerosols	Les transformations des aérosols troposphériques induites par la lumière solaire
NEO-RAD	Nouvelles sources hétérogènes de radicaux atmosphériques	Les surfaces urbaines : le siège d'une nouvelle chimie atmosphérique
ORACLE-France	Ozone layer and UV Radiation in a changing CLimate Evaluated during IPY-France contribution	L'ozone dans un climat changeant : interactions, rétroactions et impacts
OPALE	Oxydant Production over Antarctica Land and its Export	Le caractère oxydant très prononcé de l'atmosphère de l'Antarctique de l'Est
POLARCAT-France	POLar study using Aircraft, Remote sensing, surface measurements and models of Climate, chemistry, Aerosols and Transport	Impact de la pollution anthropique et des feux boréaux sur le climat Arctique
StraPolEté	Etude de la Stratosphère polaire en été : dynamique, aérosols et contenus en brome	Ozone et composition de la stratosphère en région polaire Arctique en été

Programme « Blanc », édition 2006

AEROCLOUDS

Aérosols et nuages
entre climat et qualité de l'airMieux comprendre et quantifier les
mécanismes qui contrôlent l'impact des
aérosols sur le climat et l'amélioration de la
qualité de l'air

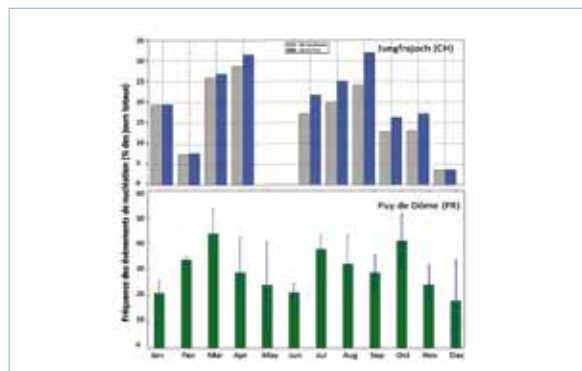
Les aérosols sont des particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère, dont l'origine peut être naturelle ou anthropique et dont la taille peut varier du nanomètre à quelques micromètres. Les aérosols ont un impact sur le climat qui peut être direct en diffusant ou en absorbant certaines radiations solaires, selon leur nature et leur taille, ou indirect, en induisant, en tant que noyau de condensation ou de glaciation, la formation de nuages. Ce sont aussi des polluants ayant des effets avérés sur la santé au-delà d'un certain seuil. La quantification de l'impact des aérosols sur le bilan radiatif de la planète (refroidissement ou réchauffement) constitue l'un des enjeux majeurs de la prévision de l'évolution climatique future identifiés par le GIEC. AEROCLOUDS, qui est le pendant national du projet EUCAARI coordonné par l'Université d'Helsinki, vise à apporter une réduction des incertitudes relatives à l'impact des aérosols sur le climat.

Du micro au macro : une approche
multi-capteurs et multi-échelles

Des moyens importants ont été déployés, notamment durant la période intensive d'observation de l'année 2008, tant en laboratoire (chambres de simulation) que dans l'atmosphère à partir de stations d'observation *in situ* et d'avions de recherche. L'ensemble de ce dispositif a bénéficié de l'Infrastructure européenne EUSAAR. AEROCLOUDS a constitué un élément important de ce dispositif, notamment grâce à la station du Puy-de-Dôme et à l'avion de recherche ATR 42 (CNRS/Météo-France), dans lesquels de nouveaux outils d'investigation ont été utilisés pour la première fois. Des études de laboratoire, notamment autour de la chimie en surface des aérosols, ont apporté une compréhension nouvelle de certains processus atmosphériques. Observations de long terme et campagnes de mesure ciblées constituent l'ossature d'une base de données ouverte à tous les utilisateurs et inégalable en Europe par sa complétude qui permettent de documenter et comprendre la variabilité observée de la composition atmosphérique et de développer les outils numériques nécessaires à la modélisation et à la prévision.

Résultats majeurs

Le projet a permis d'améliorer la connaissance des impacts des aérosols sur les nuages et le climat et établir de nouveaux inventaires des sources d'émission, directe et indirecte, d'aérosols en particulier sur l'Europe. Un important travail de cartographie des propriétés des aérosols à l'échelle européenne, de leurs mécanismes de formation et de transformation depuis la formation des nanoparticules jusqu'à leur rôle dans les nuages et les précipitations a été réalisé. Les équipes françaises ont notamment initié l'analyse des interconnexions entre le climat et la qualité de l'air et développé des outils expérimentaux et des codes de simulation numérique, désormais utilisés dans d'autres projets. Ainsi, l'un des principaux résultats montre que les aérosols



Fréquence des jours durant lesquels des événements de formation de nouvelles particules (nucléation) sont observés sur les stations de haute altitude de Jungfraujoch (Suisse) et du Puy-de-Dôme (France). Les mesures à la Jungfraujoch (en bleu) indiquent les périodes de ciel clair. La nucléation contrôle une partie des concentrations en nombre dans la troposphère.

AEROCLOUDS « AEROsol Impact on tropospheric CLOUDS » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LGGE (Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement). Il associe le LaMP (Laboratoire de Météorologie Physique), l'IRCELYON (Institut de Recherches sur la Catalyse et l'Environnement de Lyon), le CNRM (Centre National de Recherche Météorologique, Météo-France) et le LATMOS (Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales). Le projet a débuté en novembre 2006 pour une durée de 45 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 360 k€ pour un coût global de 827 k€.

contribuent à refroidir le système Terre et que ce faisant, ils limitent le réchauffement global, mais que cet effet "bénéfique" pour la planète va fortement diminuer d'ici 2030 du fait des réductions plus rigoureuses de la pollution atmosphérique actuellement mises en oeuvre dans le monde entier. Il ressort également que les prévisions climatiques sur quelques dizaines d'années (2040) devront mieux prendre en compte la variabilité des émissions d'aérosols induites par le réchauffement climatique lui-même.

Production scientifique et brevets

- Geoffroy O., *et al.*, 2008. Atmos. Chem. Phys., 8: 4641-4654, doi :10.5194/acp-8-4641-2008.
- Boulon J., *et al.*, 2011. Atmos. Chem. Phys., 11: 5625-5639, doi :10.5194/acp-11-5625.
- Boulon J., *et al.*, 2010. Atmos. Chem. Phys., 10: 9333-9349, doi :10.5194/acp-10-9333.
- Freney E.J., *et al.*, 2011. Atmos. Chem. Phys., 11: 13047-13059, doi :10.5194/acp-11-13047.
- Brenguier J.L., *et al.*, 2011. Atmos. Chem. Phys., 11: 9771-9786, doi:10.5194/acp-11-9771.
- Brigante M., *et al.*, 2008b. Environ. Sci. and Technol., 42: 9165-9170, doi:10.1021/es801539y.
- D'Anna B., *et al.*, 2009. J. Geophys. Res. Atmos., 114, 12, D12301 10.1029/2008jd011237.

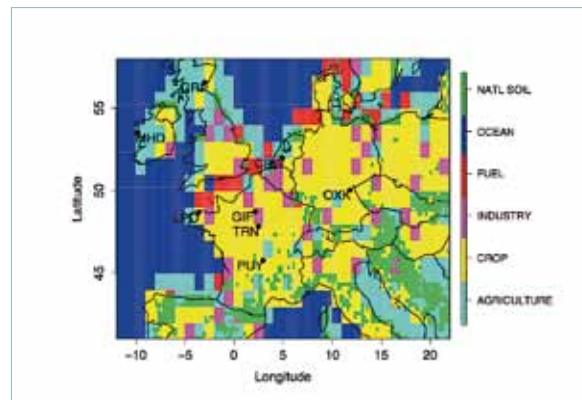
Programme « Blanc », édition 2006

N-TWO-O

Les émissions françaises et européennes du gaz à effet de serre N_2O

Mise en œuvre d'un réseau de mesures afin d'améliorer la modélisation top-down et bottom-up des émissions de N_2O

L'évolution des émissions d'origine anthropique fera prochainement du N_2O le troisième gaz le plus important par sa contribution à l'effet de serre. Alors que les émissions industrielles de N_2O sont relativement bien connues et peuvent être réduites efficacement et pour un coût mesuré, de nombreuses incertitudes existent sur les réductions possibles dans le domaine agricole et sur la manière d'y arriver. Le projet N-TWO-O vise à améliorer significativement, et de manière coordonnée, le suivi et la modélisation des émissions de N_2O d'origine anthropique et naturelle à l'échelle de la France et de l'Europe. Cela nécessite le développement de mesures atmosphériques de haute précision permettant de mieux modéliser le transport et la dispersion du N_2O ainsi que l'analyse de la variabilité observée en termes de fluctuation des sources. Le projet a également pour objectif l'utilisation de nouvelles représentations du sol et de la végétation pour améliorer les estimations des émissions d'origine agricole et naturelle à l'échelle régionale.



Carte représentant la distribution des sources dominantes d'émission en France et en Europe centrale, fondée sur des inventaires d'émissions et les estimations des modèles d'écosystèmes terrestres. Les sources dominantes sont identifiées par les différentes couleurs. Les huit sites de mesure atmosphérique du projet N-TWO-O utilisés pour l'évaluation des modèles sont mis en évidence sur la carte.

Utilisation des émissions provenant des modèles d'écosystèmes terrestres dans un modèle de transport atmosphérique et comparaison avec des mesures atmosphériques à haute précision

La méthodologie choisie implique l'association de mesures atmosphériques, la modélisation des processus d'émissions ainsi que du transport atmosphérique. Les mesures du Radon ont été ajoutées pour permettre l'étude de la dilution de ce traceur dans la couche limite troposphérique. Les standards de qualité utilisés dans le projet sont ceux du réseau international ADAGE. La modélisation des processus d'émissions de N_2O a été améliorée dans le modèle global de la biosphère continentale ORCHIDEE par la comparaison avec le modèle écophysologique CERES de l'INRA- Grignon. Les deux modèles d'écosystèmes terrestres ont été utilisés pour produire des cartes d'émissions régionales à l'échelle de la France et de l'Europe. Ces cartes ont ensuite permis de déterminer la contribution des différentes sources anthropiques ou naturelles dans les concentrations atmosphériques mesurées. De précédents essais avaient été effectués afin d'appliquer les techniques d'inversion pour retrouver les flux régionaux d'émission.

Résultats majeurs

Le projet N-TWO-O a produit un nouveau jeu de données de mesures atmosphériques de N_2O à haute résolution temporelle. Des cartes d'émission de N_2O des surfaces agricoles qui ont été produites avec les deux modèles d'écosystème terrestre constituent une amélioration notable par rapport aux inventaires précédents. Leur intégration dans des modèles de transport atmosphérique et la comparaison avec les nouvelles mesures atmosphériques confirment que les émissions françaises sont à majorité d'origine agricole.

N-TWO-O « Network study to improve top-down and bottom-up modeling of the global Warming potential of N_2O emissions Operationally » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement). Il associe les laboratoires INRA, AgroParis-Tech. Le projet a débuté en novembre, 2006 pour une durée de 42 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 275 k€ pour un coût global de 877 k€.

Production scientifique et brevets

Thompson R., Bousquet L., Chevallier P., Rayner F., Ciais P., 2011. J. Geophys. Res., 116, doi:10.1029/2011JD015815.
Rolland M.N.; Gabrielle B., Laville P., Cellier P., Beekmann M., Gilliot J.M., Michelin J., Hadjar D., Curci G., 2010. Environ. Pollution 158 : 711-722.
Lehuger S., Gabrielle B., van Oijen M., Makowski D., Morvan T., Hénault C., 2009. Agric. Ecosys. Environ., 133 : 208- 222.
Zaehle S., Friend A.D., Friedlingstein P., Dentener F., Peylin P., Schulz M., 2009. Global Biogeochem. Cycles, doi:10.1029/2009GB003522.
Messenger C., Schmidt M., Ramonet M., Bousquet P., Simmonds P., Manning A., Kazan V., Spain G., Jennings S.G., Ciais P., 2009. Atmos. Chem. Phys. Discuss., 8 : 1191-1237.
Zaehle S., Ciais P., Friend A.D., Prieur V., 2011. Carbon benefits of anthropogenic reactive nitrogen offset by nitrous oxide emissions. Nature Geoscience 4 : 601-605, doi: 10.1038/NCEO1207.

Programme « Blanc », édition 2009

CO₂-MEGAPARISParis, une mégapole fortement émettrice de CO₂, principal gaz à effet de serre additionnel dû à la combustion d'énergies fossilesVérifier les inventaires d'émissions de CO₂ de la mégapole parisienne

Les villes représentent plus de 70% des émissions de CO₂ mondiales, principal gaz à effet de serre (GES) émis par les activités humaines liées à la combustion d'énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon). D'après les travaux du GIEC (2007), ces émissions ont très vraisemblablement conduit à l'augmentation de la température moyenne de la Terre de +0,6°C au cours du siècle dernier. Il est donc fondamental de mieux les contrôler pour limiter leurs effets sur le climat. Les inventaires actuels estiment que la mégapole parisienne émet environ 15% des émissions de CO₂ nationales, mais les incertitudes sur ces inventaires sont larges, allant jusqu'à plusieurs dizaines de pourcents. Le projet CO₂-MEGAPARIS a pour objectifs de développer des méthodes fondées sur la mesure et la modélisation atmosphérique, afin de vérifier ces inventaires de façon indépendante et d'aider les politiques à prendre des décisions efficaces en termes de régulation des émissions de CO₂.

Observer et modéliser les émissions de CO₂ à fine échelle spatio-temporelle

La mégapole parisienne émet annuellement de l'ordre de 55 Mt C à comparer à 350 Mt C pour la France métropolitaine. Les inventaires estiment que ces émissions proviennent pour 41% du chauffage et 27% de la circulation automobile (AIRPARIF, 2007). Cependant, ces chiffres reposent sur la combinaison de marqueurs d'activités (i.e. nombre de véhicules roulants) et de facteurs d'émission de CO₂ par unité de poids de combustible fossile, spécifiques à chaque secteur, et sont caractérisés par de fortes incertitudes. Le développement récent d'analyseurs de CO₂ ultra-rapides (1 Hz) et précis a rendu la surveillance de la concentration du CO₂ atmosphérique relativement simple. Dans le cadre du projet, trois nouvelles stations de mesure du CO₂ ont été déployées, en collaboration avec AIRPARIF (Association de Surveillance de la Qualité de l'Air de l'Ile-de-France), en région urbaine, péri-urbaine et rurale. Une des stations est installée au sommet de la tour Eiffel à 317 m au-dessus du sol (voir ci-dessous). Ces trois stations, combinées aux deux stations existantes du réseau RAMCES/ICOS (<http://www.icos-infrastructure.eu/>) de surveillance des GES, permettent de quantifier le panache de CO₂ émis par la ville et sa propagation vers les régions limitrophes. Les mesures enregistrées sur les cinq stations ont été déployées sur le passage des vents dominants (secteurs nord-est et sud-ouest) pour étudier le panache de CO₂ parisien dans les conditions synoptiques prédominantes. Elles sont également utilisées par la modélisation inverse à très haute résolution spatio-temporelle Surfex-TEB (1 x 1 km, 1 h), spécifiquement dédiée aux processus d'îlot de chaleur urbain, qui permet de remonter des concentrations mesurées aux flux de CO₂ échangés entre la surface terrestre et l'atmosphère, et d'optimiser les cartes d'inventaire des émissions de CO₂.

Résultats majeurs

Les premiers résultats, obtenus dans le cadre d'une collaboration avec AIRPARIF et l'IER (Institut für Energiewirtschaft und Rationelle à Stuttgart), montrent que : i) le réseau d'observations permet de



Installation de la station CO₂-MEGAPARIS de suivi de la concentration du CO₂ de Paris au sommet de la tour Eiffel, en collaboration avec AIRPARIF (juillet 2010). Le point rouge indique le niveau de prélèvement, environ 10 m au-dessus du troisième étage ouvert aux touristes. Pour y accéder, le technicien doit se protéger des rayonnements émis par les antennes.

CO₂-MEGAPARIS « Quantification des émissions de CO₂ de la mégapole parisienne et suivi de son panache vers la région Centre » est un projet de recherche fondamentale à vocation finalisée coordonné par le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement). Il associe le LMD (Laboratoire de Météorologie Dynamique), l'INRA (Institut National de Recherches Agronomiques), le GAME (Groupe d'études de l'Atmosphère Météorologique, Météo-France) et le REEDS (Laboratoire de Recherche en Economie-écologie, Eco-innovation et ingénierie du Développement Durable). Le projet a débuté en octobre 2009 pour une durée de 36 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 680 k€ pour un coût global de 1,968 M€.

détecter le panache urbain quand l'atmosphère est bien mélangée, ii) les mesures collectées en mars 2011 mettent en évidence que l'îlot de chaleur urbain de Paris est de l'ordre de 10 à 30% le jour, et de 10 à 40% la nuit. Les travaux actuels portent sur l'analyse des données, classifiées par secteur de vent et saison, pour quantifier le panache d'émissions de CO₂ urbaines en fonction de la situation synoptique, et sur la modélisation inverse (retour des concentrations vers les flux de CO₂ pour l'optimisation des inventaires). L'approche atmosphérique utilisée est tout à fait nouvelle pour les instances publiques décisionnaires en matière de régulation des émissions de CO₂, plus habituées à travailler avec des méthodes dites de « bilan carbone ». Les premiers résultats ont été présentés au Conseil d'Administration d'AIRPARIF et la Mairie de Paris est sur le point de financer une étude de dimensionnement du réseau de surveillance du CO₂ de l'Ile-de-France, en partenariat avec le LSCE. Le maire-adjoint de Los Angeles, en charge de l'Environnement, a fait part de son intérêt pour la démarche mise en œuvre dans le projet.

Production scientifique et brevets

Xueref-Remy I., *et al.*, 2010. CO₂-MEGAPARIS: First observations of atmospheric CO₂ over Paris megacity, n°A13F-0277, AGU Fall Meeting, San Francisco, 12-17 December. (invited).

Xueref-Remy I., *et al.*, 2011. Comparison of observed and modeled boundary layer height over Paris megacity. Carbon in a changing world, FAO Conference, Roma, Italy.

Pal S., *et al.*, 2012. Spatio-temporal variability of the atmospheric boundary layer depth over Paris agglomeration: an assessment of the impact of urban heat island intensity. Atmos. Environ. (submitted).

Programme « Blanc », édition 2009

MEGAPOLI-PARIS

La qualité de l'air d'une grande mégapole passée au crible

Déterminer l'origine des particules atmosphériques à Paris et en Île-de-France

Depuis le siècle dernier, les populations humaines n'ont cessé de se concentrer dans les grands centres urbains. Les émissions de polluants dans les grandes mégapoles affectent fortement la qualité de l'air à l'échelle de la ville, mais aussi la composition chimique dans les environs. Les particules (ou aérosols) ont un impact majeur sur la qualité de l'air. L'aérosol organique constitue une fraction majeure de l'aérosol fin mais ses sources primaires (directement émises) et secondaires (formées par transformations chimiques dans l'atmosphère) sont encore mal comprises et quantifiées. Le projet MEGAPOLI-PARIS vise en particulier à une meilleure caractérisation des sources et des voies de formation de l'aérosol organique. A cet effet, une campagne de terrain d'envergure a été organisée en région Parisienne, exemple d'une mégapole de caractère tertiaire. L'objectif principal était de rassembler une base de données de mesures au sol et par avion à la fois de la composition chimique des aérosols et de ses précurseurs gazeux, au sein de l'agglomération et dans ses environs. Ces mesures doivent permettre une amélioration des modèles numériques de simulation de la qualité de l'air.

D'une campagne de terrain d'envergure en Île-de-France à la modélisation de la qualité de l'air

Un consortium de 25 équipes françaises et européennes a déployé un vaste ensemble instrumental lors de deux périodes d'été (juillet 2009) et d'hiver (janvier- février 2010). Sur trois sites primaires urbains et péri-urbains et sur plusieurs sites secondaires, une instrumentation très complète, alliant mesures *in situ* très rapides des propriétés physico-chimiques de l'aérosol, de sa composition chimique et de la composition de la phase gazeuse, incluant une mesure des radicaux, a été mise en œuvre. Des paramètres dynamiques (vents, conditions de dispersion de la pollution) ont également été déterminés. Des observations aéroportées effectuées par les avions de recherche français ATR 42 et Piper AZTEC ont permis de documenter l'évolution chimique du panache de pollution de l'agglomération, et notamment la vitesse de formation de l'aérosol organique secondaire. En parallèle, un modèle chimique très détaillé, un modèle en ligne météorologie- chimie et un modèle de chimie- transport a été mis en œuvre.

Résultats majeurs

Le projet a d'ores et déjà mis en évidence un fort contrôle régional des teneurs en aérosols en région Parisienne, c'est-à-dire leur transport important depuis l'extérieur de l'agglomération, en particulier depuis le Benelux et l'Europe Centrale. Une source importante due à la combustion de bois a été mise en évidence pour l'aérosol organique en hiver. La formation d'aérosol organique secondaire est significative dans le panache de l'agglomération à partir des émissions anthropiques de Composés Organiques Volatils. L'importance de la photolyse de l'acide nitreux en tant que source des radicaux HOx a été mise en évidence, ainsi que celle de la réactivité non expliquée par rapport au radical OH. Les simulations numériques en O-D et 3-D ont été évaluées à partir des mesures *in situ*, ce qui permet



Vues de la campagne MEGAPOLI – PARIS en été 2009 : en haut le site du SIRTa à l'Ecole Polytechnique à Palaiseau ; en bas à gauche, l'avion de recherche français ATR 42 ; en bas à droite, l'installation d'un container de mesure sur le site du Laboratoire d'Hygiène de la Ville de Paris (LHVP, Paris XIII).

MEGAPOLI-PARIS « MEGacities: Emissions, urban, regional and Global Atmospheric POLLution and climate effects, and Integrated tools for assessment and mitigation » est un projet de recherche fondamentale à vocation finalisée coordonné par le LISA (Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques). Il associe l'INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques Chroniques), le GAME (Groupe d'études de l'Atmosphère Météorologique, Météo- France), le LGGE (Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement), le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement), AIRPARIF (Association Interdépartementale pour la gestion du Réseau automatique de la Pollution Atmosphérique et d'alerte en Région d'Île-de-France) ainsi que plusieurs sous- contractants : le LATMOS (Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales), le LCME (Laboratoire de Chimie Moléculaire et Environnement), le LCP-IRA (Laboratoire Chimie Provence, équipe Instrumentation et Réactivité Atmosphérique), et SAFIRE (Service des Avions Français Instrumenté pour la Recherche de l'Environnement). Le projet a débuté en juin 2009 pour une durée de 36 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 500 k€ pour coût global de 2, 7 M€.

dorénavant leur utilisation pour des calculs de scénarii.

Production scientifique et brevets

Brands M., *et al.*, 2011. Characterization of a newly developed aircraft-based laser ablation aerosol mass spectrometer (ALABAMA) and first field deployment in urban pollution plumes over Paris during MEGAPOLI 2009. *Aerosol Sci. Technol.*, 1521-7388, 45, 2046- 64.
Healy R.M., *et al.*, 2011. Sources and mixing state of size-resolved elemental carbon particles in a European megacity, Paris. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 11: 30333-30380, <http://www.atmos-chem-phys-discuss.net/11/30333/2011/> doi:10.5194/acpd-11-30333-2011.
Royer P., *et al.*, 2011. Lidar-derived PM10 and comparison with regional modeling in the frame of the MEGAPOLI Paris summer campaign. *Atmos. Chem. Phys.*, 11 (20): 10705-10726.

Programme « Jeunes Chercheurs, Jeunes Chercheuses », édition 2005

AEROCOV

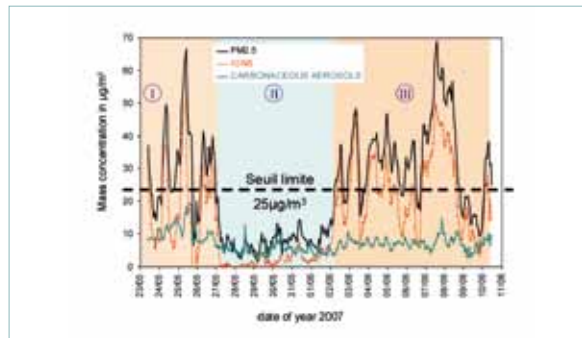
Caractérisation expérimentale des sources de polluants atmosphériques à Paris et Pékin

Identifier et quantifier les sources de composés organiques volatils et d'aérosols dans deux mégapoles contrastées

Le projet se place dans le contexte international d'étude et de caractérisation de l'impact anthropique sur la composition de l'atmosphère. L'étude des zones urbaines, qui relevait encore récemment uniquement du domaine de la qualité de l'air, a maintenant pris une autre dimension. En particulier, les mégapoles qui représentent un point source très dense, peuvent avoir un impact chimique et climatique régional, voire à plus grande échelle. Le projet est ciblé sur l'étude conjointe de deux familles de composés - les composés organiques volatils ou COV, et les aérosols organiques - jouant un rôle clé sur la chimie de l'atmosphère en zone urbaine et dont les interactions (sources communes, COV précurseurs d'aérosols) sont encore peu ou mal connues dans l'estimation des forçages chimiques et radiatifs de ces espèces à l'échelle régionale. L'objectif du projet AEROCOV est d'obtenir, à partir de la réalisation de campagnes de mesures, des résultats qualitatifs (identification des sources et des composés émis) et quantitatifs (facteurs d'émission, contribution de chaque grand type de source au signal observé) dans deux mégapoles contrastées (Paris et Pékin). Cette stratégie expérimentale doit nous permettre de déconvoluer les émissions locales (mégapoles) de la pollution à longue distance.

Mesures en temps réel de la concentration des composés organiques volatils et de la composition chimique de l'aérosol fin (PM_{2.5}) en milieu urbain

Le projet, en grande partie expérimental, s'est déroulé selon trois phases principales : tout d'abord une première étape primordiale de mise au point expérimentale, ensuite l'organisation et la réalisation de deux grandes campagnes de mesures dans les mégapoles étudiées (Paris en mai - juin 2007 et Pékin en août 2007), et enfin une dernière phase de traitement et d'interprétation des résultats obtenus sur le terrain. Les méthodes mises en place pour ces mesures ont fait appel à des instruments de dernière génération (mesure des COV par spectromètre de masse à réacteur à transfert de protons) et des prototypes développés en laboratoire (ensemble d'analyse de la composition chimique des particules en temps réel). Pour déconvoluer et quantifier les sources de polluants mesurés à Paris et Pékin, une approche par modèle source-récepteur PMF (Positive Matrix Factorization) a été choisie (coll. avec l'Ecole des Mines de Douai). L'approche PMF était la mieux adaptée à cette étude car elle ne nécessite pas de connaissance a priori sur les sources. (Voir l'article paru sur www.appa.asso.fr/_adminsited/Repertoire/1/fckeditor/file/Revues/PollutionAtmospherique/Hors-serie-retour-aux-sources-septembre-2010/P121.pdf)



Variations de la concentration en PM_{2.5} (en noir) sur la ville de Paris (station de fond urbain), mai-juin 2007. Mesures des espèces ioniques (NH₄⁺, SO₄, NO₃) en rouge et des espèces carbonées (carbone suie, matière organique) en vert. Les périodes « I » et « III » correspondent aux masses d'air européennes et la période « II » est relative à la masse d'air marine (Adapté de Sciare *et al.*, 2010).

AEROCOV « Etude expérimentale des aérosols et composés organiques volatils dans les mégapoles : quantification des interactions et des impacts » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement). Il a débuté en décembre 2005 pour une durée de 44 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 140 k€ pour un coût global de 650 k€.

Résultats majeurs

Les campagnes de mesures réalisées à Paris et Pékin ont permis de caractériser et contraster les niveaux, la variabilité et les sources des polluants atmosphériques. Pour Paris, la contribution des sources pour les COV fait apparaître un rôle prépondérant de la source liée au trafic routier, en contradiction avec l'inventaire local d'émissions. Un autre résultat majeur du projet est la mise en évidence du rôle de l'apport des émissions continentales sur les niveaux des particules PM_{2.5} mesurés à Paris, provoquant un dépassement des seuils limites. AEROCOV a été l'initiateur de plusieurs projets nationaux (PARTICULES, FRANCIPOL) et européen (MEGAPOLI) sur l'étude des sources de polluants à Paris et en Ile-de-France (coll. AIRPARIF).

Production scientifique et brevets

Parmi les diverses publications internationales à comité de lecture et communications diverses, nous pouvons citer :

Sciare *et al.*, 2010. Atmos. Chem. Phys. 10 : 1-18.

Gros *et al.*, 2011. Env. Chem., 8 : 74-90.

Gaimoz *et al.*, 2011. Env. Chem., 8 : 91-103.

Auxquelles s'ajoutent 2 thèses soutenues en 2009.

On retiendra également que Sciare J. et Sarda-Esteve R. ont reçu le Prix des techniques innovantes pour l'environnement de l'ADEME (2008) pour « La détermination en temps réel de la composition chimique des particules atmosphériques fines (PM_{2.5}) et ultra-fines (nanoparticules) ».

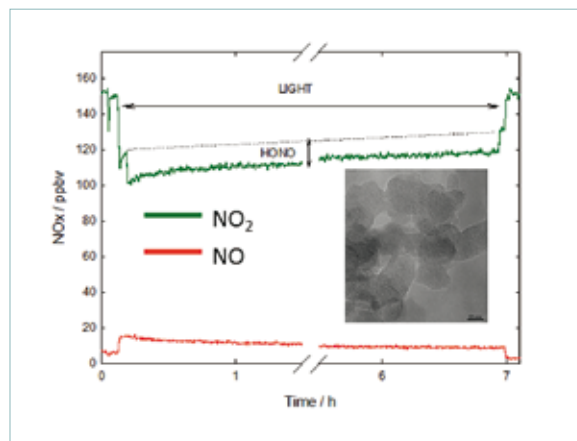
Programme « Jeunes Chercheurs, Jeunes Chercheuses », édition 2008

PHOTOAERO

Les transformations des aérosols troposphériques induites par la lumière solaire

Quantifier les processus photo-sensibilisés à la surface des aérosols organiques et inorganiques dans la troposphère

Le vieillissement des aérosols organiques et les changements de leur composition vont modifier à la fois les impacts climatiques et sanitaires des aérosols du fait de changements de composition, de propriétés optiques ou d'hygroscopicité. Dans ce contexte, il s'avère que de nombreux processus de vieillissement sont très mal décrits. Plus spécifiquement, les processus photo-induits dans la fraction organique sont incompris dans la communauté internationale. En particulier, l'objectif du projet PHOTOAERO est de caractériser les cinétiques et mécanismes associés à ces réactions photo-sensibilisées afin d'établir leur rôle dans la formation d'oligomères atmosphériques. Les retombées du projet permettront une compréhension fine de ces processus photo-induits et des réactions photo-sensibilisées sur le vieillissement de la fraction organique troposphérique sous forme de paramétrisations utilisables dans les codes numériques simulant la chimie atmosphérique.



Capture du NO_2 sur un film de suie et conversion en NO et HONO par microscopie électronique de l'échantillon de suie étudié.

Expérimenter à l'aide de tubes à écoulement et spectrométrie de masse à aérosol

L'étude a été conduite grâce à une instrumentation à la pointe du domaine, notamment le développement d'un système de réacteurs à écoulement d'aérosol qui permet d'obtenir la suspension des aérosols et leur exposition à différents composés oxydants qu'on retrouve dans l'atmosphère et à une radiation UV-A et visible. Plusieurs systèmes analytiques ont été mis en place pour le suivi en continu de la phase gazeuse et particulaire. On mentionnera notamment un spectromètre de masse à aérosol qui permet de collecter et analyser en temps réel les particules étudiées.

Résultats majeurs

Le projet a mis en évidence l'importance des réactions de photo-sensibilisation à la surface d'aérosols organiques et de suie, et à la surface de films urbains (fenêtres, bâtiments et sols). Par exemple, sous irradiation solaire, le dioxyde d'azote (un des polluants à l'origine de la production photochimique d'ozone) réagit avec la suie sur des temps très longs et produit efficacement de l'acide nitreux (HNO_2) qui est en zone urbaine, le précurseur principal de radicaux hydroxyles (OH), surnommé le détergent atmosphérique car il est à l'origine de la dégradation de presque tous les polluants. Cette réactivité soutenue dans le temps est donc très importante. Par contraste, cette chimie est inhibée dans l'obscurité au bout de quelques dizaines de minutes. L'exposition d'aérosols contenant du pyrène à la lumière et au NO_2 conduit à la formation de nitro-HAPs, composés encore plus toxiques que les HAPs (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques) de départ.

PHOTOAERO « Photosensitized processes occurring on tropospheric organic/inorganic aerosols » est un projet de recherche fondamentale coordonné par l'IRCELYON (Institut de Recherches sur la Catalyse et l'Environnement de Lyon). Le projet a débuté en janvier 2009 pour une durée de 36 mois. Il bénéficie d'un financement de l'ANR de 189 k€ pour un coût global de 615 k€.

Production scientifique et brevets

Monge M.E., Rosenørn T., Favez O., Müller M., Adler G., Riziq A.A., Rudich Y., Herrmann H., George C., D'Anna B., 2011. An alternative pathway for atmospheric particles growth. *Proc. of the US National Academy of Sci.* (accepted).

Zelenay V., Monge M.E., D'Anna B., *et al.*, 2011. Increased steady state uptake of ozone on soot due to UV/Vis radiation. *J. Geophys. Res.-Atmospheres* 116, D11301, doi: 10.1029/2010JD015500.

Baduel C., Monge M.E., Voisin D., Jaffrezzo J.L., George C., El Haddad I., Marchand N., D'Anna B., 2011. Oxidation of atmospheric humic like substances by ozone: A kinetic and structural analysis approach. *Environ. Sci. and Technol.*, 45 (12) :5238-5244.

Ammar R., Monge M.E., George C., D'Anna B., 2010. Photoenhanced NO_2 loss on simulated urban grime. *Chem. Phys.*, 11(18): 3956-3961.

Monge M.E., D'Anna B., Mazri L., Giroir-Fendler A., Ammann M., Donaldson D.J., George C., 2010. Light changes the atmospheric reactivity of soot. *Proc. of the US National Academy of Sci.*, 107, 15: 6605-6609.

Programme « Blanc », édition 2007

NEO-RAD

Les surfaces urbaines :
le siège d'une nouvelle chimie atmosphérique ?**Identifier et évaluer de nouveaux processus hétérogènes aux surfaces susceptibles d'affecter les sources de radicaux libres dans les atmosphères urbaines**

La pollution urbaine est certainement le premier problème environnemental à avoir attiré l'attention de la communauté scientifique sur la chimie de l'atmosphère. Elle reste un problème croissant tant il est vrai qu'aujourd'hui la plus grande part l'humanité vit en ville. Ces cinquante dernières années, les études de processus ont grandement amélioré notre compréhension de la photochimie atmosphérique. Elles ont permis l'élaboration de modèles numériques qui sont capables de reproduire, et même parfois, de prédire les mesures de base réalisées par les Agences de surveillance de la qualité de l'air. Cependant, la validité de ces modèles est limitée aux altitudes supérieures à 50 m au-dessus du sol. Par ailleurs, l'atmosphère urbaine présente des particularités fortes telles que l'omniprésence de surfaces urbaines (sols, murs, fenêtres, façades, aérosols carbonés fraîchement émis...). Ces surfaces sont généralement recouvertes de composés réactifs soit, inévitablement, par le dépôt des polluants semi-volatils soit, volontairement, par l'emploi de nouveaux nanomatériaux photocatalytiques censés en assurer la propreté, voire « dépolluer l'atmosphère ». Un grand nombre de phénomènes les impliquant ne sont pas suffisamment bien caractérisés pour conduire à une description quantitative des processus.

La combinaison d'expériences de laboratoire, de chambre de simulation et de modélisation 3-D

L'originalité de la stratégie du projet NEO-RAD repose sur la combinaison d'approches expérimentales complémentaires. Des études de laboratoire en réacteurs à écoulement permettent d'investiguer un large spectre de conditions et de polluants cibles ainsi que d'en quantifier à l'échelle élémentaire les mécanismes. Ces processus sont ensuite étudiés en chambre de simulation sous des conditions suffisamment réalistes pour en permettre l'extrapolation sous conditions atmosphériques. Les expériences en chambre de simulation permettent aussi l'emploi d'un ensemble très complet de méthodes analytiques (y compris la mesure directe de radicaux atmosphériques) et donc l'établissement très contraint de codes chimiques O-D, puis 3-D pour évaluer à grande échelle l'impact des surfaces urbaines. Plusieurs types de surface ont été étudiés qu'ils s'agissent de verres ou de bétons, qu'elles soient photocatalytiquement actives (dopées au TiO_2) ou non, qu'elles soient propres ou bien salies par l'exposition pendant plusieurs semaines à une atmosphère urbaine polluée. L'ensemble des résultats pourra servir, grâce à la modélisation, à l'évaluation de divers scénarii de déploiement des nouveaux matériaux dits « dépolluants » ou à une meilleure prise en compte de la qualité de l'air dans les très basses couches urbaines.



Installation de verres traités au dioxyde de titane dans la chambre de simulation CESAM en vue de leur exposition aux polluants atmosphériques sous conditions simulées afin d'étudier l'impact des réactions se produisant à leur surface sur la qualité de l'air (Photo LISA).

NEO-RAD « Nouvelles sources hétérogènes de radicaux atmosphériques » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LISA (Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques). Il associe l'IRCELYon (Institut de Recherches sur la Catalyse et Environnement de Lyon), l'ICARE (Institut de Combustion Aérothermique Réactivité et Environnement) et le LATMOS (Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales). Le projet a débuté en janvier 2008 pour une durée de 57 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 400 k€ pour un coût global de 2,1 M€.

Résultats majeurs

Les résultats sont encore en cours d'exploitation, notamment au moyen de la modélisation 3-D. Cependant, d'ores et déjà, on compte parmi les retombées du projet la quantification de l'abattement en présence de surfaces « autonettoyantes » ou dépolluantes de polluants tels que les oxydes d'azote (NO_x) ou le formaldéhyde. Il a aussi été mis en évidence, sous certaines conditions, une production d'ozone mais surtout un recyclage des NO_x sous forme d'acide nitreux dont la photolyse peut alors, au contraire, amplifier la pollution photo- oxydante. Le projet a donc permis de quantifier des boucles de rétroactions complexes dont la modélisation devrait permettre d'hierarchiser l'impact.

Production scientifique et brevets

Monge M.E., *et al.*, 2010. Ozone Formation from illuminated titanium dioxide surfaces. *J. Am. Chem. Soc.*, 132, 8234.
Monge M.E., *et al.*, 2010. Nitrogen dioxide removal and nitrous acid formation on titanium oxide surfaces, an air quality remediation process? *Chem. Phys. Chem.*, 12 : 8992-8999.
Ammar R., *et al.*, 2010. Photoenhanced NO_2 loss on simulated urban grime. *Chem. Phys. Chem.*, 11: 3956-3961.
Sassine M., *et al.*, 2010. Kinetics of the tropospheric formaldehyde loss onto mineral dust and urban surfaces. *Atmos. Environ.*, 44 : 5468-5475.

Programme « Blanc », édition 2006

ORACLE-FRANCE

L'ozone dans un climat changeant : interactions, rétroactions et impacts

L'étude de la reconstitution de l'ozone stratosphérique en Antarctique

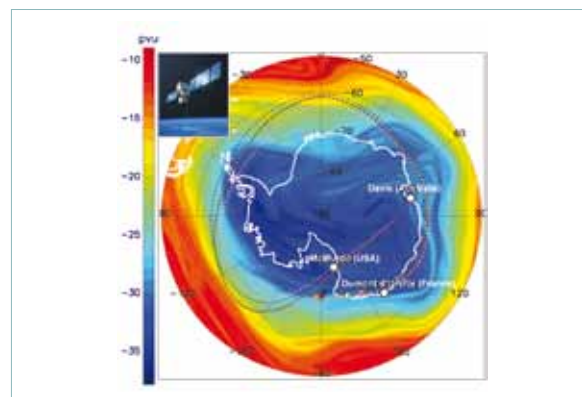
La découverte du « trou d'ozone » en 1985 a révélé que les activités humaines pouvaient impacter l'environnement à l'échelle globale. Depuis, de nombreux travaux ont permis de comprendre ce phénomène et de prendre des dispositions politiques pour l'endiguer. Cependant, la reconstitution de l'ozone (O_3) reste entachée d'incertitudes. ORACLE- France est la contribution française d'un projet de l'API 2007-2008. Son objectif est l'étude extensive, en Antarctique, de l'amplitude et de la durée de la reconstitution de l'ozone et de l'impact du rayonnement UV croissant. Les paramètres clés de la destruction de O_3 sont abordés, en amont, par le rôle des Nuages Stratosphériques Polaires (PSC) et en aval, par la connexion avec l'augmentation du rayonnement UV, dans le but d'améliorer notre capacité de prévision.

Optimiser les observations sol et les coupler à l'échelle du continent antarctique aux mesures satellitaires et à la modélisation

Les mesures à Dumont d'Urville (66°S, 140°E) et à Concordia (75°S, 123°E), d'abord optimisées, sont ensuite associées aux observations des nombreuses autres stations antarctiques. L'idée originale est d'appliquer pour la première fois la méthode "MATCH" à des observations de PSC, combinant mesures lidar (au sol et spatiales) à des prévisions de trajectoires des masses d'air afin d'estimer la capacité à prévoir ces PSC selon différents types de situations. Afin d'évaluer l'impact de l'évolution du climat sur l'occurrence des PSC, une étude de tendances conjointes des températures stratosphériques et des PSC a été menée. La méthode "MATCH", initialement développée pour les mesures d'ozone, a également été mise en œuvre lors d'une campagne de sondage ballons depuis de nombreuses stations antarctiques. Les diminutions de O_3 sont ainsi quantifiées, puis comparées aux résultats d'un modèle pour affiner la compréhension des processus.

Résultats majeurs

Une méthodologie originale de couplage des mesures de PSC (MATCH-PSC) a été mise au point et est en accord qualitatif avec les modèles de formation des PSC. Elle permettra d'aboutir à une prévision réaliste à l'échelle continentale de leur formation. Il a été montré que la fréquence d'occurrence des PSC augmente conjointement avec celle de leurs températures seuils de formation, ce qui est cohérent avec des résultats obtenus en Arctique. Des méthodes de quantification précise des diminutions de O_3 en Arctique et en Antarctique ont été développées. Concernant l'impact des UV, la région proche de l'Amérique du sud est la plus affectée et serait donc, du fait de la présence plus fréquente de masses d'air pauvres en ozone durant le printemps austral, la plus vulnérable en cas de diminution de la couverture nuageuse.



Trajectoires des masses d'air partant de Davis et passant par McMurdo et Dumont d'Urville, entre le 2 août 2007 (03:00 TU) et le 8 août 2007 (18:00 TU). Apparaissent aussi les contours du vortex polaire le 8 août 2007 à 18 :00 TU à environ 16 km. En haut à gauche, le satellite CALIPSO et son lidar embarqué fournissant les mesures entre les trois stations lidar sol à Davis, McMurdo et Dumont d'Urville.

ORACLE- France « Ozone layer and UV Radiation in a changing CLimate Evaluated during IPY- France contribution » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LATMOS (Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales). Le projet a débuté en novembre 2006 pour une durée de 54 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 470 k€ pour un coût global de 1,49 M€.

Production scientifique et brevets

David C., *et al.*, 2010. Radiosonde stratospheric temperatures at Dumont d'Urville (Antarctica): trends and link with polar stratospheric clouds. *Atmos. Chem. Phys.*, 10 : 3813-3825.

Gazeaux J., *et al.*, 2011. Detection of particles layers in backscatter profiles: application to Antarctic lidar measurements. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 11: 21935-21969.

Jumelet J., *et al.*, 2009a. Uniwave length lidar sensitivity to spherical aerosol microphysical properties for the interpretation of lagrangian stratospheric observations. *J. of Atmos. and Solar-Terr. Phys.*, 71 : 121-131, doi:10.1016/j

Jumelet J., *et al.*, 2009b. Size distribution time series of a polar stratospheric cloud observed above Arctic Lidar Observatory for Middle Atmosphere Research (ALOMAR) (69°N) and analyzed from multiwave length lidar measurements during winter 2005. *J. Geophys. Res.*, 114.

Kuttippurath J., *et al.*, 2010a. Estimation of Antarctic ozone loss from ground-based total column measurements. *Atmos. Chem. Phys.*, 10: 6569-6581, doi:10.5194/acp-10-6569-2010.

Kuttippurath J., *et al.*, 2010b. Spatial, temporal, and vertical variability of polar stratospheric ozone loss in the Arctic winters 2004/05–2009/10. *Atmos. Chem. Phys.*, 10 : 9915-9930.

Wolfram E.A., *et al.*, 2008. New differential absorption lidar for stratospheric ozone monitoring in Patagonia, South Argentina. *J. Optics A: Pure and Appl. Optics* 10, 104021 (7 pp.).

Programme « Blanc », édition 2009

OPALE

Le caractère oxydant très prononcé
de l'atmosphère de l'Antarctique de l'EstQuantifier, comprendre et modéliser la forte
abondance des oxydants atmosphériques en
Antarctique de l'Est

Les hautes latitudes sont des régions particulièrement sensibles au changement global : déperdition de l'ozone stratosphérique en Antarctique, pollution exacerbée de la troposphère Arctique, évolution rapide de la glace de mer. Appréhender l'impact du changement global sur ces régions très vulnérables requiert une connaissance approfondie de leurs nombreuses spécificités. Le projet OPALE traite du pouvoir oxydant de l'atmosphère au-dessus de l'Antarctique. Celui-ci est étonnement fort en liaison avec des processus induits par la présence de vastes surfaces de neige et de glace. À partir de mesures atmosphériques menées à Concordia (DC sur le haut plateau Antarctique) et à la station côtière de Dumont d'Urville (DDU), le projet vise à documenter et modéliser le pouvoir oxydant de l'atmosphère à l'échelle de l'ensemble de l'Antarctique. Les résultats ainsi obtenus devraient fortement intéresser les communautés scientifiques travaillant sur différents aspects du changement global (couplage atmosphère-glace-climat, carottages de glace, services d'observation atmosphérique aux hautes latitudes, chimie atmosphérique en régions enneigées).

Mesure et modélisation des oxydants et de
leurs précurseurs à l'échelle du continent
Antarctique

Les mesures atmosphériques visent les radicaux HOx (mesure par spectrométrie de masse à ionisation chimique, instrument national développé au LATMOS) ainsi que leurs précurseurs (ozone, acide nitreux, peroxyde d'hydrogène, formaldéhyde ou encore monoxyde d'azote). La difficile mesure de l'acide nitreux est faite pour la première fois en Antarctique à l'aide d'un LOPAP (Long Path Adsorption Photometer). Cet appareil, beaucoup moins sujet à artéfact que ceux utilisés par nos collègues Américains à Pôle Sud, permettra de mieux comprendre le rôle des oxydes d'azote sur la formation des HOx. À DC, les flux d'émission du manteau neigeux sont mesurés pour les espèces suspectées d'être à l'origine des niveaux élevés d'oxydants atmosphériques. Les paramètres physiques de la neige (gradient de température, surface spécifique, pénétration des radiations solaires) seront étudiés en vue de paramétrer les flux « neige-atmosphère » à l'échelle de l'ensemble de l'Antarctique. Ces données sont introduites dans des modèles photochimiques couplés à un modèle de trajectoire-dispersion. Les simulations sont comparées de manière interactive avec les observations faites à DDU, un site exposé tantôt à des masses d'air continentales (courant catabatique) tantôt purement marines pour lesquelles le pouvoir oxydant sera également documenté.



Collectes atmosphériques effectuées au-dessus du manteau neigeux à Concordia (janvier 2012).

OPALE « Oxydant Production over Antarctica Land and its Export » est coordonné par le LGGE (Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement). Il associe le LATMOS (Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales), le BAS (British Antarctic Survey, Cambridge, UK) et le RHUL (Royal Holloway University of London, Department of Geology). Le projet a débuté en septembre 2009 pour une durée de 36 mois. Il bénéficie d'un financement de l'ANR de 813 k€ pour un coût global de 2,2 M€.

Résultats majeurs

Suite au tragique accident d'hélicoptère survenu en Antarctique en octobre 2010, seule l'étude des oxydants sur Dumont d'Urville a pu être menée à bien fin 2010, les mesures à DC ayant pu être réalisées en fin 2011. Les mesures à DDU ont mis en évidence des teneurs en OH près de 5 fois supérieures à celles rencontrées dans d'autres sites côtiers de l'Antarctique, établissant ainsi le caractère exceptionnellement oxydant de l'atmosphère en Antarctique de l'Est. Les mesures de HONO montrent l'importance de ce composé pour le budget des radicaux OH, ce qui constitue une surprise. Les résultats de la campagne à DC, en cours d'évaluation, apparaissent également très novateurs.

Production scientifique et brevets

Les résultats obtenus à DDU sont très novateurs et ils font l'objet de 4 « companion papers » soumis à J. of Geophys. Res., qui discutent les résultats de OH, HONO et les autres espèces chimiques réactives mesurées (voir Preunkert *et al.*, : An overview of the 2010-2011 summer campaign). Concernant les résultats obtenus à DC, outre les publications attendues suite à la campagne 2011-2012, deux articles ont déjà été publiés sur la physique de la neige.

Programme « Blanc », édition 2006

POLARCAT-FRANCE

Impact de la pollution anthropique et des feux boréaux sur le climat arctique

Contribution au projet international POLARCAT d'étude de la composition de l'atmosphère Arctique

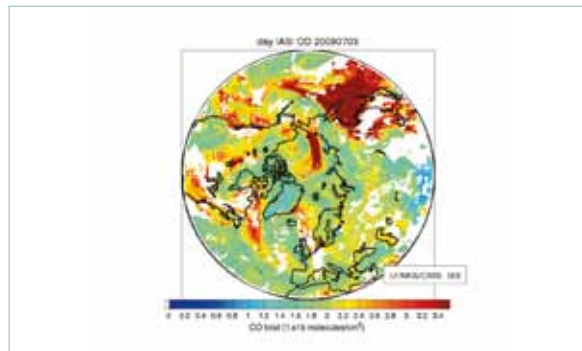
Le projet est la contribution française à l'activité POLARCAT menée dans le cadre de l'Année Polaire Internationale. Il a permis de déployer des mesures aéroportées des polluants gazeux et particulaires au Nord de l'Europe, au Groenland et en Sibérie. L'objectif général est d'améliorer notre compréhension des mécanismes de transport vers l'Arctique de polluants comme l'ozone ou les aérosols. De façon plus spécifique, il s'agit : i) de quantifier l'efficacité des différents régimes de transport vers le nord de la Scandinavie (mer de Barentz) au printemps et vers le Groenland ou la Sibérie en été, ainsi que l'impact des aérosols sur les propriétés des nuages (durée de vie, rôle sur le rayonnement), ii) d'étudier le rôle respectif des feux de forêts boréaux (Sibérie, Canada) et des émissions anthropiques des moyennes latitudes et iii) de valider les observations satellitaires en Arctique par des mesures aéroportées, notamment de la distribution des aérosols et des nuages (mission A-TRAIN) et des polluants gazeux (mission IASI).

Les mesures aéroportées, les observations satellitaires et la modélisation

POLARCAT-France a réalisé avec succès deux campagnes avec l'avion de recherche français ATR-42 au nord de la Suède en avril 2008 et au Groenland en juillet 2008. Des équipements ont aussi été installés dans un avion de recherche russe pour des vols sur la Sibérie en juillet 2008 et en avril 2010. L'ATR-42 a été équipé de mesures *in situ* des aérosols et des nuages et de deux sondeurs laser (lidar) pour détecter les couches d'aérosols et les panaches d'ozone. Les vols de l'ATR-42 au Groenland ont été conduits en coordination avec ceux d'un avion allemand volant à plus haute altitude et d'avions américains basés au Canada pour des survols des feux boréaux. Les vols en Sibérie ont permis une étude des feux asiatiques et du transport depuis la Chine. La validation des mesures depuis l'espace (missions CALIPSO et IASI) a été conduite pour les deux saisons par des séries de vols sous la trace des satellites. Les mesures avion de POLARCAT-France ont été utilisées pour valider des simulations numériques de la composition chimique de l'atmosphère arctique avec le modèle de climat de l'IPSL (Institut Paul-Simon Laplace) et un modèle de nuages permettant d'étudier leur rôle sur le rayonnement.

Résultats majeurs

Le projet a permis la constitution d'une base de données unique sur la composition de l'atmosphère Arctique. L'analyse des données aéroportées et satellitaires a permis d'identifier des couches de pollution transportées depuis l'Asie et l'Amérique du Nord. Une persistance plus forte que prévue des couches d'aérosols a été observée au printemps avec des conséquences sur la couverture nuageuse et le rayonnement. En été, des concentrations élevées d'ozone sont observées dans les panaches de feux boréaux. Les résultats obtenus sont utilisés par des partenaires internationaux pour évaluer les modèles chimie-climat et contribuent aussi aux études de la convention internationale sur le transport des polluants à longue distance



Colonnes totales de monoxyde de carbone mesurées par le satellite IASI le 3 juillet 2008 montrant le transport des panaches de pollution vers l'Arctique depuis l'Asie, la Sibérie et l'Amérique du Nord (adapté de Pommier et al., 2010).

POLARCAT-FRANCE « POLar study using Aircraft, Remote sensing, surface measurements and models, of Climate, chemistry, Aerosols and Transport » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LATMOS (Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales). Il associe le LaMP (Laboratoire de Météorologie Physique) et le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement). Le projet a débuté en mars 2007 pour une durée de 48 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 380 k€ pour un coût global de 1,88 M€ (avec co-financements CNES, INSU, IPEV).

(CLRTAP). Ils ont également permis la mise en place du projet ANR CLIMSLIP (2012-2014) associant d'autres partenaires français.

Production scientifique et brevets

Outre la réalisation de cinq thèses et plus de vingt publications, citons :

- Paris J.D., *et al.*, 2009. Wildfire smoke in the Siberian Arctic in summer: source characterization and plume evolution from airborne measurements. *Atmos. Chem. Phys.*, 9: 9315-9327.
- Adam de Villiers R., *et al.*, 2010. Airborne measurement of aerosol early spring transport to the Arctic. *Atmos. Chem. Phys.*, 10 (11): 5011-5030. doi: 10.5194/acp-10.
- Pommier M., *et al.*, 2010. IASI carbon monoxide validation over the Arctic: A joint study using ACE-FTS satellite data and aircraft measurements during campaigns in spring and summer 2008. *Atmos. Chem. Phys.*, 10:10655-10678.
- Schmale J., *et al.*, 2011. Source identification and airborne chemical characterisation of long-range transport particle pollution plumes over Greenland during POLARCAT-France summer 2008. *Atmos. Chem. Phys.*, 11 (19): 10097-10123.
- Quennehen B., *et al.*, 2011. Physical and chemical properties of pollution aerosol particles transported from North America to Greenland as measured during the POLARCAT summer campaign. *Atmos. Chem. Phys.*, 11 (21): 10947-10963.

Programme « Blanc », édition 2008

STRAPOLETÉ

Ozone et composition de la stratosphère en région polaire arctique en été

Evolution du bilan radiatif terrestre dans le cadre des changements climatiques

La région polaire arctique est particulièrement sensible aux effets du changement climatique. Le temps de résidence des espèces chimiques et aérosols étant plus long dans la stratosphère (au-dessus de 10 km d'altitude), l'identification des sources et des processus d'import de masses d'air provenant d'autres régions sont les clés de la compréhension des modifications du cycle annuel de l'ozone stratosphérique et par voie de conséquence du bilan radiatif terrestre. Dans le cadre de l'API 2007-2008, une campagne de mesures sous ballons stratosphériques a été réalisée avec succès en août 2009 avec le déploiement d'une flotte d'instruments utilisant des techniques de mesures différentes et complémentaires. Avec les mesures d'espèces à longue durée de vie, la provenance des masses d'air a pu être établie ainsi que les espèces réactives régissant la chimie de l'ozone. Les aérosols présents dans cette région ont été caractérisés en termes de nature et de type (solide, liquide). Toutes ces mesures ainsi que les études de modélisation associées permettront de contraindre et d'améliorer les prévisions des changements climatiques.

Les mesures sous ballons stratosphériques : spectroscopie infra rouge, UV, visible et photopolarimétrie

Une flotte de 7 instruments embarqués sous ballons stratosphériques a été déployée sur la base d'Esrang (67°53'N, 21°05'E) au Nord de la Suède pour échantillonner la composition de l'atmosphère polaire. Les caractéristiques des instruments sont résumées ci-dessous. L'analyse des données est effectuée à l'aide de modèles permettant d'étudier le transport des masses d'air et la chimie réactionnelle à l'échelle globale pour caractériser les processus clés qui gouvernent la composition de l'atmosphère.

Résultats majeurs

La composition de l'atmosphère en région polaire Arctique est très variable en fonction de l'altitude. Vers 9-16 km d'altitude, des polluants issus de panaches de pollution urbaine du continent asiatique ont été identifiés. Vers 30 km d'altitude, une couche d'aérosols solides inconnue a été mise en évidence. De plus, une étude climatologique des vents montre une augmentation des intrusions de masses d'air tropicales à 30 km d'altitude au cours de la dernière décennie. Commence-t-on à observer des changements du régime des vents en région Arctique ? Quel en serait l'impact sur la couche d'ozone ?

Production scientifique et brevets

Des mesures de StraPoLété ont été utilisées dans le « Scientific Assessment of Ozone Depletion, 2010 ». Quatre articles dans des revues à comité de lecture sont parus et plus de 20 communications ont été présentées dans des congrès. Des actions de vulgarisation scientifique ont vu le jour (i.e. interview sur France Inter) et des actions de normalisation ont été menées au pôle Thématique ETHER/CNES-INSU avec le retraitement de l'ensemble des données ballons (plus de 600 vols) au format AMES et le « reformating » du code numérique MIMOSA.

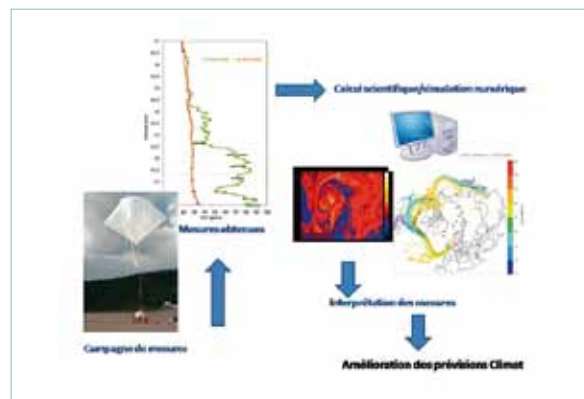


Schéma organisationnel du projet StraPoLété.

STRAPOLETÉ « Etude de la Stratosphère polaire en été : dynamique, aérosols et contenus en brome » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LPC2E (Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement et de l'Espace). Il associe le LPMAA (Laboratoire de Physique Moléculaire pour l'Atmosphère et l'Astrophysique), le LOA (Laboratoire d'Optique Atmosphérique), le LATMOS (Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales), ainsi que l'IUP (University of Heidelberg, Germany) et le NILU (Norwegian Institute for Air Research, Norway). Le projet a débuté en janvier 2009 pour une durée de 42 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 596 k€ pour un coût global de l'ordre de 2,5 M€ (+2,5 M€ en provenance du CNES, de l'IPEV et de l'OSUC de la Région Centre).

Instrument	Technique de mesure	Mesures	Gamme d'altitudes & résolution verticale	Masse
SPIRALE	In situ Absorption directe (moyen infra-rouge)	O ₃ , CH ₄ , N ₂ O, HCl, CO, HNO ₃ , NO ₂ , OCS	O ₃ , CH ₄ , N ₂ O, HCl, CO, HNO ₃ , NO ₂ , OCS	500 kg
SWIR	Mesure à distance infrarouge, visée nadir et limbe	CO, CH ₄ , CO ₂ , OCS	Colonnes	500 kg
LPMA	Mesure à distance infrarouge, Occultation solaire	O ₃ , HNO ₃ , NO, NO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, HCl	15-35 km 1 km	500 kg
DOAS	Mesure à distance UV, occultation solaire	BrO	15-30 km 1 km	Sur nacelle LPMA
SALOMON-N2	infrarouge, visée nadir et limbe	O ₃ , NO ₂ , BrO, aérosols	15-30 km 1 km	180 kg
STAC	In situ Compteur d'aérosols	Distribution dimensionnelle des aérosols	10-35 km 10m	Sur toutes les nacelles
MicroRADIBAL	Mesure à distance Photopolarimétrie	Distribution dimensionnelle et nature des aérosols	15-30 km 1 km	80 kg

5

LES PHÉNOMÈNES HYDRO-CLIMATIQUES EXTRÊMES

LES PRINCIPALES AVANCÉES

Les projets couvrent une large diversité de types d'événements (vagues de chaleur, pluies intenses, sécheresses, tempêtes, cyclones, crues, avalanches, coulées de débris). Ils se répartissent sur l'ensemble des enjeux listés ci-dessous. Les enjeux d'impacts sociétaux concernent la question de la prise de décision face à la prévision des crues-éclair et l'analyse de quelques stratégies d'adaptation à la multiplication des vagues de chaleur à l'échelle de la ville. Les enjeux méthodologiques sont plus largement abordés dans le domaine de la modélisation ou de la descente d'échelle statistico-dynamique que dans celui de l'observation, à l'exception de deux projets traitant des études de processus concernant des événements précipitants ou des impacts d'événements hydro-climatiques extrêmes sur les transferts de matière et la redistribution des polluants en milieu côtier. Tous les projets s'appuient sur, ou perfectionnent des techniques de modélisations statistiques et dynamiques des événements ou de modélisation de leurs impacts. Les enjeux de connaissance concernent plus particulièrement l'analyse des processus et des mécanismes mis en jeu par l'occurrence des événements, l'étude de leur prévisibilité ou celle de leur devenir dans un climat futur.

Les approches méthodologiques et les études de mécanismes

Sur les aspects méthodologiques, une des avancées importantes concerne la représentation statistique des événements extrêmes de tous types, notamment à l'aide d'une modélisation statistique bayésienne permettant la spatialisation de leur durée de retour.

Grâce à la mise en place ou la consolidation d'observatoires existants, le rôle spécifique des événements convectifs et de « cascading » d'eaux denses le long du talus continental, en particulier associés aux événements hydro-climatiques extrêmes, a été mis en évidence sur la distribution de polluants dans l'environnement côtier.

Sur l'explication de l'occurrence des événements, un résultat marquant concerne l'identification de régions où la vapeur d'eau et les processus précipitants peuvent intensifier les tempêtes.

La démonstration a été apportée qu'un déficit des précipitations sur le domaine méditerranéen en hiver et au printemps est une condition nécessaire, mais non suffisante, pour l'occurrence de vagues de chaleur majeures en Europe, y compris plus au nord, l'été suivant.

Des progrès ont aussi été accomplis sur l'étude du lien entre les processus de grande échelle et les caractéristiques statistiques des extrêmes hydro-climatiques : la variation spatio-temporelle de l'activité dépressionnaire, et donc des tempêtes, a pu être reliée, dans une modélisation simplifiée, aux propriétés de la circulation de grande échelle, notamment la structure spatiale du courant jet d'altitude.

Les simulations utilisant une technique particulière de relaxation vers des observations des régions tropicales, suggèrent que ces régions puissent avoir un impact sur des ondes stationnaires aux moyennes latitudes parfois associées à des vagues de chaleur.

Il a été montré que certains mécanismes d'occurrence d'événements pouvaient avoir un impact plus ou moins direct sur la question de la prévisibilité de ces derniers. C'est le cas notamment pour l'intensification des tempêtes ou celles des canicules en Europe.

Une exploration plus systématique de la problématique de la prévisibilité des précipitations extrêmes a été menée. Elle concerne la démonstration de l'amélioration de la prévision quantitative des précipitations grâce à des modèles de forte résolution spatiale et la prévisibilité des événements de pluies intenses dans le Sud-Est de la France, et des incertitudes de ces prévisions, de la courte échéance jusqu'à l'échelle saisonnière.

La manifestation des changements climatiques futurs sur les caractéristiques statistiques des événements hydro-climatiques extrêmes

Partant de simulations climatiques du GIEC-AR4, l'une des études met en évidence une augmentation de 3 % de la cyclogenèse dans le Pacifique Sud à la fin du siècle, mais avec une forte dispersion des résultats, notamment fonction de la capacité des modèles à reproduire la zone de convergence du Pacifique Sud. Cette même étude montre au travers d'une modélisation climatique régionale que, dans le Pacifique Sud-Ouest, le nombre de cyclones pourrait au contraire diminuer de 30 % mais que les plus intenses pourraient augmenter de 10 %.

La méthode de descente d'échelle statistique (MDES) conduite sur le Sud-Est de la France montre que, comme attendu, les extrêmes de température augmentent quels que soient les scénarii d'émission de GES. Cependant les résultats sont plus incertains pour les extrêmes de pluie et de vent avec, toutefois, dans la plupart des localisations de l'étude, une tendance à une légère augmentation pour les premiers mais à une diminution pour les seconds.

Les scénarii produits par des modèles climatiques régionaux à 10 km de résolution et par des MDES à une résolution comparable, ont permis une analyse des effets des changements climatiques sur l'enneigement utilisant un modèle de sol-neige de complexité supérieure à celle des modèles de climat. Il en ressort notamment une forte diminution de la durée d'enneigement dès le milieu du 21^{ème} siècle sur tous les

massifs, une diminution de 50 à 80 % à la fin du siècle, une diminution du risque d'avalanches dans les Alpes du Nord et une augmentation du risque de laves torrentielles (mélange d'eau, de sédiments fins et de débris rocheux) en été dans les Alpes du Sud.

Une étude portant sur la projection des canicules futures à Paris et la construction de stratégies d'adaptation à l'horizon de la fin du siècle prenant en compte l'évolution de la forme urbaine, des réglementations thermiques des bâtiments et de certains usages comme la climatisation a été développée.

Concernant les mécanismes d'adaptation de l'organisme aux épisodes de canicule, il a été montré que la présence d'une neuropathie sensitive est à prendre en compte chez les patients à qui l'on veut apporter de l'aide lors d'une vague de chaleur. Dans ce cas, il serait prudent de remplacer, notamment chez les personnes âgées et/ou diabétiques, l'aspirine par un autre traitement tel que le clopidogrel.

Les phénomènes hydro-climatiques extrêmes

Acronyme et nom du projet		Le projet en un titre
AssimilEx	Theoretical Developments of Data Assimilation Models for Climate Extremes	Pourquoi et comment quantifier l'improbable ?
EXTREMA	Episodes météo-climatiques extrêmes et redistribution des masses sédimentaires et des polluants associés au sein d'un système côtier	Le devenir des particules lors d'événements climatiques extrêmes dans le Golfe du Lion
COPS-France	Convectively and Orographically Driven Precipitation Study	Les systèmes orageux en zone de montagne : précurseurs, cycle de vie et précipitations
CHAMPION	Vagues de Chaleur, Mécanismes, Prévisibilité, Impacts	A la recherche des causes physiques et dynamiques des vagues de chaleur en Europe
ENVI-STORM	Rôle de l'environnement (humidité et déformation) sur le cycle de vie de la variabilité des tempêtes	Le lien entre le développement des tempêtes et le courant-jet atmosphérique
IRCAAM	Influence Réciproque des Climats d'Afrique de l'Ouest, du sud de l'Asie et du bassin Méditerranéen	La puissance de calcul de Météo-France et du CNRS pour mieux comprendre l'origine des canicules
MEDUP	Forecast and projection in climate scenario of Mediterranean intense events: Uncertainties and Propagation on environment	La prévisibilité des extrêmes climatiques et des impacts en Méditerranée
Cyclones & Climat	Vulnerability of the South-Pacific Islands to tropical cyclones altered by ENSO and climate change	Evolution future du risque cyclonique pour les Iles du Pacifique Sud
SCAMPEI	Scénarii Climatiques Adaptés aux zones de Montagne : Phénomènes extrêmes, Enneigement et Incertitudes	Des scénarii pour l'enneigement des massifs français au 21 ^{ème} siècle
VURCA	Vulnérabilité URbaine aux épisodes Caniculaires et stratégie d'adaptation	Climat global et effets locaux : Paris vulnérable aux canicules futures ?
GICC	Prévention des effets de la canicule : optimiser la circulation cutanée chez les personnes à risque	Ajustement thérapeutique durant la canicule

Programme « Jeunes Chercheurs, Jeunes Chercheuses », édition 2006

ASSIMILEX

Pourquoi et comment quantifier l'improbable ?

Quel modèle probabiliste pour décrire la distribution des événements extrêmes ?

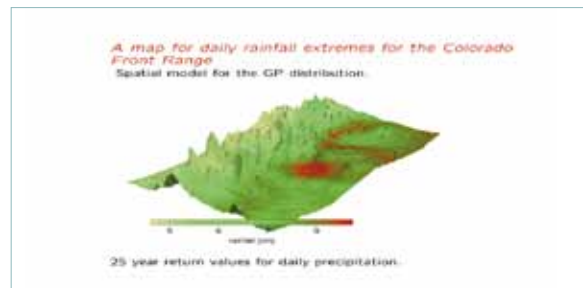
Pourquoi et comment quantifier l'improbable ? Il est facile de trouver des raisons pour motiver le « pourquoi », les événements improbables (crues de 1911, tempêtes de 1999, etc...) ayant souvent des conséquences dramatiques. Par contre, tenter de répondre au « comment » semble voué à l'échec, particulièrement si l'objet d'étude doit prendre une forme déterministe. A titre d'exemple, il est vain d'essayer de prédire la date exacte de la prochaine crue centennale à Paris. Toutefois, il est possible de fournir une information utile si cette connaissance repose sur une modélisation probabiliste, c'est à dire une prise en compte de l'aléa, en d'autres termes la base du calcul des probabilités. L'exemple canonique en ce qui concerne le dimensionnement d'ouvrages de protection (digues, etc.) est la demande faite à l'hydrologue du niveau de retour centennale alors qu'il a à sa disposition 25 ans de données de pluie. Il s'agit d'estimer la valeur qui sera, en moyenne, dépassée une fois par siècle. Cette question s'inscrit bien dans un cadre statistique, plus précisément d'extrapolation probabiliste. Obtenir une connaissance incertaine au-delà de la plus grande valeur observée est l'objet de ce calcul de niveau de retour centennal. Deux éléments fondamentaux sont donc nécessaires : le besoin de théories probabilistes adaptées à ce type d'événements extrêmes et la recherche de méthodes pour calculer les incertitudes associées aux estimations obtenues dans ce cadre probabiliste.

Assimilation des événements extrêmes dans un cadre probabiliste

La théorie des valeurs extrêmes (EVT en anglais) est la branche des statistiques qui décrit le comportement des plus grandes observations d'un jeu de données. Cette théorie a une longue histoire (FISHER, 1928) et elle a été appliquée à une variété de problèmes financiers (Embrechts et al., 1997) et hydrologiques (Katz et al., 2002). Son application aux études climatiques est assez récente. Ces dix dernières années, les climatologues ont commencé à tirer profit de cette théorie (Kharin et al., 2007). Le projet Assimilex s'intègre dans ce mouvement et son objectif principal a été de développer de nouveaux modèles et de nouvelles méthodes statistiques pour traiter de tels événements extrêmes dans le cadre des sciences du climat. Pour introduire et comprendre ces travaux, un rappel des éléments de base de la EVT est nécessaire. Bien que notre compréhension du comportement moyen de la plupart des processus climatiques soit bien maîtrisée, la modélisation statistique des événements extrêmes en temps et en espace reste un problème mathématique difficile. Ceci est principalement dû à la rareté intrinsèque des événements extrêmes, à leurs amplitudes non gaussiennes et aux différentes échelles spatio-temporelles impliquées. Dans le cadre du projet combinant l'expertise des climatologues et des statisticiens, nous avons proposé de développer la distribution des valeurs extrêmes.

Résultats majeurs

Les résultats reflètent les différents éclairages et étapes du projet, à savoir : i) les développements statistiques relatifs à la théorie des valeurs extrêmes, ii) l'étude des distributions non gaussiennes, iii) l'analyse des extrêmes climatiques et iv) la qualité des données et leur extraction. L'ensemble montre clairement le va-et-vient nécessaire



Modèle Bayésien des valeurs extrêmes de précipitation (tiré de D. Cooley et al., 2007).

ASSIMILEX « Theoretical Developments of Data Assimilation Models for Climate Extremes » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement). Il associe l'IRMA (Institut de Recherche Mathématique Avancée, Strasbourg) et l'Institut Camille Jordan, Lyon 1). Le projet a débuté en juin 2006 pour une durée de 36 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 118 k€ pour un coût global de l'ordre de 435 k€.

entre les différentes disciplines pour aller des données observées aux modèles conceptuels et vice-versa. Ne pouvant pas présenter de manière exhaustive tous ces points, la figure ci-dessus explique, à titre d'exemple, comment la distribution GPD (Generalized Pareto Distribution) peut servir de socle à des calculs de niveau de retour extrême. La variable d'intérêt est la précipitation journalière enregistrée dans la région du Colorado pendant la période 1948-2001. D'un point de vue méthodologique, le modèle Bayésien hiérarchique des valeurs extrêmes retenu permet d'intégrer de manière élégante une composante spatiale sur les paramètres de la GPD.

Production scientifique et brevets

Citons de manière non exhaustive :

- Cooley D., et al., 2007. Bayesian spatial modeling of extreme precipitation return levels. *J. of The Am. Statistical Ass.*, 102 (479) : 824- 840.
- Toulemonde G., et al., 2009. Autoregressive models for maxima and their applications to CH₄. *Environmetrics*, doi : 10.1002/env.992.
- Naveau P., et al., 2009. Modeling pairwise dependence of maxima in space. *Biometrika* 96 (1) :1-17, doi : 10.1093/biomet/asp001.
- Carreau J., et al., 2009. A Statistical rainfall-runoff mixture model with heavy-tailed components. *Water Resour. Res.*, Vol., 45 W10437, doi :10.1029/2009WR007880.
- Vannitsem S., et al., 2007. Spatial dependences among precipitation maxima over Belgium. *Nonlin. Process. Geophys.*, 14: 621-630.
- Hannart A., et al., 2009. Why climate sensitivity may not be so unpredictable? *Geophys. Res. Lett.*, Vol., 36 L16707, doi :10.1029/2009GL039640.

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2006

EXTREMA

Le devenir des particules lors des événements climatiques extrêmes dans le Golfe du Lion

Enregistrer les flux de matière depuis les bassins versants des fleuves côtiers jusqu'aux canyons du milieu marin profond lors d'épisodes climatiques intenses

Les aléas climatiques, c'est-à-dire les épisodes météo-climatiques extrêmes telles que les sécheresses, les crues, les tempêtes, sont perçus à la fois comme une manifestation du changement global et comme responsables de déséquilibres majeurs. Dans ce contexte, les environnements côtiers, constituent des systèmes particulièrement vulnérables au changement du climat. Au cours de la dernière décennie, les programmes de recherche consacrés à l'étude du devenir des apports terrigènes délivrés par les rivières au milieu marin, en particulier ceux sur le Golfe du Lion, ont souligné les lacunes de connaissances quant aux conséquences des épisodes météo-climatiques extrêmes sur les transferts de matière et la redistribution des polluants au sein de ces systèmes. L'originalité de EXTREMA est d'identifier les forçages météo-climatiques à l'origine de modifications des stocks et des flux de matière à partir d'Observatoires déployés à large échelle.

Des enregistrements de données à partir d'Observatoires et des campagnes en mer pour alimenter la modélisation hydro-sédimentaire

EXTREMA s'appuie sur des plateformes instrumentées ou des Observatoires déjà existants mis en place par les différents partenaires du projet, dans certains cas depuis plusieurs années. Ces outils ont été adaptés afin de permettre l'enregistrement des épisodes extrêmes, notamment par l'automatisation des prélèvements et des enregistrements, et par l'augmentation de la fréquence d'échantillonnage ou de mesure. Le projet a également bénéficié d'échantillons archives collectés en particulier dans les berges et autres annexes fluviales du Rhône aval, le prodelta rhodanien, le canyon du Lacaze-Duthiers et le bassin profond. La réalisation de 8 campagnes à la mer sur différents navires océanographiques a permis de collecter des échantillons d'eau, de matières en suspension et de sédiments au débouché du Rhône, d'instrumenter les lignes de mouillages au niveau des canyons et du bassin, et de collecter des carottes sédimentaires en milieu marin profond. La mise en place et la consolidation de ces Observatoires en des points stratégiques du Golfe du Lion permet d'acquérir des données clés dans la compréhension des processus de transfert associés à ces épisodes extrêmes et pour le développement, la validation et l'utilisation de modèles hydro-sédimentaires à différentes échelles d'espace et de temps (prodeltas/bassin méditerranéen occidental, événementiel/inter annuel).

Résultats majeurs

Le système côtier du Golfe du Lion présente une vulnérabilité à la fois aux épisodes météo-climatiques de grande amplitude (poussière d'origine saharienne, crues du Rhône, tempêtes, épisodes de coulées d'eau dense-cascading- et convection au large) et aux sources de pollutions (radioactivité d'origine artificielle, métaux trace, composés organiques persistants). Au terme du projet, il apparaît que le processus majeur identifié pouvant conduire à plus ou moins long



Localisation et caractéristiques des différents outils d'acquisition de données exploités au sein de la zone d'étude.

EXTREMA « Episodes météo-climatiques extrêmes et redistribution des masses sédimentaires et des polluants associés au sein d'un système côtier » est un projet de recherche fondamentale à vocation finalisée coordonné par l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire). Il associe le CEFREM (Centre de Formation et de Recherche sur l'Environnement Marin), le CEREGE (Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement), l'Ifremer (Laboratoire Environnement Ressources Provence Azur Corse), le LEP (Laboratoire Environnement Profond) et le LA (Laboratoire d'Aérodynamique). Il a débuté en avril 2007 pour une durée de 54 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 669 k€ pour un coût global de l'ordre de 3,13 M€. Le projet a été labellisé et soutenu par les pôles de compétitivité « Mer Paca » et « Gestion des risques et vulnérabilité de territoires ».

terme à une modification significative de la distribution des contaminants dans l'environnement, soit lié à la réduction du cascading et de la convection. Une des conséquences majeures de ce changement abrupt pourrait être une séquestration des polluants au niveau du plateau continental, lieu privilégié de la production primaire et siège du développement des ressources marines.

Production scientifique et brevets

Parmi la vingtaine de publications internationales à comité de lecture, citons :

Marion C., *et al.*, 2010. *In situ* record of sedimentary processes near the Rhône River mouth during winter events (Gulf of Lions, Mediterranean Sea). *Cont. Shelf Res.*, 30 :1095-1107.

Provansal M., *et al.*, 2010. High-resolution evaluation of recent bank accretion rate of the managed Rhone: A case study by multi-proxy approach. *Geomorphology* 117: 287-297.

Masson O., *et al.*, 2010. Impact of an exceptional Saharan dust outbreak in France: PM10 and artificial radionuclides concentrations in air and in dust deposit. *Atmos. Environ.* 44: 2478-2486.

Programme « Blanc », édition 2006

COPS-FRANCE

Les systèmes orageux en zone de montagne : précurseurs, cycle de vie et précipitations

Vers une amélioration de la prévision quantitative des précipitations sur les zones à topographie complexe

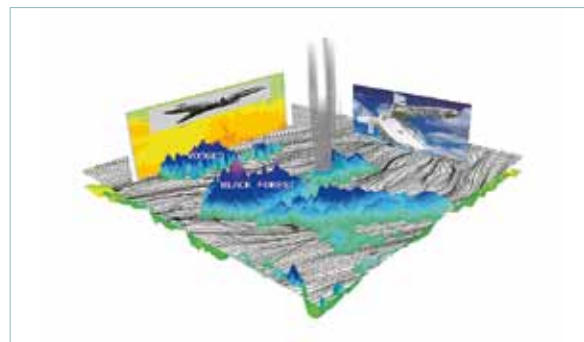
La prévision quantitative des précipitations en régions montagneuses demeure un problème difficile. Ces régions sont des zones à risque puisque les précipitations y sont amplifiées par l'orographie et y génèrent fréquemment de fortes et rapides inondations de type crue-éclair. Toutefois, les différents mécanismes qui conduisent au déclenchement des précipitations en zone de relief complexe et surtout l'importance relative de ces mécanismes ne sont encore ni bien compris, ni bien modélisés. Jusqu'à très récemment, les prévisions météorologiques montraient de piètres performances quant à l'occurrence des épisodes pluvieux en montagne et exhibaient encore des défauts systématiques tels qu'une mauvaise distribution amont/aval des quantités de pluie ou encore un déclenchement trop précoce des précipitations orageuses. Devant ce constat, la communauté internationale s'est mobilisée autour d'une initiative allemande pour lancer un programme ambitieux visant à progresser significativement en matière de prévision quantitative des précipitations sur terrain complexe. Un élément clé de ce programme a été la réalisation de la campagne COPS (Convective and Orographically-driven Precipitation Study).

La campagne de mesures COPS-France

COPS-FRANCE s'est principalement intéressé aux précipitations orageuses estivales qui sont les plus intenses, mais aussi les moins bien prévues. Le projet avait pour objectifs : i) de collecter un jeu de données aussi complet que possible de l'ensemble des variables météorologiques troposphériques, ii) de développer des méthodes d'assimilation permettant de mieux initialiser les variables du cycle de l'eau dans les modèles qui résolvent la convection orageuse, iii) de recueillir une documentation complète de la condition de surface et de son évolution spatio-temporelle et iv) d'élaborer de nouvelles paramétrisations des processus physiques et d'en évaluer l'impact sur l'amélioration de la prévision quantitative des précipitations. La campagne de terrain s'est déroulée de juin à août 2007 dans la région des Vosges et de la Forêt Noire. Elle a permis de recueillir un ensemble d'observations sans précédent grâce à la synergie de nombreux moyens instrumentaux (radars, lidars, radiomètres, GPS, ...). La communauté française a largement contribué à ce dispositif. Elle a assuré l'instrumentation d'un site d'observations dans les Vosges, la mise en œuvre des opérations aéroportées effectuées par le Falcon 20 français ainsi que la densification du réseau de stations GPS. Elle s'est par ailleurs associée à l'effort international de prévision du temps à très haute résolution spatiale.

Résultats majeurs

Un résultat majeur a été la mesure de l'hétérogénéité spatio-temporelle du champ d'humidité rendue possible grâce à une forte synergie instrumentale. L'analyse des observations a révélé que les détails de la topographie contrôlent la localisation des premiers déclenchements convectifs alors que la structure fine du champ d'humidité en



Stratégie expérimentale mise en œuvre lors d'une situation d'orage isolé. Le 15 juillet 2007 en fin de matinée, la vapeur d'eau s'accumule sur les pentes nord de la topographie (coupe verticale le long des Vosges : observations du lidar aéroporté LEANDRE 2). Quelques heures plus tard, la convection se déclenche sur le nord de la Forêt Noire (volume grisé : observations de la zone précipitante par le radar POLDIRAD). Les lignes de courant dans les basses couches révèlent la présence de lignes de convergence qui se développent en aval des sommets et qui fournissent le forçage dynamique (coupe horizontale : prévision du modèle MésO-NH).

COPS-FRANCE « Convectively and Orographically Driven Precipitation Study » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LA (Laboratoire d'Aérodynamique). Il associe l'IPSL (Institut Pierre Simon Laplace), le GAME (Groupe d'Etude de l'Atmosphère Météorologique, Météo-France) et le LaMP (Laboratoire de Météorologie Physique). Le projet a débuté en novembre 2006 pour une durée de 42 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 340 k€ pour un coût global de 2,38 M€. Des financements additionnels ont été fournis par le CNES, l'INSU (programme LEFE/IDAO) et Météo-France.

conditionne l'évolution et la transformation en système orageux. Les travaux de modélisation ont permis de montrer que la forte résolution spatiale des nouveaux modèles numériques améliore significativement la prévision quantitative des précipitations. COPS fut aussi l'opportunité de renforcer fortement les collaborations franco-allemandes.

Production scientifique et brevets

Chaboureaud J.P., *et al.*, 2011. Long-range transport of Saharan dust and its impact on precipitation forecast over western Europe: a case study during the Convective and Orographically induced Precipitation Study (COPS). *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137: 236-251.
Planche C., *et al.*, 2010. The influence of aerosol particle number and hygroscopicity on the evolution of convective cloud systems and their precipitation: A numerical study based on the COPS observations on 12 August 2007. *Atm. Res.*, 98: 40-56.
Yan X., *et al.*, 2009. Benefit of GPS zenith delay assimilation on high-resolution quantitative precipitation forecast: a case study from COPS IOP 9. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 135: 1788-1800.

Programme « Jeunes Chercheurs, Jeunes Chercheuses », édition 2005

CHAMPION

A la recherche des causes physiques et dynamiques des vagues de chaleur en Europe

Les événements de chaleur extrême : un problème à la fois scientifique et sociétal

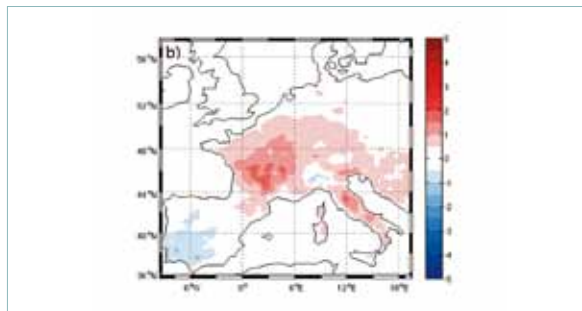
Les vagues de chaleur ont été portées, ou plutôt rapportées, à l'attention du public et de la communauté scientifique, suite aux événements extrêmes des années 2000 : la canicule de l'été 2003 en premier lieu, mais aussi les étés 2005 et 2006, et finalement l'épisode caniculaire russe de 2010. Ces événements ont des conséquences catastrophiques sur la production agricole, la santé humaine et les activités économiques en général. Par ailleurs, l'été est la saison pour laquelle le réchauffement global, et la modification des régimes de pluie associés, sont les plus forts en termes d'impacts. Selon les simulations de changement climatique, une vague de chaleur comme celle de 2003 pourrait bien constituer un prototype de climat européen pour la deuxième moitié du 21^{ème} siècle. Le projet CHAMPION vise à étudier les mécanismes physiques et dynamiques qui génèrent ou aident à la genèse des vagues de chaleur en Europe.

Partir de l'analyse des données observées et l'interpréter grâce à la modélisation mathématique

L'étude des canicules touche à la physique de plusieurs types de phénomènes : la convection humide, l'hydrologie du sol, la dynamique de la végétation, la microphysique de la formation des nuages et du brouillard, la physique des aérosols. Le point central du projet a été de distinguer l'apport de la circulation atmosphérique et des feedbacks physiques locaux dans les vagues de chaleur dans les continents des moyennes latitudes, notamment l'Europe. Le premier défi a consisté à diagnostiquer la séquence des événements pour les différentes variables climatiques, avant et pendant l'extrême climatique. En partant d'observations, il s'agit d'obtenir une représentation statistique pertinente des variations climatiques, qui permet de guider la mise au point de modèles conceptuels de genèse des canicules. La compréhension d'abord et l'évaluation du pouvoir prédictif ensuite, sont accomplis à l'aide d'une hiérarchie de modèles mathématiques et numériques, allant du modèle théorique idéalisé aux modèles climatiques plus complexes, régionaux ou globaux.

Résultats majeurs

On a identifié une situation météorologique synoptique qui crée les conditions pour une canicule. Il s'agit d'un régime anticyclonique persistant qui peut à son tour être influencé, au moins partiellement, par un forçage extérieur comme les températures de surface de la mer. Cette situation synoptique n'explique pourtant pas à elle seule l'amplitude des anomalies de température observées dans les épisodes de canicule en Europe. Le processus additionnel qui amplifie le réchauffement est le feedback entre l'humidité du sol et les précipitations qui chauffe les basses couches de l'atmosphère en modifiant les flux de chaleur sensible et latente et en modifiant la convection. Un état de sécheresse au printemps est donc une condition préalable, nécessaire mais non suffisante, pour l'occurrence d'une canicule. Nous avons aussi montré à partir des observations ou de leur estimation, qu'un déficit de précipitation dans le sud de l'Europe et dans la Méditerranée au cours de l'hiver et du printemps qui précèdent,



Anomalie de l'augmentation de la température (en K) de surface entre juin et juillet, suite à une sécheresse dans la région méditerranéenne dans le modèle régional MM5 (voir Zampieri *et al.*, 2009 pour plus de détails).

CHAMPION « Vagues de Chaleur, Mécanismes, Prévisibilité, Impacts » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LMD (Laboratoire de Météorologie Dynamique). Il a associé le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement) et le CERFACS (Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique). Le projet a débuté en janvier 2006 pour une durée de 45 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 200 k€ pour un coût global de 700 k€.

est une condition nécessaire, mais non suffisante, pour la genèse de vagues de chaleurs estivales majeures. Celles-ci sont donc accompagnées d'une sécheresse, qui se propage du sud vers le nord dès le début de l'été. A contrario, il semble que des hivers et printemps humides dans le sud de l'Europe diminuent la probabilité d'occurrence des vagues de chaleur l'été suivant. La mise en évidence de cette relation statistique déphasée dans l'espace et dans le temps implique une certaine prévisibilité de la probabilité d'occurrence des coups de chaud. L'importance des conditions climatiques dans la région Méditerranéenne, caractérisée par un climat dit de transition entre conditions sèches-subtropicales et humides, est ainsi mise en exergue. Une tendance à l'assèchement du climat de la Méditerranée pourrait donc avoir un impact sur tout le continent Européen.

Production scientifique et brevets

Citons notamment :

- Vautard R., *et al.*, 2009. Decline of fog, mist and haze in Europe over the past 30 years. *Nature Geoscience* 10.1038/NGEO414.
- Vautard R., *et al.*, 2007. Summertime European heat and drought waves induced by wintertime Mediterranean rainfall deficit. *Geophys. Res. Lett.*, 34, doi:10.1029/2006GL028001.
- Cassou C., 2008. Intraseasonal interaction between the Madden-Julian Oscillation and the North Atlantic Oscillation. *Nature* 455, doi:10.1038/nature07286, 523-527.
- Zampieri M., *et al.*, 2009. Hot European summers and the role of soil moisture in the propagation of Mediterranean drought. *J. of Climate* 22: 4747-4758.
- D'Andrea F., *et al.*, 2006. Hot and cool summers: multiple equilibria of the continental water cycle. 33, L24807, doi:10.1029/2006GL027972.

Programme « Jeunes Chercheurs, Jeunes Chercheuses », édition 2006

ENVI-STORM

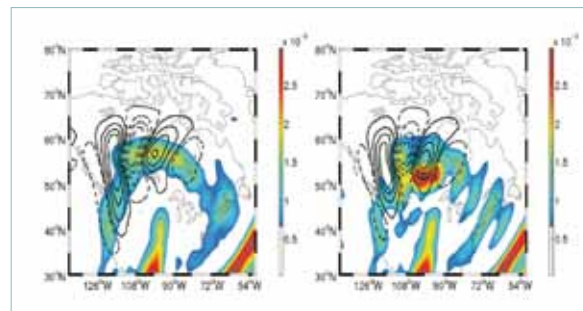
Le lien entre le développement des tempêtes et le courant-jet atmosphérique

Les effets de la circulation atmosphérique planétaire et des processus humides sur le cycle de vie des dépressions

Le climat des latitudes moyennes en hiver est fortement affecté par le cycle de vie des dépressions atmosphériques qui déterminent les régimes de temps typiques pendant plusieurs jours. Un des défis majeurs de la météorologie moderne concerne l'évaluation de l'occurrence et de l'amplitude des phénomènes extrêmes tels que les tempêtes ainsi que leur prévisibilité. Comme les changements climatiques globaux vont modifier les caractéristiques de grande échelle de l'atmosphère (température et contenu en vapeur d'eau), il est par ailleurs important de mieux comprendre comment les propriétés des dépressions atmosphériques dépendent des caractéristiques planétaires de la circulation atmosphérique. L'objectif du projet ENVI-STORM est d'identifier et de caractériser les facteurs qui pré-conditionnent le creusement des tempêtes et qui modifient leur variabilité à l'échelle saisonnière. Les effets de la vapeur d'eau, des processus précipitants et de la structure spatiale du courant-jet ont été étudiés, en prenant en compte les interactions non linéaires entre la circulation de grande échelle et les perturbations atmosphériques.

Développement de nouveaux outils théoriques pour caractériser la dynamique des dépressions atmosphériques

Identifier les mécanismes d'interaction entre les dépressions atmosphériques et leur environnement à grande échelle nécessite l'utilisation et le développement de nouveaux outils théoriques pour mieux prévoir leurs caractéristiques dans le changement climatique. Pour ce faire, différents outils ont été utilisés telles que les simulations numériques simplifiées, les études de prévisibilité, l'assimilation de données satellitaires, la classification des différentes populations de dépressions atmosphériques par rapport à leur environnement. L'effet dynamique de la vapeur d'eau (qui intensifie les dépressions par le dégagement de chaleur latente associée à sa condensation) ainsi que la structure spatiale du courant-jet troposphérique (qui canalise les trajectoires des dépressions) peuvent alors être étudiés grâce à la mise en place et l'utilisation d'un modèle numérique simplifié (mais réaliste) de l'atmosphère. Par ailleurs, un nouvel outil de mesure de la sensibilité du développement des dépressions au contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère a été validé.



Sensibilité non-linéaire à la vapeur d'eau. En noir, le contour des perturbations à plus forte croissance sur 24 heures ; en couleur, l'humidité atmosphérique pour deux calculs de prévisibilité (à gauche, cas de référence, à droite, cas pour maximiser la croissance des perturbations).

ENVI-STORM « Rôle de l'environnement (humidité et déformation) sur le cycle de vie et la variabilité des tempêtes » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LMD (Laboratoire de Météorologie Dynamique). Il associe le GAME (Groupe d'étude de l'Atmosphère Météorologique, Météo-France). Le projet a débuté en novembre 2006 pour une durée de 36 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 110 k€ pour un coût global de 794 k€.

Résultats majeurs

Une méthode utile pour la prévisibilité atmosphérique a été développée afin de déterminer les régions où la vapeur d'eau (et les processus précipitants) va intensifier de façon notable les tempêtes. Des mécanismes associés à la structure spatiale du courant-jet de la troposphère ont été identifiés pour expliquer le creusement rapide de tempêtes de type de celle de décembre 1999. Un modèle idéalisé a permis de relier la variation spatio-temporelle de l'activité dépressionnaire aux différentes propriétés de la circulation de grande échelle et à leurs modifications (comme pouvant arriver pour le changement climatique).

Production scientifique et brevets

Lainé, A. *et al.*, 2009. *Clim. Dyn.*, 32 : 593-614.
Lainé, A. *et al.*, 2010. *J. Atmos. Sci.*, 68 : 1306-1322.
Pangaud, T. *et al.*, 2009. *Mon. Weather Rev.*, 137 : 4276-4292.
Rivière, G., 2009. *J. Atmos. Sci.*, 66 : 1569-1592.
Rivière G. *et al.*, 2010a. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, 136 : 638-652.
Rivière, G. *et al.*, 2010b. *J. of Climate* 23 :2987-3008.
Rivière, G. *et al.*, 2008. *J. Atmos. Sci.*, 65 :1896-1911.
Rivière, G. *et al.*, 2009. *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.*, 135 :1520-1537.

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2006

IRCAAM

La puissance de calcul de Météo-France et du CNRS pour mieux comprendre l'origine des canicules

Comprendre l'influence des Tropiques sur le climat des moyennes latitudes

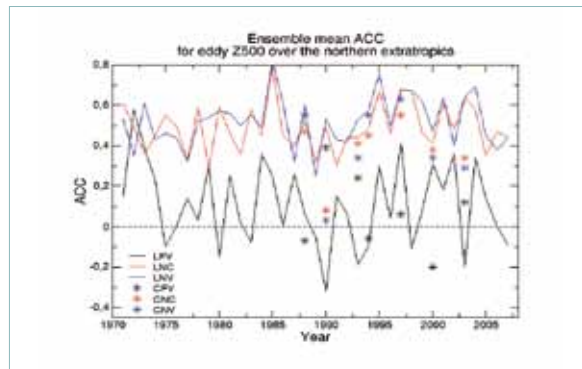
Alors que les modèles de climat sont aujourd'hui utilisés de manière quasi-opérationnelle, aussi bien pour prévoir des anomalies saisonnières que pour réaliser des scénarii du 21^{ème} siècle, la variabilité climatique naturelle recèle encore de nombreux mystères. Le projet IRCAAM vise à comprendre en quoi la variabilité du climat estival observée sur l'Europe et le bassin Méditerranéen est en partie influencée par la circulation atmosphérique tropicale. Les échelles de temps considérées vont de quelques jours à quelques mois avec une attention particulière accordée aux vagues de chaleur telles que l'Europe en a connues pendant l'été 2003. L'enjeu est en effet de savoir si certains phénomènes extrêmes observés aux moyennes latitudes présentent des précurseurs tropicaux, notamment dans les régions de mousson.

Le « nudging » en point de grille : un outil original de compréhension du climat

La méthode originale mise en oeuvre dans le projet IRCAAM consiste à contraindre la circulation tropicale simulée grâce à une relaxation (en anglais « nudging ») vers des ré-analyses atmosphériques, c'est-à-dire une combinaison optimale d'observations et de prévisions météorologiques à courte échéance. L'objectif est ensuite d'évaluer l'impact de ce guidage sur le climat des moyennes latitudes de l'hémisphère Nord. L'identification de la réponse extratropicale nécessite de réaliser des ensembles de simulations relativement coûteux en temps de calcul. Ce n'est qu'à ce prix que l'on peut en effet isoler l'influence tropicale du reste de la variabilité naturelle des moyennes latitudes. Les expériences sont réalisées, soit en imposant des températures de surface de la mer (TSM) observées, soit en imposant des TSM climatologiques (pas de forçage océanique), soit en couplant le modèle avec un océan interactif de manière à savoir si les surfaces océaniques contribuent à amplifier les signaux tropicaux détectés sur l'Atlantique Nord ou le Pacifique Nord.

Résultats majeurs

Les expériences numériques de référence réalisées dans le cadre du projet IRCAAM montrent d'abord qu'une meilleure représentation de la convection et de la circulation tropicale permettait aux modèles atmosphériques globaux d'améliorer la simulation du climat extratropical, en particulier le positionnement climatologique des ondes stationnaires, c'est à dire des asymétries zonales (le long d'un cercle de latitudes) qui caractérisent la circulation des moyennes latitudes. De plus, les études de cas réalisées sur quelques étés particuliers (dont l'été 2003) suggèrent que ces ondes, parfois associées à des vagues de chaleur, peuvent être modulées par la variabilité tropicale et amplifiées par des facteurs plus régionaux (rôle des températures de surface de la mer du proche Atlantique et de l'humidité du sol sur l'Europe).



Corrélation spatiale entre les anomalies estivales (saison JJAS) observées (ré-analyses ECMWF) et simulées (moyennes d'ensemble sur 10 et 30 intégrations pour les modèles LMDZ et CNRM, respectivement) de la composante stationnaire (i.e. après retrait des moyennes zonales) du géopotential à 500 hPa au nord de 30°N, pour chaque année comprise entre 1971 et 2007 avec le modèle du LMD (trait continu) et quelques études de cas avec le modèle du GAME-CNRM (astérisques). Trois types d'expériences sont comparés : simulations de contrôle forcées par des températures de la mer observées (en noir), simulations « nudgées » forcées par des températures de la mer observées (en bleu) ou climatologiques (en rouge).

IRCAAM « Influence Réciproque des Climats d'Afrique de l'Ouest, du sud de l'Asie et du bassin Méditerranéen » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le GAME (Groupe d'Etude de l'Atmosphère Météorologique, Météo-France). Il associe le CERFACS (Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique), le LEGOS (Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales), le LMD (Laboratoire de Météorologie Dynamique) et le LOCEAN (Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentations et Approches Numériques). Le projet a débuté en avril 2006 pour une durée de 42 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 280 k€ pour un coût global de 1,39 M€.

Production scientifique et brevets

Parmi les 14 publications dans des revues internationales à comité de lecture, citons :

- Bielli S., Douville H., Pohl B., 2009. Understanding the West African monsoon variability and its remote effects: an illustration of the grid point nudging methodology. *Climate Dyn.*, doi:10.1007/s00382-009-0667-8.
- Douville H., Bielli S., Cassou C., Déqué M., Hall N., Tyteca S., Voldoire A., 2011. Tropical influence on boreal summer mid-latitude stationary waves. *Climate Dyn.*, doi:10.1007/s00382-011-0997-1.
- Mohino E., Janicot S., Li L., Douville H., 2011. Impact of the Indian part of the summer MJO on West Africa using nudged climate simulations. *Climate Dyn.*, doi:10.1007/s00382-011-1206-y.

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2007

MEDUP

La prévisibilité des extrêmes climatiques et de leurs impacts en Méditerranée

Quantification et propagation des incertitudes des prévisions et projections climatiques dans l'évaluation des impacts des extrêmes climatiques

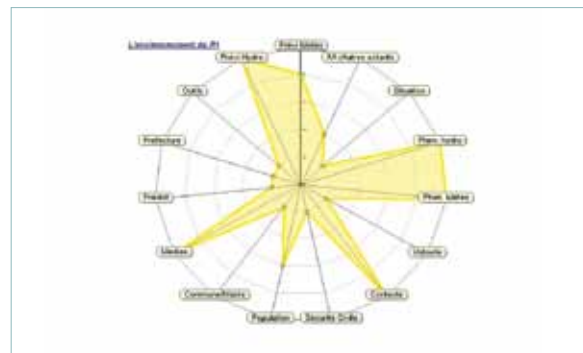
L'arc Méditerranéen est soumis régulièrement à des événements hydrométéorologiques intenses : pluie intense entraînant des crues éclairs, vents forts provoquant fortes houles et submersion marines, sécheresses. Le projet MEDUP porte sur l'identification et la quantification des sources d'incertitudes associées à la prévision numérique du temps et à la simulation climatique de ces événements intenses. Il avait notamment pour objectif de quantifier et réduire ces incertitudes et de prendre en compte leurs propagations dans les méthodes d'évaluation des impacts de ces événements climatiques extrêmes. Une originalité de MEDUP est d'examiner ces questions pour des modélisations météorologiques à différentes échelles de temps au sein d'un même projet : la prévision numérique du temps (1-4 jours), la prévision saisonnière (1-3 mois) et les scénarios climatiques (50-100 ans). Le projet a aussi considéré toute la chaîne des incertitudes, i.e. de la modélisation des événements météorologiques intenses à la vulnérabilité des milieux à ces événements.

Simulations hydrométéorologiques d'ensemble

Les méthodes de quantification des incertitudes en modélisation atmosphérique ou en modélisation hydrologique reposent sur la réalisation d'ensembles de simulations. Le projet a développé de nouvelles méthodes des perturbations pour générer ces ensembles afin d'échantillonner au mieux les différentes sources d'incertitudes aux différentes échelles de temps et d'espace (conditions initiales, conditions aux limites, modélisation des processus). La quantification des incertitudes des projections climatiques et de leurs impacts a de plus considéré différents scénarii d'émission, différents modèles de climat et différentes méthodes de régionalisation climatique. Les incertitudes sur l'évolution de la végétation avec le changement climatique sont aussi prises en compte dans l'évaluation des impacts sur les surfaces continentales que ce soit en termes de sécheresse ou de crues. L'analyse de la propagation des incertitudes sur la vulnérabilité des milieux a fait pour sa part appel à des outils d'analyse économique et de risque ainsi qu'à des analyses de la chaîne d'alerte et des interviews de ses acteurs.

Résultats majeurs

MEDUP a réalisé une qualification des modèles et méthodes de régionalisation climatique pour la représentation des extrêmes météorologiques et a montré que les incertitudes de tous les maillons de la chaîne d'évaluation des impacts devaient être considérées (scénario d'émission, modèle de climat, méthode de régionalisation et modèle d'impact). Dans le domaine de la prévision des événements intenses, une chaîne complète de prévision d'ensemble hydrométéorologique des crues rapides pour quantifier les incertitudes associées aux prévisions météorologiques et hydrologiques a été développée. L'analyse du processus d'alerte aux crues rapides a montré l'importance d'une traduction des degrés d'incertitudes entre les différents types d'acteurs.



Analyse des éléments de l'environnement mobilisés lors du processus d'alerte selon les profils d'acteurs (ici le profil traducteur) : Sources d'information (humaines et dispositifs techniques), éléments physiques (météorologie, fleuve...), éléments territoriaux, réseaux sociaux, ... (D'après Créton- Cazanave, 2010).

MEDUP « Forecast and projection in climate scenario of Mediterranean intense events : Uncertainties and Propagation on environment » est un projet de recherche fondamentale à vocation finalisée coordonné par le GAME (Groupe d'Etude de l'Atmosphère Météorologique, Météo-France). Il associe le LMD (Laboratoire de Météorologie Dynamique), le LTHE (Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement), le LA (Laboratoire d'Aérodynamique) et le CIRED (Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement). Le projet a débuté en janvier 2008 pour une durée de 42 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 834 k€ pour un coût global de l'ordre de 4,8 M€.

Production scientifique et brevets

Les résultats du projet ont donné lieu à 35 articles publiés ou soumis dans des revues scientifiques internationales. Une partie de ces publications est rassemblée dans un numéro spécial¹ dédié à MEDUP de la revue internationale Natural Hazards and Earth System Sciences. Les partenaires du projet sont également intervenus plus de 90 fois dans des conférences internationales pour présenter les résultats du projet.

¹Forecast and projection in climate scenario of Mediterranean intense events: uncertainties and propagation on environment (the MEDUP project). Eds: V. Ducrocq, P. Drobinski, D. Lambert, G. Molinie and M.C. Llasat. (http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/special_issue133.html).

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2006

CYCLONES & CLIMAT

Evolution future du risque cyclonique
pour les Iles du Pacifique SudQuantifier et mieux comprendre la modification
des cyclones avec El Niño et avec le climat du
futur dans le Pacifique Sud

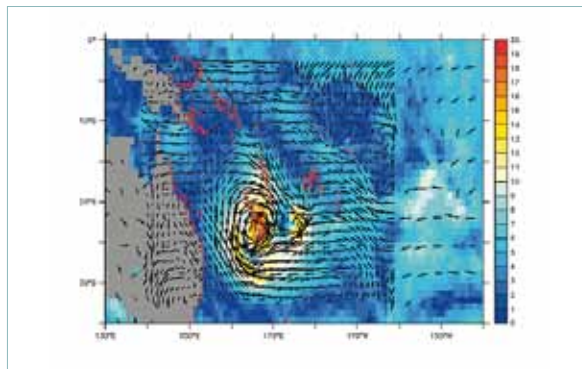
Les cyclones sont les événements météorologiques récurrents les plus dévastateurs de la région tropicale. Le Pacifique Sud-Ouest, parsemé d'innombrables îles à haute vulnérabilité, en compte environ 10 par an (15 % du nombre global annuel). Les dégâts qu'ils occasionnent se comptent en milliards d'euros. Comprendre la modification des cyclones en fonction des grands modes de variabilité du climat actuel tel qu'El Niño - Oscillation australe (ENSO) ou avec le changement climatique représente un défi majeur qui est au cœur du projet Cyclones & Climat. Dans ce cadre, nous avons montré que, pour le climat actuel, les indices empiriques caractérisant la cyclogenèse sont généralement imprécis sauf, dans le Pacifique Sud, durant l'ENSO. Pour le futur, ces indices donnent des résultats souvent incohérents régionalement liés à une très mauvaise représentation de la zone de convection du Pacifique Sud (la SPCZ) où naissent les cyclones et pourtant cruciale pour la machine climatique mondiale.

Les indices de cyclogenèse en fonction de la
grande échelle et les simulations régionales
pour le présent et le futur

Deux méthodes ont été mises en oeuvre. La première, indirecte, est fondée sur des indices qui calculent statistiquement la genèse cyclonique en fonction de l'organisation de l'Océan et de l'atmosphère à grande échelle. Ces indices sont particulièrement utiles pour déterminer et comprendre l'évolution du risque à travers des simulations qui ne représentent pas les cyclones explicitement, ce qui est le cas de la majorité des modèles utilisés actuellement pour prédire l'évolution future du climat. Le projet a quantifié et évalué, sur le climat actuel, les facteurs contrôlant la cyclogenèse durant El Niño/La Niña à travers les quatre indices les plus répandus. Utilisant un scénario futur catastrophe (SRESA2) et à travers 15 modèles du GIEC, nous avons évalué l'évolution possible de la cyclogenèse pour la fin du 21^{ème} siècle et caractérisé les disparités régionales entre modèles. La deuxième méthode, directe, consiste à simuler explicitement les cyclones dans des modèles atmosphériques résolvant des échelles inférieures à 50 km. Pour ce faire, nous avons produit et suivi des cyclones dans un modèle atmosphérique régional à 30 km, emboîté dans un modèle à 100 km, forcé par des champs de grande échelle issus des modèles du GIEC. L'utilisation des deux méthodes a permis de mieux comprendre les limites de l'utilisation quantitative des indices de cyclogenèse et des simulations régionales dans l'état de l'art actuel.

Résultats majeurs

Les indices de cyclogenèse montrent en moyenne sur le Pacifique Sud et pour les 15 modèles, une augmentation de 3 % de la cyclogenèse dans le scénario catastrophe SRESA2, mais avec une dispersion entre modèles très importante. Les résultats montrent également qu'il est possible de produire, sur le présent, une simulation régionale à 30 km permettant une représentation de qualité de la



Emprise du modèle atmosphérique régional emboîté (l'Australie est à gauche). La couleur représente la précipitation en mm/j et les flèches correspondent aux vents de surface. En rouge, le contour des îles du domaine. Un cyclone typique est simulé à cette époque et passe sur la Nouvelle-Calédonie. On note l'extension spatiale du cyclone qui affecte tout le territoire avec la structure en bandes spiralées des précipitations qui s'enroulent vers le cœur du cyclone. Les vitesses de vent maximum atteintes sont ici de 50 m/s.

CYCLONES & CLIMAT « Vulnerability of the South-Pacific Islands to tropical cyclones altered by ENSO and climate change » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LOCEAN (Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentations et Approches Numériques). Il associe le GAME (Groupe d'Etude de l'Atmosphère Météorologique, Météo-France). Le projet a débuté en mai 2007 pour une durée de 42 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 165 k€ pour un coût global de 480 k€.

SPCZ. Cette simulation a cependant montré que 30 à 40 % de la variabilité interannuelle des cyclones du Pacifique Sud était due à la nature chaotique de l'atmosphère, ce qui limite fortement leur prévisibilité interannuelle et peut expliquer une partie de la dispersion des indices de cyclogenèse. Le modèle régional développé montre que le nombre des cyclones pourrait diminuer de 30 % mais que le nombre de cyclones les plus intenses pourrait augmenter de 10 % dans le futur. Il est donc certain que les estimations futures de l'évolution des cyclones par la modélisation régionale ou par des indices de cyclogenèse ne pourront être véritablement fiables que lorsque la structure de la SPCZ sera grandement améliorée dans les modèles de climat.

Production scientifique et brevets

Citons notamment :

Menkes C., *et al.*, 2011. Climate Dyn., doi 10.1007/s00382-011-1126-x.
Jourdain N.C., *et al.*, 2011. J. of Climate 24 (1): 3-25.

Royer J.F., Chauvin F., 2009. In "Hurricanes and Climate Change", J. B. Elsner and T. H. Jagger (Eds.), Springer, ISBN : 978-0-387-09409-0 :213-234.

Chauvin F., Royer J.F., 2011. In: J.B. Elsner et al., (Eds). In "Hurricanes and Climate Change", Vol. 2, Springer Science, Berlin, doi:10.1007/978-90-481-9510-7-3.

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2008

SCAMPEI

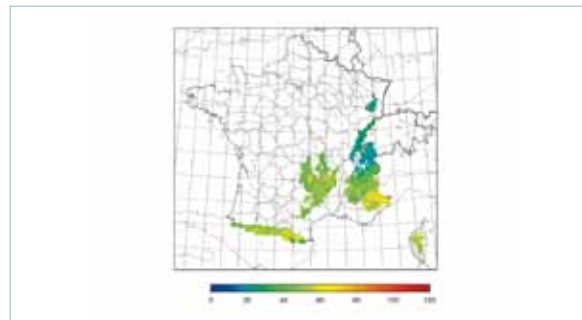
Des scénarii pour l'enneigement des massifs français au 21^{ème} siècle

Modéliser le climat et son évolution en prenant en compte la diversité géographique du pays, en particulier en montagne

La dernière génération de modèles climatiques régionaux atteint maintenant la résolution de 10 km, ce qui est l'équivalent de la résolution horizontale des phénomènes observés sur la durée (analyses Safran de Météo-France de 1958 à nos jours). Il reste cependant trois obstacles à franchir. Le premier est le biais des modèles. Un système d'équations hydrodynamiques, même bien calibré, ne peut représenter exactement la distribution des observations, ce qui pose un problème pour les phénomènes à seuil comme la neige. Le deuxième est le climat de montagne. Même à résolution de 10 km, on ne peut représenter les pics et les vallées qui connaissent pourtant des conditions de surface très différentes, du fait de l'altitude et des gradients verticaux de température. Le troisième obstacle est l'incertitude. On peut contraindre les résultats des modèles à suivre plus ou moins le climat présent. On ne peut les empêcher d'apporter des réponses différentes pour le climat futur. Le projet SCAMPEI a développé une technique originale pour produire des séries quotidiennes du climat sur trois périodes (passé, futur proche et futur lointain) en fonction de la position géographique et de l'altitude. Les diverses sources d'incertitudes ont été illustrées (3 modèles français) et quantifiées (14 modèles du GIEC).

Une chaîne de modèles dynamiques et statistiques pour aboutir à des données d'enneigement par tranche d'altitude

La construction de scénarii climatiques est issue au départ de simulations du GIEC. Une approche directe consiste à utiliser un système d'identification de situations analogues qui relie une carte de pression sur la France à une situation observée dans le passé. On peut ainsi, grâce aux analyses Safran mentionnées plus haut, fournir des séries météorologiques à haute résolution à partir de modèles à résolution grossière (300 km) pour le passé comme pour le futur. Cette approche permet d'aborder efficacement les incertitudes, mais ne s'appuie pas sur les phénomènes physiques de méso- échelle. A partir de simulations GIEC, nous avons extrait puis corrigé les températures de surface de l'océan mondial. Nous les avons utilisées pour bâtir, avec des modèles atmosphériques, un deuxième jeu de simulations plus fin (50 km sur l'Europe) et plus proche de la réalité. Les conditions atmosphériques autour de la France ont été utilisées pour un troisième jeu de simulations à résolution encore plus fine (10 km). Les séries quotidiennes issues des modèles ont été corrigées statistiquement par rapport à Safran, par tranche verticale de 300 m. Les séries corrigées ont servi à piloter un modèle de sol-neige de complexité supérieure à celle des modèles de climat.



Variation (%) du nombre de jours par an à 1500 m d'altitude ayant une hauteur de neige au sol supérieure à 5 cm entre la période futur proche (2021-2050) et la référence (1961-1990) dans l'un des scénarii du projet.

SCAMPEI « Scénarios Climatiques Adaptés aux zones de Montagne : Phénomènes extrêmes, Enneigement et Incertitudes » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le GAME (Groupe d'étude de l'Atmosphère Météorologique, Météo-France). Il associe le LMD (Laboratoire de Météorologie Dynamique), le CERFACS (Centre Européen de Recherche et Formation Avancée en Calcul Scientifique), le LGP (Laboratoire de Géographie Physique) et le LGGE (Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement). Le projet a débuté en janvier 2009 pour une durée de 36 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 555 k€ pour un coût global de 2,39 M€.

Résultats majeurs

Le principal résultat est la forte diminution dès le milieu du 21^{ème} siècle de la durée d'enneigement de tous les massifs et ce, jusqu'à une altitude de 2500 m. A la fin du siècle, la durée annuelle d'enneigement est réduite de 80 % dans les scénarii les plus pessimistes, mais 50 % dans les scénarii optimistes. Ce résultat est robuste malgré la forte disparité de la réponse des modèles en ce qui concerne les précipitations. On note aussi une diminution du risque d'avalanches dans les Alpes du Nord, et une augmentation du risque de laves torrentielles en été dans les Alpes du Sud.

Production scientifique et brevets

Colin J., Déqué M., Radu R., Somot S., 2010. Sensitivity study of heavy precipitation in limited area model climate simulations: influence of the size of the domain and the use of the spectral nudging technique. *Tellus A* 62: 591-604.
Rousselot M., Durand Y., Giraud G., Mérindol L., Dombrowsky- Etchevers I., Déqué M., 2012. Statistical adaptation of ALADIN RCM outputs over the French alpine massifs: Application to future climate and snow cover. *The Cryosphere* (submitted).
Pavlova I., Jomelli V., Granicher D., Brunstein D., Martin E., Déqué M., 2012. Debris Flow activity related to current climate conditions in the French Alps: a regional investigation based on SAFRAN reanalyzed data. *Geomorphology* (submitted).

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2008

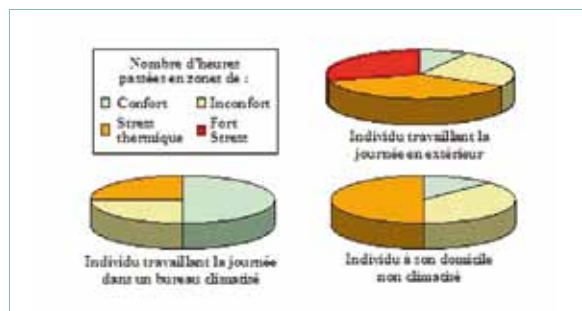
VURCA

Climat global et effets locaux :
Paris vulnérable aux canicules futures ?La vulnérabilité de l'espace urbain parisien
aux vagues de chaleur futures et les stratégies
d'adaptation

Les villes sont particulièrement concernées par le changement climatique : elles représentent une forte concentration de population, de richesses et d'infrastructures, en augmentation constante, et sont soumises à des îlots de chaleur urbains influencés par la morphologie et la croissance urbaine. Or, les projections climatiques montrent une augmentation de la fréquence et l'intensité des vagues de chaleur pour ce milieu du siècle (M. Déqué, 2007). Le projet vise à évaluer la vulnérabilité de l'espace urbain aux canicules en termes de pertes de confort thermique et de sensibilité de la demande énergétique liée à l'usage de la climatisation. Le projet propose ainsi de construire un indicateur de gravité des vagues de chaleur qui relie des informations climatiques globales à leurs effets locaux. Plusieurs cas de canicules futures et leur probabilité d'occurrence sont étudiés afin d'établir également un indicateur de vulnérabilité de la ville aux canicules. Des scénarii d'adaptation concernant les matériaux des bâtiments, l'usage de la climatisation et la forme urbaine sont ensuite définis, et leur impact évalué en terme de réduction de la vulnérabilité aux vagues de chaleur.

Une approche climatique et socioéconomique

Le projet VURCA propose une approche interdisciplinaire avec la prise en compte des aspects environnementaux, techniques et socioéconomiques. D'un point de vue méthodologique, il est prévu d'intégrer au sein d'un cadre d'étude commun les résultats de trois méthodes analytiques différentes, fondées sur un modèle climatique, un modèle de climat urbain et un modèle couplé transport/logement. Des vagues de chaleur futures, aux caractéristiques contrastées en termes de durée et d'intensité, sont extraites de projections climatiques. Des simulations de climat urbain sont alors menées pour une ville donnée (Paris) soumise à ces vagues de chaleur afin d'estimer leur impact sur le confort thermique des habitants et la consommation énergétique liée à la climatisation. Le projet construit ensuite à l'horizon 2100 un panel de villes stylisées issues de scénarii socioéconomiques d'expansion, de projections d'évolution des réglementations thermiques des bâtiments et d'usage de la climatisation. Ces villes stylisées constituent différentes stratégies d'adaptation au climat futur, dont les impacts seront calculés par les modèles numériques et évalués à l'aide des indicateurs définis.



Stress thermique par jour : exemple pour une canicule de 14 jours.

VURCA « Vulnérabilité URbaine aux épisodes CANiculaires et stratégie d'adaptation » est un projet de recherche fondamentale à vocation finalisée coordonné par le CIRED (Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement). Il associe le GAME (Groupe d'étude de l'Atmosphère Météorologique, Météo-France) et le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment). Le projet a débuté en janvier 2009 pour une durée de 36 mois. Il bénéficie d'un financement de l'ANR de 476 k€ pour un coût global de 1,78 M€.

Résultats majeurs

Le projet VURCA participe à l'amélioration des connaissances scientifiques des impacts d'une canicule et apporte des informations aux autorités locales lors de la planification urbaine. Les résultats principaux concernent : la définition des indicateurs de gravité d'une canicule et de vulnérabilité de la ville ; la projection des canicules futures sur Paris ; la construction des stratégies d'adaptation à l'horizon 2100 (évolutions de la forme urbaine, du bâti urbain et de certains modes d'usage). En synergie avec les projets MUSCADE (ANR 2009) et ACCLIMAT (RTRA 2009), VURCA permet de poser les bases méthodologiques vers une simulation intégrée de la ville.

Production scientifique et brevets

Beuland A.L., Lemonsu A., Somot S., Masson V., 2011. Future heat waves in Paris metropolitan areas. *Natural Hazards and Earth Syst. Sci. J.* (submitted).

Vigüé V., Hallegatte S., 2011. The impact of a carbon tax on Paris metropolitan area and its population. *European Assoc. of Environ. and Resour. Economists J.* (submitted).

Vigüé V., Hallegatte S., 2011. A First quantification of trade-offs and synergies in urban climate policies. *Nature Climate Change* (submitted).

Programme « Gestion et Impacts du Changement Climatique, édition 2005 »

PRÉVENTION DES EFFETS DE LA CANICULE

Ajustement thérapeutique durant la canicule

Prévention des effets de la canicule : optimiser la circulation cutanée chez les personnes à risque

Les effets de la canicule de 2003 ont permis d'identifier des populations à risque : personnes âgées ou ayant une maladie cardiovasculaire, un diabète, une affection neuro-psychiatrique avec les risques liés aux diverses thérapeutiques... Pour établir une stratégie préventive adaptée à ces populations, il est nécessaire de mieux connaître les moyens de lutte de l'organisme contre une chaleur environnementale excessive, leurs altérations chez les personnes à risque et les moyens de palier ce déficit. Les pertes thermiques de l'organisme se faisant principalement par l'augmentation de la température cutanée et par la sudation, il est indispensable que le débit sanguin cutané augmente car il apporte la chaleur et l'eau. Les travaux ont porté sur le débit sanguin cutané qui varie en fonction de l'état de santé des personnes et des thérapeutiques utilisées. Comme beaucoup de personnes âgées ont un traitement antiagrégant plaquettaire (aspirine ou clopidogrel) préventif des pathologies cardiovasculaires, nous nous sommes intéressés à cette population à risque. Le travail a été réalisé en deux temps. D'abord la mise au point de techniques et les essais sur des sujets sains jeunes puis progressivement sur des personnes à risque.

La mesure de la microcirculation cutanée par débitmètres Laser Doppler pour diverses stimulations thermiques, électriques ou mécaniques

L'étude a été réalisée en trois étapes : i) la première concerne les sujets jeunes sains à qui il a été demandé de prendre de l'aspirine, du clopidogrel ou un placebo. La réponse neurovasculaire testée par le courant était différente entre les sujets sous aspirine et ceux sous placebo ainsi qu'entre ceux sous aspirine et ceux sous clopidogrel. Cependant, il n'y avait pas de différence de réponse entre les sujets sous clopidogrel et ceux sous placebo. Si l'on veut maintenir le débit sanguin cutané parfaitement fonctionnel, il convient donc de prescrire du clopidogrel au lieu de l'aspirine à l'annonce d'une canicule. Le traitement antérieur pourra être repris dans la période post caniculaire, ii) dans la deuxième étape, la vasodilatation cutanée des personnes âgées avec ou sans neuropathie a été comparée à celle de sujets jeunes. Dans les deux groupes de personnes âgées, la vasodilatation endothéliale dépendante est beaucoup plus faible que celle des sujets jeunes. En réponse au test mécanique, les sujets âgés sains ont une vasodilatation beaucoup plus faible que les jeunes. Les personnes âgées neuropathes n'ont pas de vasodilatation à ce test. La présence d'une neuropathie est donc à prendre en compte dans le choix des patients à qui l'on veut apporter de l'aide lors d'une canicule, iii) la troisième étude a concerné les patients diabétiques qui très souvent ont une prescription d'un antiagrégant plaquettaire en prévention primaire des complications cardiovasculaires. Chez ces patients qui ont une vasodilatation cutanée endothéliale dépendante et neurovasculaire diminuée par rapport à des sujets sains, il serait prudent de remplacer l'aspirine pendant la période caniculaire.



Exploration de la microcirculation cutanée.

Prévention des effets de la canicule : optimiser la circulation cutanée chez les personnes à risque est un projet de recherche clinique coordonné par l'Université Claude Bernard/Lyon 1. Il associe le Laboratoire de physiologie de l'UER de médecine d'Angers et le Laboratoire d'explorations fonctionnelles vasculaires du CHU d'Angers. Le projet a commencé en novembre 2005 et s'est terminé en décembre 2008. Il a bénéficié d'un financement du GICC de 61,7 k€ pour un coût global de 147,6 k€.

Résultats majeurs

La présence d'une neuropathie sensitive est à prendre en compte dans le choix des patients à qui l'on veut apporter de l'aide lors d'une canicule. Chez ces patients souvent âgés et/ou diabétiques, qui ont très souvent un traitement préventif avec un antiagrégant plaquettaire, il serait prudent de remplacer l'aspirine pendant la période caniculaire. Si l'on veut maintenir le débit sanguin cutané parfaitement fonctionnel, il convient donc de prescrire du clopidogrel au lieu de l'aspirine à l'annonce d'une canicule. Le traitement antérieur pourra être repris dans la période post caniculaire. Cette suggestion n'est qu'un élément dans la prise en charge globale des patients à risque.

Production scientifique et brevets

Rousseau P, Tartas M, Fromy B, Godon A, Custaud M.A., Saumet J.-L., Abraham P., 2008. Platelet inhibition by low-dose aspirin but not by clopidogrel reduces the axon-reflex current-induced vasodilation in humans. *Am. J. Physiol.*, 294(5):R1420-6.
Rousseau P., Mahé G., Fromy B., Ducluzeau P.H., Saumet J.-L., Abraham P., 2009. Axon reflex cutaneous vasodilatation is impaired in type 2 diabetic patients receiving chronic low dose aspirin. *Microvasc Res.*, 78(2):218-23.
Fromy B., Sigaudou-Roussel D., Gaubert-Dahan M.L., Rousseau P., Abraham P., Benzoni D., Berrut G., Saumet J.L., 2010. Aging-associated sensory neuropathy alters pressure-induced vasodilatation in humans. *J. Invest. Dermatol.*, 130(3):849-55.
Gaubert M.L., 2008. Doctorat de l'Université Claude Bernard Lyon 1.

6

LA VULNÉRABILITÉ DES AGRO- ÉCOSYSTÈMES AUX CHANGEMENTS GLOBAUX ET LEUR ADAPTATION

LES PRINCIPALES AVANCÉES

Les projets de recherche, qu'ils soient de type fondamental ou finalisé, couvrent la diversité de la vulnérabilité des agro-écosystèmes aux changements globaux (climatiques, anthropiques, abiotiques, biotiques) tels que : i) les systèmes cultivés et naturels, ii) les forêts situées en zone tempérée et méditerranéenne, iii) les prairies permanentes ou temporaires, iv) les élevages herbagés ou pastoraux.

La typologie des approches mises en œuvre va de l'analyse fine des processus éco-physiologiques, phyto-écologiques ou microbiens, à la contribution des sciences humaines et sociales aux démarches d'adaptation cognitive humaine au changement climatique, en passant par : i) des observations *in situ*, ii) des enquêtes et des démarches participatives des parties prenantes à la gestion soutenable des milieux, iii) des expérimentations en conditions contrôlées de laboratoire ou de terrain, la plupart étant associées à des modélisations mécanistes ou statistiques et iv) des exercices de simulation numérique de l'impact de la variabilité climatique récente (notamment les phénomènes extrêmes de sécheresse, mais pas uniquement) et du climat futur à partir des projections du GIEC et ce, en relation avec les services climatiques du PNACC.

Les terrains d'étude concernent essentiellement la France métropolitaine et ultramarine, à l'exception de deux milieux dont l'un est situé en zone soudano-sahélienne de l'Afrique de l'Ouest et l'autre en zone tropicale de l'Afrique de l'Est et de l'Argentine centrale. Plusieurs projets s'appuient sur des Services d'Observation, des SOERE ou des Zones Ateliers.

De l'observation de terrain aux expérimentations en conditions contrôlées de laboratoire ou *in situ*

La production d'un jeu de données et le développement d'une modélisation à base éco-physiologique unique ont permis d'analyser les principaux facteurs contrôlant la dynamique saisonnière des teneurs en ^{18}O et en ^{13}C de la cellulose du bois. Le modèle permet notamment de reconstruire, à partir des variations isotopiques intra-cernes et de forçages climatiques régionaux, l'évolution des dates de début et de fin de saison de croissance cambiale au cours des dernières décennies et d'étudier les effets différés sur le fonctionnement des arbres suite à des événements extrêmes de type sécheresse ou canicule.

Les sécheresses récurrentes de 2003 à 2006 qui se sont produites en France constituent des aléas ayant induit la perte de croissance et la dégradation sanitaire des arbres dans la plupart des couples essences x régions étudiées. La récurrence des sécheresses, plus que l'intensité et la durée de l'évènement extrême de 2003, a provoqué une réduction durable de croissance, voire la mort de certains individus. A l'échelle des peuplements, les facteurs de vulnérabilité sont les contraintes édaphiques à l'enracinement, les faibles réserves en eau utiles des sols, la sylviculture peu dynamique, l'âge des arbres et parfois la richesse trophique. Les facteurs individuels de vulnérabilité sont liés à l'espèce, la provenance, au statut et à la performance de croissance des arbres dans leur jeune âge ou au cours des années précédant les aléas. Il a été montré que cette vulnérabilité individuelle peut s'appréhender par la largeur du bois d'aubier, la croissance radiale (ancienne ou récente selon les espèces), la micro-densité du bois.

Des expériences d'exclusions de précipitation ont été menées sur les écosystèmes terrestres méditerranéens. Elles montrent que les arbres acclimatent des traits fonctionnels associés à l'assimilation du carbone ou au transport de l'eau. Les changements dans l'architecture et la baisse des surfaces transpirantes permettent aux arbres d'affronter des sécheresses sévères et limitent leur vulnérabilité. Au niveau des écosystèmes, les réponses sont plus complexes du fait de l'intrication de mécanismes agissant avec des constantes de temps contrastées. Les changements peu significatifs de la respiration du sol peuvent s'expliquer par les faibles changements du pool de carbone et des activités microbiennes et fongiques.

De même, un effort multidisciplinaire important a été apporté pour mieux comprendre comment une réduction des précipitations et un changement de la biodiversité vont influencer de manière interactive le recyclage d'éléments clés comme le carbone et l'azote de l'écosystème méditerranéen. L'ensemble des résultats, en apportant des connaissances nouvelles, permettent de mieux prédire et donc anticiper ces effets, afin de prendre des mesures de gestion appropriées, ce qui est particulièrement important dans la région méditerranéenne soumise à une forte pression de l'urbanisation et du tourisme.

L'utilisation de mini chambres hexagonales à toit ouvert (Open-Top Chambers, OTCs) dans les tourbières du site de Frasné met en évidence qu'une hausse de température moyenne (+ 1°C) provoque des modifications significatives dans les interactions «sphaignes-communautés microbiennes-carbone labile», conduisant à une perte nette de carbone de $0.24 \text{ gC m}^{-2} \text{ j}^{-1}$ au profit de l'atmosphère. Les réponses au réchauffement climatique des deux situations étudiées (tourbières du bas-et haut-marais) montrent que la variabilité spatiale de l'humidité est primordiale pour la compréhension de l'impact d'un réchauffement global sur le devenir du cycle du carbone. On retiendra que le dispositif expérimental, labellisé Service d'Observation par l'INSU a été reproduit en Pologne (Projet CLIMPEAT) et le sera prochainement en Sibérie (Projet CiiMireSiber).

L'utilisation d'une technique de mesure d'antioxydants a permis d'obtenir des relations entre teneur en antioxydants (ascorbate, glutathion) et degré de toxicité à l'ozone chez le blé, le maïs et le peuplier et ce, en conditions contrôlées et au champ. Les données collectées pour paramétrer la détoxication ont permis d'améliorer les cartes de dépôt stomatique et non stomatique de l'ozone à l'aide du modèle CHIMERE. Il est prévu d'intégrer un modèle de diffusion de l'ozone dans d'autres plus globaux pour aboutir à une estimation des conséquences économiques via le modèle AROPAj.

Des projections pour l'agriculture, la forêt et les populations de vertébrés

L'étude conduite sur les cultures en France montre que l'avancée des stades phénologiques et la réduction de leur durée sont particulièrement importantes pour les cultures de printemps (maïs, tournesol) et les plantes pérennes (vigne) dont une partie du cycle est postérieure au maximum thermique, impactant ainsi leur rendement potentiel. La réduction projetée de la pluviométrie conduit à une légère dégradation du confort hydrique et à une forte baisse de la recharge des aquifères. La production présente des résultats contrastés selon les systèmes : augmentation pour les cultures d'hiver (blé, colza) et la prairie (mais différemment répartie), diminution pour les cultures de printemps (maïs, tournesol) et les conifères, la vigne étant surtout affectée par un changement de qualité des baies. Les régions sont différemment affectées : opportunités pour le Nord-Est de la France en raison de l'augmentation de la température, risques pour le Sud-Ouest en raison de la baisse de pluviométrie.

Concernant la prairie, également en France, la production (quantité et qualité) est plus affectée par l'augmentation de la variabilité climatique (épisodes de chaleur et de sécheresse) que par un réchauffement moyen de quelques degrés. Les légumineuses fixatrices d'azote et les graminées de bonne qualité fourragère sont les plus sensibles ; les plantes à réserves (pivots, rhizomes) et celles déjà adaptées (variétés méditerranéennes) sont les plus résilientes, une baisse de la fréquence d'exploitation de la prairie renforçant sa résilience. Les résultats expérimentaux soulignent également des conséquences négatives pour l'environnement : le réchauffement entraîne une dégradation du bilan de GES de la prairie et la quantité d'eau drainée vers la nappe est fortement réduite. Toutefois, l'augmentation du CO₂ atmosphérique limite ces effets négatifs. La modélisation illustre les risques et les opportunités pour les élevages herbagers français : risque élevé de chute de la production à l'herbe de lait et de viande durant la période estivale ; nette augmentation du potentiel de production aux autres saisons. La démarche participative mise en œuvre a abouti à des propositions de transformations des systèmes d'élevage.

Pour l'agriculture tropicale, les retombées sont aussi bien méthodologiques que thématiques et pratiques. La comparaison de plusieurs régions (Afrique de l'Est, Nord Cameroun, Argentine centrale) a permis de définir un protocole pour quantifier la prévisibilité potentielle aux échelles fines des impacts agricoles couplé avec l'analyse précise des paramètres qui conditionnent ou pas la traduction des signaux climatiques au travers des échelles imbriquées du système climatique. Une attente particulière concerne également la mise en évidence des paramètres à la fois attendus par les utilisateurs finaux et potentiellement prévisibles à l'échelle régionale.

Pour la forêt française, les comparaisons des variations interannuelles du flux net de carbone simulées par le modèle ORCHIDEE avec celles de la croissance radiale d'arbres ont permis d'optimiser les paramètres clés du modèle contrôlant l'impact des extrêmes climatiques et d'améliorer la prise en compte des effets retard sur la croissance. Les simulations spatialisées, selon deux scénarii climatiques, soulignent l'importance des changements climatiques sur la productivité forestière. Les cartes d'impact obtenues illustrent des contrastes selon les régions et les scénarii sylvicoles et elles apportent des éléments nouveaux pour adapter les pratiques sylvicoles au changement climatique. Bien qu'entachées d'incertitudes, la prise en compte des stress biotiques dans les modèles de fonctionnement a progressé, ouvrant la voie à l'introduction de fonctions génériques selon une typologie des pathogènes et des ravageurs, incluant la localisation, le type d'interaction et le mode d'acquisition des ressources.

Le développement d'outils analytiques et l'exploitation de la modélisation, notamment bayésienne, ont permis, à partir de l'analyse d'études de cas, d'identifier un ensemble de patrons de variation démographique de populations de plusieurs espèces de vertébrés et d'étudier comment celles-ci sont influencées par les variations climatiques.

Les stratégies de mitigation et d'adaptation

Une approche fondée au départ sur les aspects biotechniques des territoires alpins, a été élargie pour intégrer le contexte social. Les écosystèmes de montagne ont une forte résilience aux événements de sécheresse, récente ou expérimentale. Des premières réponses sont cependant perceptibles pour le recrutement forestier. Les effets à long terme, en particulier de successions d'années de sécheresse exceptionnelle, restent inconnus. Il existe une cohérence importante entre réponses écologiques observables selon les échelles de temps, réponses d'adaptation récentes des acteurs, et anticipations sur la base de scénarii combinant sécheresse et contexte sociétal. La mise en place d'un Système d'Observation adapté aux contraintes des milieux de montagne et aux besoins de leurs acteurs répondrait aux besoins scientifiques et aux demandes des acteurs.

Fondée sur une recherche située à l'interface entre sciences biophysiques et sciences humaines et valorisant les bases de données existantes sur le climat, les écosystèmes et les systèmes agraires, en particulier en liaison avec le SOERE AMMA-CATCH, les indicateurs développés confirment que l'élevage de la région soudano-sahélienne atténue la vulnérabilité économique des familles

rurales et favorise l'émergence de pôles de fertilité des sols dans les terroirs. Ils révèlent aussi la vulnérabilité de l'élevage pastoral naisseur à l'expansion des cultures et aux restrictions d'accès qui accompagnent l'essor démographique. Etablis à l'échelle de communes, les indicateurs pourraient constituer des outils d'aide à la décision des politiques communales et publiques.

Une étude visant à apporter des connaissances fondamentales sur l'adaptabilité humaine face aux changements climatiques a été développée pour la France métropolitaine (Paris et Ile-de-France, Ile de Ré, Alpes) et ultramarine (Guyane, Nouvelle Calédonie). L'approche utilisée associe l'anthropologie, la psychologie et la psycho-sociologie, la didactique de la physique appliquée. Elle est fondée sur une série d'entretiens non et semi-directifs selon différentes classes d'âge de la population. Les résultats montrent que la majorité des groupes humains étudiés manifeste des difficultés cognitives pour organiser les informations climatiques en une vision cohérente en fonction des différents modes culturels de pensée (holistique, analytique) et des spécificités environnementales de leurs milieux de vie. Les données mettent également en évidence une importante inconsistance cognitive ne permettant pas de relier les dimensions spatiales et temporelles, locales et globales du changement climatique. Il en résulte la nécessité de développer des modes de communications et d'informations dynamiques adaptés aux spécificités des sujets auxquels ces supports sont destinés.

Le portail « DRIAS, les futurs du climat », une des mesures phares du Plan National d'Adaptation au Changement Climatique, permet aux acteurs impliqués dans les questions d'adaptation, d'accéder facilement à un ensemble d'informations plus ou moins complexes sur le climat futur, allant de documents explicatifs au téléchargement de simulations climatiques au format numérique, en passant par la visualisation interactive de cartes. Reposant sur un système de production robuste et en phase avec le monde de la recherche, ce portail se trouve être une des pierres angulaires des services climatiques français, ainsi qu'un outil majeur pour l'adaptation en France.

La vulnérabilité des agro-systèmes aux changements globaux et leur adaptation

Acronyme et nom du projet		Le projet en un titre
MIST	Modelling the Isotope Signals in Trees	Décrypter les signaux climatiques et physiologiques enregistrés dans le bois
DRYADE	Vulnérabilité des forêts au changement climatique : de l'arbre aux aires bioclimatiques	Comprendre la vulnérabilité des forêts aux aléas climatiques et biotiques
FAST	Analyse et Spatialisation de scénario intégré de changement global pour la Forêt française	La forêt française soumise au changement climatique et aux mutations de la filière-bois
DROUGHT+	Mediterranean ecosystems face increasing droughts: vulnerability assessments	Les écosystèmes forestiers méditerranéens face aux changements climatiques
CLIMED	Impacts des changements climatiques sur la biodiversité et conséquences pour le fonctionnement d'un écosystème méditerranéen	Le climat méditerranéen va changer : quelles conséquences pour la flore et la faune ?
PEATWARM	Impact d'un réchauffement climatique simulé <i>in situ</i> sur la fonction puits de carbone des tourbières à sphaignes	Effets du réchauffement climatique sur le fonctionnement des tourbières
VULNOZ	Vulnérabilité des agro-écosystèmes à l'ozone : Quels risques à l'horizon 2020-2030 ?	L'impact de la pollution à l'ozone sur les cultures et les forêts
CLIMATOR	Evaluation des Outils de Références pour l'analyse de la vulnérabilité des agro-écosystèmes face au changement CLIMATique	L'impact du changement climatique sur des systèmes de culture et naturels représentatifs de la France
VALIDATE	Vulnérabilité des prairies et des élevages au changement climatique et aux événements extrêmes	Comment adapter les prairies et les élevages français au changement climatique ?
SECALP	Adaptation des territoires alpins à la recrudescence des sécheresses dans le contexte du changement global	L'adaptation des territoires alpins aux sécheresses
ECliS	Elevage, Climat et Société	L'élevage aggrave ou atténue-t-il la vulnérabilité rurale en Afrique de l'Ouest ?
PICREVAT	Prévision de l'Information Climatique pour la Réduction de la Vulnérabilité de l'Agriculture Tropicale	Optimiser les prévisions climatiques saisonnières pour l'agriculture tropicale
GICC	Réponses des populations de vertébrés aux changements climatiques	Vers des modèles prédictifs fondés sur les processus démographiques
ACOCLI	Adaptation cognitive aux changements climatiques	Le traitement cognitif des informations climatiques
DRIAS	Donner accès aux scénarii climatiques Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnements	Nous n'avons droit qu'à un seul climat, plusieurs futurs sont possibles. A nous de choisir !

Programme « Blanc », édition 2007

MIST

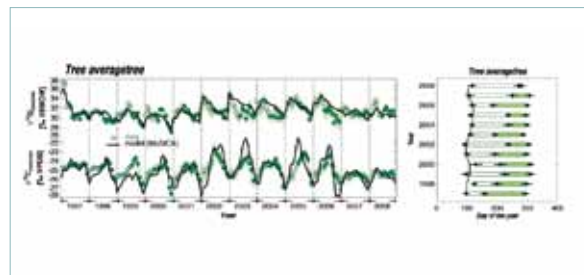
Décrypter les signaux climatiques et physiologiques enregistrés dans le bois

Reconstruire la réponse physiologique des arbres aux variations climatiques passées en région tempérée

Comprendre comment les variations climatiques au cours des derniers siècles ont influencé la croissance des forêts est nécessaire pour anticiper les effets des changements climatiques futurs sur la production forestière. Les arbres absorbent du CO_2 et de l'eau pour construire le bois du tronc. Ainsi, à la fin de chaque saison de croissance, un nouveau cerne annuel de bois est formé, visible à l'œil nu, et dont l'épaisseur et la densité varient suivant les conditions climatiques (température, humidité, ensoleillement, etc.). Cependant, en zones tempérées, les facteurs climatiques influençant l'épaisseur et la densité du bois sont multiples et changent d'une saison à l'autre. De plus, l'influence de la variabilité des conditions édaphiques et de la diversité génétique sur ces grandeurs dendrométriques est difficile à prendre en compte, et complique l'interprétation de leurs variations. L'objectif général du projet MIST était de développer des outils à base éco-physiologique prenant en compte l'influence des conditions climatiques et édaphiques et permettant de reconstruire et d'étudier la réponse physiologique des arbres aux variations climatiques passées en région tempérée.

Développer un modèle de dendroclimatologie isotopique à base éco-physiologique pour les forêts tempérées

Les teneurs en ^{13}C et en ^{18}O de la cellulose du bois présentent des variations inter- et intra-cernes cohérentes entre différents arbres voisins. Ces variations sont le reflet des interactions entre plusieurs variables environnementales et de la réponse de la plante à cet environnement, via des fractionnements isotopiques associés aux différents processus conduisant à la formation du bois : la photosynthèse, l'ouverture stomatique, la respiration, le transport phloémien, le stockage de réserves carbonées et leur remobilisation. Le projet MIST visait trois objectifs : i) caractériser, à l'aide de mesures intensives conduites dans les Landes de Gascogne, les teneurs isotopiques des principaux réservoirs et flux intervenant lors de la formation du bois (CO_2 de l'air, eau des précipitations, du sol, du xylème et des feuilles, sucres phloémiens et foliaires, photosynthèse, respiration et cellulose), ii) développer, à l'aide des mesures précédentes, un modèle mécaniste générique des signaux isotopiques enregistrés dans la cellulose du bois et iii) tester l'apport du nouveau modèle sur de « longues » chronologies isotopiques (100 ans) pour différentes essences en Europe.



Variations intra- et inter-cernes des teneurs en ^{18}O et ^{13}C de la cellulose du bois mesurées ($n=1-5$ suivant l'année) et modélisées sur des pins maritimes adultes (> 30 ans) dans les Landes de Gascogne (a) ; dates de débourrement (trait noir) et périodes de croissance cambiale optimisées pour minimiser l'écart modèle-mesure (les périodes de bois de printemps et d'été sont distinguées par différentes couleurs) (b).

MIST « Modelling the Isotope Signals in Trees » est un projet de recherche fondamentale coordonné par l'Unité EPHYSE (Ecologie fonctionnelle et PHYSique de l'Environnement, INRA-Bordeaux). Il associe BioEMCo (Biogéochimie et Ecologie des Milieux Continentaux) et le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement). Le projet a débuté en novembre 2007 pour une durée de 48 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 300 k€ pour un coût global de 2,2 M€.

Résultats majeurs

Le projet a permis de produire un jeu de données et un modèle à base éco-physiologique uniques permettant d'analyser les principaux facteurs contrôlant la dynamique saisonnière des teneurs en ^{18}O et en ^{13}C de la cellulose du bois. Le modèle permet notamment de reconstruire, à partir des variations isotopiques intra-cernes et de forçages climatiques régionaux, l'évolution des dates de début et de fin de saison de croissance cambiale au cours des dernières décennies (figure 1b), et d'étudier les effets différés sur le fonctionnement des arbres suite à des événements extrêmes de type sécheresse ou canicule.

Production scientifique et brevets

Citons notamment :

- Ogée *et al.*, 2009. *Plant, Cell and Env.*, 32: 1071-1090.
- Devaux *et al.*, 2009. *Rapid Commun. Mass Spectrom.*, 23: 2511-2518.
- Wingate *et al.*, 2010a. *Global Change Biol.*, 16: 3048-3064.
- Wingate *et al.*, 2010b. *New Phytologist* 188: 576-89.
- Daux *et al.*, 2011. *Earth Planet Sci. Lett.*, 309: 221-33.
- Domec *et al.*, 2012. *Tree Physiology* (in press).

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2006

DRYADE

Comprendre la vulnérabilité des forêts aux aléas climatiques et biotiques

Facteurs et mécanismes impliqués dans la vulnérabilité d'essences forestières à des aléas climatiques et biotiques

Dans le contexte de modification du climat, la communauté internationale prévoit que les sécheresses vont augmenter en fréquence et en intensité. Les sécheresses récurrentes de 2003 à 2006 en France ont été suivies de dysfonctionnements réversibles dans les forêts (perte de croissance, dégradation temporaire de l'état des arbres) ou irréversibles (mortalités). Le projet DRYADE s'est attaché à comprendre les vulnérabilités des principales essences forestières aux conséquences d'interactions entre aléas climatiques et biotiques, à travers divers enjeux : croissance, état sanitaire, mortalité, présence ou régénération de l'espèce. L'intensité des sécheresses a été quantifiée par calcul ou mesures de bilan hydrique. Les facteurs de vulnérabilité ont été appréhendés à différentes échelles : limite d'aire de présence, région, le massif, peuplement ou arbre au sein du peuplement. Les dimensions éco-physiologiques, écologiques, sylvicoles, phytosanitaires, pédo-climatiques, génétiques et individuelles de la vulnérabilité ont été prospectées. Cela a nécessité la mise au point préalable d'indicateurs de vulnérabilité, de normes de réponse et de seuils de sensibilité. Un atlas de facteurs élémentaires de vulnérabilité, pertinents à l'échelle nationale, a enfin été élaboré.

Des approches couplées de phytoécologie, d'écophysiologie, de dendroécologie, d'exploration de base de données et de modélisation

La vulnérabilité éco-physiologique d'une vingtaine d'espèces à la sécheresse édaphique et atmosphérique a été synthétisée à partir d'une synthèse de la littérature internationale et non publiée. Les fonctions de réponse (régulations en phase liquide et vapeur, profils d'enracinements, relations hydriques ...) ont été établies et standardisées (normes) pour être comparables entre études et entre espèces. La vulnérabilité de la croissance a été appréhendée soit par analyse du cerne produit en 2003 et mesuré largement en France par l'Inventaire Forestier National, soit par analyse rétrospective de la croissance radiale (dendrochronologie). L'analyse de la base de signalements du Département de la Santé des Forêts a permis de quantifier et localiser les aléas biotiques (maladie foliaire, ravageurs) et les impacts (dépérissement). Des fonctions de réponse au climat et aux sécheresses ont été établies sur les croissances radiales, la texture des cernes ou encore les paramètres micro-densitométriques du bois. Des couples d'arbres vivants et morts ont été utilisés pour dégager les traits de vulnérabilité individuelle au sein des peuplements ou des massifs.

Résultats majeurs

Les sécheresses récurrentes de 2003 à 2006 sont les aléas ayant induit la perte de croissance et la dégradation sanitaire des arbres dans la plupart des couples essences x régions étudiées. La récurrence des sécheresses, plus que l'intensité et la durée de l'événement extrême 2003, a provoqué une réduction durable de croissance, voire



Mortalité de chênes pédonculés en 2005 après coïncidence entre défoliations successives par des chenilles processionnaires et sécheresse exceptionnelle en Moselle (Photo N. Bréda).

DRYADE « Vulnérabilité des forêts face au changement climatique : de l'arbre aux aires bioclimatiques » est un projet de recherche fondamentale à vocation finalisée, coordonné par l'INRA-Nancy. Il associe cinq autres unités INRA, le LBLGC (Laboratoire de Biologie des Ligneux et des Grandes Cultures), des gestionnaires forestiers privés (IDF) et publics (ONF), l'Inventaire Forestier National (IFN) et le Département de la Santé des Forêts (DSF). Le projet a débuté en janvier 2007 pour une durée de 48 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 976 k€ pour un coût global de 4,39 M€.

la mort de certains individus. Les facteurs de vulnérabilité à l'échelle des peuplements sont les contraintes édaphiques à l'enracinement, les faibles réserves utiles des sols, la sylviculture peu dynamique, l'âge des arbres et parfois la richesse trophique. Les facteurs individuels de vulnérabilité sont liés à l'espèce, la provenance, au statut et à la performance de croissance des arbres dans leur jeune âge ou au cours des années précédant les aléas. Cette vulnérabilité individuelle peut s'appréhender par la largeur du bois d'aubier, la croissance radiale (ancienne ou récente selon les espèces), la micro-densité du bois. DRYADE a été à l'initiative d'une journée de transfert vers les professionnels et la presse, co-organisée par l'INRA, le RMT AFORCE et le GIP ECOFOR (à consulter sur : www.foretpriveefrancaise.com/colloque-vulnerabilite-313849.html).

Production scientifique et brevets

La production scientifique de DRYADE rassemble à ce jour 18 publications dans des revues à comité de lecture, 21 communications internationales. Un numéro spécial d'Annals of Forest Sciences a paru en 2012 rassemblant les travaux réalisés au cours du projet et non encore publiés.

Un guide de gestion de forêts en crise sanitaire a été co-publié en 2010 par les partenaires du projet (ISBN : 978-2-84207-344-2, en vente par l'IDF : www.foretpriveefrancaise.com/guide-de-gestion-des-forets-en-crise-sanitaire-259183.html).

Programme « Gestion et Impacts du Changement Climatique », édition 2008

FAST

La forêt française soumise au changement climatique et aux mutations de la filière-bois

Quelles seront les évolutions régionalisées de la forêt française face aux aléas climatiques et biotiques, sous différents scénarii de gestion ?

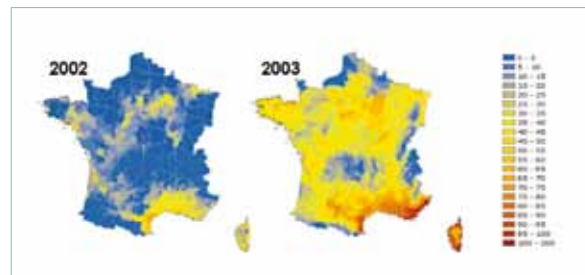
Le rôle des forêts dans le cycle du carbone, avec en particulier leur propriété de séquestrer le CO₂ atmosphérique, commence à être bien documenté, grâce à des réseaux de mesure modernes et homogènes. Les modèles de processus de type sol- arbre- atmosphère calculent les flux nets de masse (gaz) et d'énergie (chaleur, eau) entre végétation et atmosphère ainsi que la productivité en bois de façon de plus en plus réaliste. Ces recherches sur le fonctionnement des écosystèmes, ainsi que les données issues des réseaux d'observation de l'état de santé des forêts, montrent clairement que ces écosystèmes sont vulnérables aux aléas climatiques en particulier aux extrêmes et biotiques (ravageurs, maladies), qui impactent fortement le fonctionnement, voire la survie des arbres. Par ailleurs, la forêt, en France en particulier, subit une évolution rapide dans certaines régions, sous l'effet des demandes de la filière bois, avec des conséquences directes sur les interactions avec l'atmosphère. Le projet FAST a pour objectif d'analyser différents scénarii d'évolution de la forêt française, dans sa composition et sa distribution spatiale, au cours des prochaines décennies. Plusieurs hypothèses réalistes, croisant scénarii climatiques et itinéraires de gestion forestière sont choisis pour réaliser des simulations à haute résolution spatiale, jusqu'à l'horizon 2100. L'effet des attaques biotiques a aussi été pris en compte à titre exploratoire pour quelques cas types dont la processionnaire des pins.

Développement de modèles de processus et simulations spatialisées à une échelle fine

Le projet s'articule autour de trois axes : i) Le premier conduit à définir l'état initial du système par la constitution de bases de données spatiales des sols, de la couverture forestière et du climat, à la résolution spatiale la plus fine recommandée par les climatologues (8x8 km), ii) Le second axe concerne l'amélioration des modèles de fonctionnement pour réaliser les simulations spatio-temporelles. Un travail spécifique et original a été mené pour modéliser le développement et évaluer l'impact de grands types de ravageurs de la forêt, insectes et champignons, iii) le troisième axe concerne la phase de simulation proprement dite, de l'époque actuelle à l'horizon 2100. Il s'agit ici d'analyser la sensibilité croisée des forêts à l'évolution brutale du climat local, de la sylviculture et des épidémies de ravageurs. Le projet associe des écologues, des éco-physiologistes, des biophysiciens, des entomologistes et pathologistes forestiers, interagissant de façon étroite avec la communauté des modélisateurs.

Résultats majeurs

Les comparaisons des variations interannuelles du flux net de carbone simulées par le modèle ORCHIDEE et celles de la croissance radiale d'arbres ont permis d'optimiser les paramètres clés du modèle contrôlant l'impact des extrêmes climatiques et d'améliorer la prise en compte des effets retard sur la croissance. Les simulations spatialisées selon deux scénarii climatiques soulignent l'importance



Le forçage des flux d'eau et de carbone par la sécheresse du sol : un exemple de cartes de déficit hydrique forestier à 8 km de résolution pour une année proche de la moyenne trentenaire (2002) et pour une année proche du climat simulé par le scénario A2 en 2050 du GIEC (2003). Les différentes couleurs représentent le nombre de jours de stress hydrique (tiré de V. Badeau).

FAST « Analyse et Spatialisation de scénario intégré de changement global sur la Forêt française » est un projet de recherche fondamentale coordonné par l'INRA. Il associe des laboratoires INRA EEF (Ecologie et Ecophysiologie Forestières) et laM (Interaction Arbres Microorganismes) de Nancy, BIOGECO (Biodiversité, Gènes et Communautés) et Ecologie Fonctionnelle et Physique de l'Environnement (EPHYSE), InfoSol et Unité de Recherches de Zoologie Forestière (URZF) d'Orléans ainsi que le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement/ CEA-CNRS). Le projet a commencé fin 2009 pour une durée de 24 mois. Il a bénéficié d'un financement du GICC de 395 k€ pour un coût global de 1,7 M€.

des changements climatiques sur la productivité forestière. Les cartes d'impact illustrent des contrastes selon les régions et les scénarii sylvicoles ; elles seront autant d'éléments nouveaux pour adapter les pratiques sylvicoles au changement climatique. Bien qu'entachées d'incertitudes, la prise en compte des stress biotiques dans les modèles de fonctionnement a progressé, ouvrant la voie à l'introduction de fonctions génériques selon une typologie des pathogènes et ravageurs (incluant la localisation, le type d'interactions, le mode d'acquisition des ressources...).

Production scientifique et brevets

Jacquet J.S., *et al.*, 2012. Defoliation by processionary moth significantly reduces tree growth: a quantitative review. *Ann. For. Sci.*, 1-10.
Moreaux V., *et al.*, 2011. Paired comparison of water, energy and carbon exchanges over two young maritime pine stands (*Pinus pinaster* Ait.): effects of thinning and weeding in the early stage of tree growth. *Tree Physiol.* 31, 903-921.
Moreaux V., *et al.*, 2012. Water use of young maritime Pine and Eucalyptus stands in response to climatic drying in south-western France. *Plant Ecol. and Diversity*. doi:10.1080/17550874.2012.668228.
Moreaux V., 2012. Observation et modélisation des échanges d'énergie et de masse de jeunes peuplements forestiers du Sud-Ouest de la France. Thèse de doctorat de l'Université de Bordeaux 1. 2012. 283p.

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2006

DROUGHT+

Les écosystèmes forestiers méditerranéens face aux changements climatiques

Comment anticiper la réponse des arbres et des écosystèmes à l'acuité des sécheresses?

Les modèles climatiques régionaux projettent une diminution des précipitations en région méditerranéenne conduisant à une accentuation des sécheresses. Quelles conséquences peut-on en attendre sur le fonctionnement des arbres, sur leur survie et sur les services éco-systémiques comme l'immobilisation du carbone ou la production d'eau? Le projet DROUGHT+ a retenu deux espèces dominantes d'arbre ayant des réponses contrastées à la contrainte hydrique : une espèce à feuillage persistant, le chêne vert et un résineux, le pin d'Alep. Nous avons utilisé concurremment des observations à long-terme, des gradients climatiques, des manipulations des précipitations et de la modélisation. La réponse des arbres fait intervenir deux stratégies non exclusives : l'adaptation éco-typique aux conditions climatiques locales par sélection naturelle et la plasticité phénotypique, c'est-à-dire la capacité pour un génotype donné à exprimer différents phénotypes selon les conditions environnementales. Les deux stratégies peuvent intervenir le long de gradients. Les manipulations ne concernent que les échelles de temps court et les ajustements de la plasticité phénotypique.

Des dispositifs expérimentaux innovants

Nous utilisons deux sites de mesure à long-terme lourdement instrumentés dans lesquels sont mises en place des expérimentations d'exclusion de pluie totale ou partielle. Il s'agit des sites de Puéchabon pour le chêne vert et de Fontblanche pour le pin d'Alep. Ces sites sont au centre d'un gradient de précipitations dans lesquels des sites satellites allant du sec à l'humide ont été sélectionnés. Ces sites satellites interrogent sur la réponse de certains traits fonctionnels foliaires ou d'architecture hydraulique. Dans les sites centraux, les flux d'énergie, d'eau et de carbone sont mesurés en continu par la méthode des corrélations turbulentes ainsi que de nombreuses autres variables d'état du climat, du sol et de la végétation. Des mesures discrètes d'écophysiologie (assimilation, respiration, croissances primaire et secondaire, état hydrique des arbres, respiration du sol...) complètent les mesures continues. Dans les exclusions partielles de pluie, des gouttières mises en place sous le couvert des arbres exportent en-dehors des parcelles 30 % de la pluie. Ainsi à Puéchabon, un épisode sec bien plus sévère que celui de 1812-1817 a été simulé.

Résultats majeurs

Dans les expériences d'exclusions de précipitation, on montre que les arbres acclimatent des traits fonctionnels associés à l'assimilation du carbone ou au transport de l'eau. Les changements dans l'architecture et la baisse des surfaces transpirantes permettent aux arbres d'affronter des sécheresses sévères et limitent leur vulnérabilité. Au niveau des écosystèmes, les réponses sont plus complexes du fait de l'intrication de mécanismes agissant avec des constantes de temps contrastées. Les changements peu significatifs de la respiration du sol peuvent s'expliquer par les faibles changements du pool de carbone et des activités microbiennes et fongiques.



Dispositif d'exclusion totale des précipitations de Puéchabon. Un toit mobile transparent recouvre totalement une parcelle forestière lors des événements pluvieux. La mise en place du toit est déclenchée au premier basculement de l'auger d'un pluviomètre. Ce toit (14 m de large et 20 m de long) se déplace en 8 min. A la fin de l'événement pluvieux, il retourne en position parking. Deux exclusions totales se sont succédées sur deux parcelles contiguës au parking.

La première a concerné les pluies de février à juillet, la seconde de juillet à décembre. Ce dispositif est unique sur les écosystèmes forestiers.

DROUGHT+ « Mediterranean ecosystems face increasing droughts : vulnerability assessments » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le CEFE (Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive, Montpellier). Il associe l'URFM (Unité de Recherche Forestière Méditerranéenne de l'INRA, Avignon), l'IMEP (Institut Méditerranéen d'Écologie et de Paléoécologie, Marseille) et l'IRSTEA (Institut de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture, Aix-en-Provence). Le projet a débuté en janvier 2007 pour une durée de 54 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 720 k€ pour un coût global de 3,2 M€.

Production scientifique et brevets

Citons notamment :

Girard F., Vennetier M., Ouarnin S., Caraglio Y., Misson¹ L., 2010. Polycyclism, a fundamental process of plant growth which may suffer from climate change: the example of *Pinus halepensis* Mill. in Southern France. *Trees - Structure and Function*, doi: 10.1007/s00468-010-0507-9.

Limousin J.M., Rambal S., Ourcival J.M., Rocheteau A., Joffre R., Rodriguez-Cortina R., 2009. Long-term transpiration change with rainfall decline in a Mediterranean *Quercus ilex* forest. *Global Change Biol.*, 15: 2163-2175.

Limousin J.M., Rambal S., Ourcival J.M., Rodriguez-Calcerrada J., Perez-Ramos I., Rodriguez-Cortina R., Misson L., Joffre R., 2012. Shoot plasticity in the Mediterranean evergreen *Quercus ilex*. *Oecologia* (in press).

Misson L., Rocheteau A., Rambal S., Ourcival J.M., Limousin J.M., Rodriguez R., 2010. Functional changes in the control of carbon fluxes after 3 years of increased drought in a Mediterranean evergreen forest. *Global Change Biol.*, 16: 2461-2475.

¹Laurent Misson, co-coordonateur de DROUGHT+ nous a malheureusement quittés en 2010. Tout le collectif du projet et l'ANR lui rendent hommage.

Programme « Changements Environnementaux Planétaires », édition 2009

CLIMED

Le climat méditerranéen va changer :
quelles conséquences pour la flore et la faune ?**Les effets d'une sécheresse accentuée sur la biodiversité et le fonctionnement d'une garrigue méditerranéenne**

Le changement climatique est susceptible d'affecter la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes, impactant par conséquent les services qu'ils rendent aux sociétés humaines. Le projet CLIMED vise à évaluer les effets d'une sécheresse accentuée sur une garrigue, écosystème typique et emblématique de la région méditerranéenne. Cet objectif implique un suivi de la dynamique de l'écosystème soumis à une contrainte hydrique, en mesurant la diversité des organismes, leur productivité, leurs activités et leurs interactions. Les flux de carbone et de nutriments au cours de la croissance des plantes et de la décomposition de la matière organique morte sont au centre du projet. Ces processus clés pour le fonctionnement de l'écosystème impliquent de nombreuses interactions entre les plantes, les microorganismes et la faune du sol, et un point fort du projet est de quantifier à la fois les réponses à la sécheresse de ces organismes et leurs liens à travers des traits fonctionnels. L'originalité de CLIMED est de croiser le scénario d'un climat plus aride avec le scénario d'une perte de biodiversité. Ce travail va permettre de prédire les conséquences d'une sécheresse accrue sur l'abondance et l'activité des organismes ainsi que sur les processus qu'ils contrôlent dans le cycle du carbone et des nutriments.

Simuler expérimentalement l'aridification du climat en milieu naturel (la garrigue) et en conditions contrôlées (Ecotron)

Une parcelle de 2 ha de garrigue est équipée d'une centaine de dispositifs d'exclusion de pluie pour réduire les précipitations d'environ 40% (voir la photo ci-contre). Ces dispositifs, qui couvrent 15 modalités de diversité végétale, permettent de suivre les réponses à la sécheresse de la végétation et des communautés de décomposeurs associées. La croissance et la phénologie des végétaux sont suivies par échantillonnage photographique avec un système robotisé spécialement conçu pour le projet. Le recyclage de la matière organique et les flux d'éléments sont suivis par des mesures de production de litière et de décomposition. En parallèle, la diversité génétique et fonctionnelle des communautés microbiennes ainsi que la diversité taxonomique et fonctionnelle de la faune du sol sont suivies tout au long de l'expérience. Les travaux sur le terrain sont complétés par des expérimentations en conditions contrôlées à l'Ecotron Européen de Montpellier, pour comprendre comment la diversité des microorganismes et de la faune du sol influence le recyclage des éléments pendant la décomposition. Ces approches complémentaires vont permettre de prédire les conséquences d'un climat plus aride sur la diversité, l'abondance et l'activité des organismes, mais aussi sur les processus qu'ils contrôlent dans le cycle du carbone et des nutriments.



Dispositif d'exclusion de pluie dans un écosystème de garrigue sur le massif de l'Etoile à Marseille.

CLIMED « Impacts des changements climatiques sur la biodiversité et conséquences pour le fonctionnement d'un écosystème méditerranéen » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le CEFE (Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive, Montpellier). Il associe les laboratoires IMBE (Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Ecologie marine et continentale, Marseille), ENSAIA (Laboratoire Sols et Environnement, Nancy) et l'Ecotron européen de Montpellier. Le projet a débuté en janvier 2010 pour une durée de 48 mois. Il bénéficie d'un financement de l'ANR de 849 k€ pour un coût global de 2,45 M€.

Résultats majeurs

L'effort multidisciplinaire pour comprendre comment une réduction des précipitations et un changement de la biodiversité vont influencer de manière interactive le recyclage d'éléments clés comme le carbone et l'azote est unique pour un écosystème terrestre méditerranéen. Les résultats du projet vont apporter des connaissances nouvelles sur les conséquences du changement climatique et de la perte de biodiversité pour le fonctionnement des écosystèmes. Ceci va permettre de mieux prédire et donc anticiper ces effets, afin de prendre des mesures de gestion appropriées, ce qui est particulièrement important dans la région méditerranéenne soumise à une forte pression de l'urbanisation et du tourisme.

Production scientifique et brevets

Hättenschwiler S., Montès N., Cortet J., Roy J., and the CLIMED consortium, 2011. Climate change effects on Mediterranean biodiversity and ecosystem functioning. Poster and short presentation at the Japanese- French Frontiers of Science Symposium, Tokyo. International Innovation Report, 2011. Biodiversity and ecosystem functioning in the Mediterranean. Issue 1, Research Media Ltd, Bristol UK: 52-54.

Montès N., Cortet J., Roy J., Hättenschwiler S., et le consortium CLIMED, 2011. Présentation du projet CLIMED auprès des groupes d'intérêt du site expérimental du Massif de l'Etoile, Marseille.

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2007

PEATWARM

Effets du réchauffement climatique sur le fonctionnement des tourbières

Evaluer et mieux comprendre l'impact d'un réchauffement climatique simulé *in situ* sur la fonction « puits de carbone » des tourbières en domaine tempéré

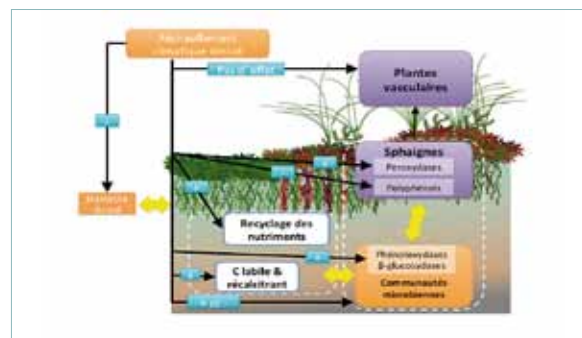
Bien que ne couvrant que 3% des surfaces continentales, les tourbières de l'hémisphère Nord renferment 30% du carbone des sols mondiaux. Ce stockage est étroitement lié aux conditions environnementales (température, anoxie, oligotrophie). Ainsi, les types de rétroactions entre l'atmosphère et ces systèmes doivent être identifiés pour mieux contraindre les modèles de prévision climatique. Dans ce contexte, le projet PEATWARM utilise des tourbières à sphaignes comme milieu modèle et analyse la vulnérabilité dans un contexte de changement climatique grâce à un dispositif expérimental simulant *in situ* une augmentation de la température moyenne de l'air. Son objectif est d'évaluer les effets du réchauffement sur : i) la végétation, ii) le bilan de C, iii) la diversité et l'activité microbiennes, iv) les interactions macro-microorganismes et v) la dynamique des matières organiques labiles et récalcitrantes. In fine, PEATWARM vise à élaborer un modèle de fonctionnement biogéochimique du carbone et de sa dynamique de stockage et à identifier des proxys de température et d'humidité utilisables dans les archives sédimentaires pour reconstituer le paléoclimat de l'Holocène récent.

Simuler le réchauffement, analyser ses impacts sur les compartiments clés du système et identifier des proxys de température

Le dispositif expérimental de réchauffement *in situ* (tourbière de Frasne, Doubs) est constitué de 12 placettes dont 6 pourvues de mini chambres hexagonales à toit ouvert (Open-Top Chambers, OTCs, selon le protocole standardisé ITEx) et appliqué pour la première fois en zone tempérée. Deux types de biotopes à régime hydrique contrasté ont été étudiés : haut- marais et marais de transition, plus humide. Les placettes ont été équipées de capteurs thermiques (air et sol), piézométriques et des dispositifs de suivi de la végétation et des gaz. Quatre chambres automatiques de mesure de CO₂ ont été mises au point et déployées sur le site en 2010 et 2011. Parallèlement, des microcosmes de tourbe et de végétation ont été incubés pendant 12 mois en chambres climatiques pour y étudier l'effet d'un réchauffement de +3°C sur les interactions biotiques C-N-S. Les effets du réchauffement *in situ* et ex-situ sur les compartiments clés (végétation, gaz, sphaignes, tourbe, micro-organismes) ont été analysés selon une approche interdisciplinaire associant l'écologie végétale et microbienne, l'écophysiologie, la géochimie moléculaire et isotopique, la paléo- écologie et la modélisation.

Résultats majeurs

Les résultats montrent que la hausse de température moyenne induite par les OTCs (+1°C) provoque des modifications significatives dans les interactions «sphaignes- communautés microbiennes- carbone labile». La moyenne des mesures d'ENE (Echange Net d'Ecosystème) réalisées en 2010 et 2011 (0.24 gC m⁻² j⁻¹) indique que la tourbière perd du carbone au profit de l'atmosphère. Au total, les



Réponse des compartiments biotiques et abiotiques de la tourbière après deux années de réchauffement climatique simulé par OTC sur la tourbière de Frasne. Les signes + et - indiquent les effets positifs et/ou négatifs du réchauffement sur ces compartiments, et les flèches jaunes, leurs interactions réciproques. (Synthèse réalisée à partir de Delarue *et al.*, 2011 ; Huguet *et al.*, 2011 ; Jassey *et al.*, 2011).

PEATWARM « Impact d'un réchauffement climatique simulé *in situ* sur la fonction de puits de carbone des tourbières à sphaignes » est un projet de recherche fondamentale coordonné par l'ISTO (Institut des Sciences de la Terre d'Orléans). Il associe les laboratoires Chrono-Environnement, Besançon), EEf (Ecologie et Ecophysiologie Forestières, Nancy), ECOBIO (Ecosystèmes Biodiversité Evolution, Rennes), LPC2E (Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement, Orléans), SRNS (Laboratoire de Synthèse et Réactivité des Substances Naturelles, Poitiers), BioEMCo (Biogéochimie et Ecologie des Milieux continentaux, Paris), l'EPFL/WSL, Lausanne et l'Université de Neuchâtel. Le projet a débuté en janvier 2008 pour une durée de 48 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 665 k€ pour un coût global de 2,48 M€.

différentes réponses au réchauffement climatique des deux situations étudiées (bas- et haut- marais) montrent que la variabilité spatiale de l'humidité est primordiale pour la compréhension de l'impact d'un réchauffement global sur le devenir du cycle du carbone des tourbières. Le site de Frasne fait désormais partie du Service d'Observation TOURBIERES, récemment labellisé par l'INSU et le schéma expérimental de PEATWARM a été reproduit en Pologne (Projet CLIMPEAT) et le sera prochainement en Sibérie (Projet CLIMireSiber).

Production scientifique et brevets

Outre la soutenance de 3 thèses et 15 articles parus ou sous presse, citons notamment :

- Huguet *et al.*, 2010. Org. Geochem., 41 (6): 559-572.
- Delarue *et al.*, 2011. Org. Geochem., 42: 1016-1024.
- Jassey *et al.*, 2011. Global Change Biol., 17(9): 2945-2957.
- Gogo *et al.*, 2011. J. Soil and Sediments 11 (4): 545-551.
- Guimbaud *et al.*, 2011. Measurement Sci. and Technol., 22 (7): 1-17.
- Estournel-Pelardy *et al.*, 2011. J. Appl. and Analyt. Pyr., 92 (2): 401-406.
- Jassey *et al.*, 2012. Soil Biol. and Biochem., 46: 49-52.

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2008

VULNOZ

La vulnérabilité des agro-systèmes à l'ozone : quels risques à l'horizon 2020-2030 ?

Approfondir la connaissance des mécanismes de pollution à l'ozone et l'intégrer dans des modèles d'impact sur cultures et forêts

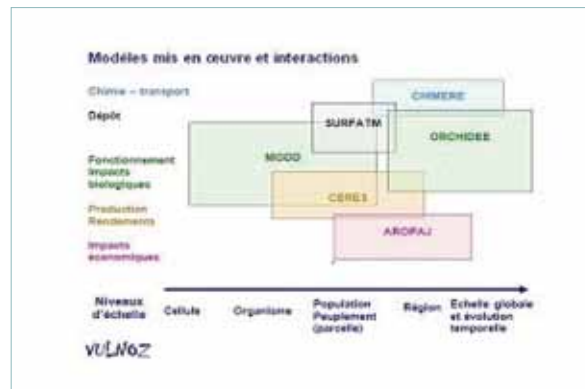
L'ozone est un des principaux polluants atmosphériques des pays industrialisés et son fort pouvoir oxydant le rend très toxique pour les végétaux. La projection des scénarii actuels montre qu'au cours du 21^{ème} siècle les concentrations d'ozone augmenteront au-delà des seuils acceptables pour un développement optimal des agro-écosystèmes, avec une forte variabilité régionale et temporelle. Prévoir les conséquences d'un doublement des concentrations à l'échéance 2020-2030 implique d'améliorer les connaissances à plusieurs niveaux, de la plante à l'écosystème en : i) déterminant la quantité d'ozone pénétrant réellement dans la plante, ii) estimant la capacité de détoxification des plantes, ces deux points conduisant à proposer une « dose effective toxique d'ozone », iii) intégrant ces paramètres et en déclinant, à travers l'amélioration des modèles de biosphère continentale ou de chimie-transport, selon les différents agro-écosystèmes, les impacts aux échelles régionale et nationale et iv) en estimant l'évolution des risques en 2020-2030 et les conséquences socio-économiques. A partir d'analyses sur plusieurs plantes modèles, VULNOZ entend améliorer les indicateurs de risque actuellement proposés par l'Union Européenne.

Intégrer les résultats d'expérimentations d'impact de l'ozone dans des modèles de biosphère continentale pour estimer les changements économiques

Deux verrous importants existent, le premier au niveau de la définition d'un marqueur exhaustif de la toxicité de l'ozone intégrant ouverture stomatique foliaire et capacité de détoxification (dose effective toxique d'ozone), le second au niveau de la distribution de l'ozone entre dépôts non stomatique et stomatique. Des expérimentations en conditions contrôlées sur quatre plantes modèles (*arabidopsis*, blé, maïs, peuplier) amélioreront les connaissances sur les processus cellulaires et des fumigations en champ valideront les résultats en condition naturelle. En s'appuyant sur ces résultats, des paramétrisations et facteurs de sensibilité seront intégrés dans le modèle de biosphère continentale ORCHIDEE afin de prendre en compte l'impact de l'ozone sur la végétation, lié au flux effectif toxique d'ozone, et de quantifier et paramétrer les dépôts stomatique et non stomatique. Les modèles ORCHIDEE et CHIMERE seront validés à l'échelle régionale pour des périodes actuelles et utilisés pour des simulations futures (2020-2030). L'aboutissement est un questionnement environnemental et économique, via le modèle AROPAJ, fondé sur une évaluation des impacts (production agricole, occupation des terres agricoles) et des effets externes (émission de gaz à effet de serre).

Résultats majeurs

La transposition d'une technique de mesure d'antioxydants d'IBP Orsay à EEF Nancy, a permis d'obtenir des relations entre teneur en antioxydants (ascorbate, glutathion) et degré de toxicité à l'ozone chez le blé, le maïs et le peuplier en conditions contrôlées et au champ (collaboration EGC Grignon). Ces données sont actuellement collation-



Modèles mis en œuvre dans le projet.

VULNOZ « Vulnérabilité des agrosystèmes à l'ozone : Quels risques à l'horizon 2020-2030 ? » est un projet de recherche fondamentale coordonné par INRA, Nancy. Il associe les partenaires suivants : EGC (Environnement et Grandes Cultures, Grignon), EPM (Ecophysiologie Moléculaire, Paris- Est), IBP (Institut Biotechnologie des Plantes, Orsay), le LISA (Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques, Paris- Est), le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement), le CESBIO (Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère, Toulouse), EPHYSE (Ecologie Fonctionnelle et Physique de l'Environnement, Bordeaux), EcoPub (Economie Publique, Grignon). Le projet a débuté en janvier 2009 pour une durée de 48 mois. Il bénéficie d'un financement de l'ANR de 787 k€ pour un coût global de 3, 7 M€.

nées pour paramétrer la détoxification. Les travaux menés par EPHYSE Bordeaux concernant la distribution de l'ozone entre dépôt stomatique et non stomatique ont permis d'améliorer les cartes de dépôt fournies par le LISA à l'aide du modèle CHIMERE. Les besoins et les attentes des modélisateurs vis-à-vis d'indicateurs/marqueurs pouvant être inclus dans les modélisations sont confrontés à la complexité et à la multiplicité des changements métaboliques issus de l'attaque de l'ozone et de ses dérivés oxydants. Le premier succès sera d'implémenter le modèle de diffusion d'ozone MODD d'EGC. Ensuite, il s'agira d'intégrer ce modèle dans d'autres plus globaux pour aboutir à une estimation des conséquences économiques via le modèle AROPAJ.

Production scientifique et brevets

- Anava A., *et al.*, Menut L., 2011. *Global Change Biology* 17 : 2342-2359.
- Dizengremel P., *et al.*, 2009. *Plant Biology* 11 : 35-42.
- Meszaros R., *et al.*, 2009. *Biogeosciences* 6 : 1987-1999.
- Doctor G., *et al.*, 2012. *Plant, Cell and Environ.* 35: 454-484.
- Stella P., *et al.*, 2010. *Agric. and Forest Meteorol.*, 151 : 669-681.
- Tuzet A., *et al.*, 2011. *Agric. and Forest Meteorol.*, 151 : 480-492.
- Loubet B., *et al.*, 2011. *Plant and Soil* 343 : 109-137.
- Stella P., *et al.*, 2011. *Biogeosciences* 8 (10) : 2869-2886.

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2006

CLIMATOR

L'impact du changement climatique sur des systèmes de culture et naturels représentatifs de la France

Quantifier l'évolution et la variabilité du fonctionnement d'agro-écosystèmes en fonction de projections climatiques régionalisées

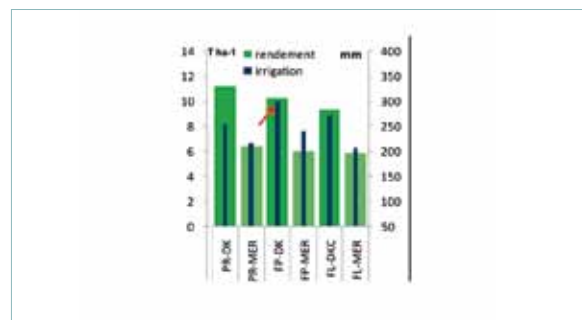
Le fonctionnement des agro-écosystèmes dépend d'un ensemble de facteurs du milieu soit directement liés au climat (rayonnement, température, teneur en CO₂...) soit fortement dépendant de celui-ci (teneur en eau des sols via la pluviométrie). Le projet CLIMATOR avait pour objectif de prévoir les modifications de ce fonctionnement dues au changement climatique, sous l'angle agronomique et environnemental. Les agro-écosystèmes retenus correspondaient soit à des systèmes de cultures représentatifs de la France métropolitaine [cultures d'hiver (blé, colza,...)] ou de printemps [(maïs, tournesol,... en monoculture ou en rotation) et des couverts de plantes pérennes [cultivées (vigne, prairies temporaires, forêt landaise) ou naturelles (feuillus et conifères)]. Dans chaque cas, il s'agissait, pour une période future et pour trois scénarii SRES (A1B, le principal, et secondairement A2 et B2), de quantifier pour chaque variable d'intérêt sa valeur, sa différence au passé récent et d'analyser les sources de sa variabilité propre. Cette analyse quantitative a porté sur 12 sites métropolitains et un site antillais. Les trois périodes d'intérêt correspondaient au passé récent (1970-1999), au futur proche (2020-2049) et lointain (2050-2079).

Enchaîner des modèles d'impacts aux projections de modèles climatologiques régionalisées et quantifier les incertitudes

A partir des scénarii SRES (incertitude imposée), plusieurs modèles climatologiques du GIEC (principalement ARPEGE de Météo-France) produisent des projections climatiques pour chaque période. Elles sont régionalisées au moyen de trois méthodes de descente d'échelle (type de temps, quantile-quantile et anomalies) et fournissent les variables de forçage des modèles d'impact agri-environnemental. Pour chaque agro-écosystème, plusieurs modèles sont mis en œuvre afin de cerner les incertitudes épistémiques. Les variables d'intérêt (phénologie, confort hydrique, production,...) sont analysées dans un cadre qui combine les éléments statistiques des trois étapes. A côté des incertitudes, la variabilité est appréhendée sous les angles de la variabilité interannuelle résultant de celles des projections climatiques et des propriétés du milieu, des variétés utilisées ou des itinéraires techniques.

Résultats majeurs

Les résultats montrent que l'avancée des stades phénologiques et la réduction de leur durée sont particulièrement fortes pour les cultures de printemps (maïs, tournesol) et les plantes pérennes (vigne) dont une partie du cycle est postérieure au maximum thermique. Ceci impacte leur rendement potentiel. La réduction projetée de la pluviométrie conduit à une légère dégradation du confort hydrique et à une forte baisse de la recharge des aquifères. La production présente des résultats contrastés selon les systèmes : augmentation pour les cultures d'hiver (blé, colza) et la prairie (maïs différemment répartie), diminution pour les cultures de printemps (maïs, tournesol)



Evolution comparée du rendement du maïs et du besoin d'irrigation à Toulouse pour deux variétés (Mérilbel MER, précoce et DKC, tardif).

CLIMATOR « Evaluation des Outils de Références pour l'analyse de la vulnérabilité des agro-écosystèmes face au changement climatique » est un projet de recherche fondamentale à vocation finalisée coordonné par l'Unité AgroClim de l'INRA, Avignon. Il a associé 25 chercheurs et enseignants-chercheurs de huit institutions publiques et privées (INRA, CNRS, Météo-France, CERFACS, AgroParistech, SupAgro, Arvalis, Chambre Régionale de l'Agriculture de Charentes-Poitou). Le projet a débuté en février 2007 pour une durée de 48 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 621 k€ pour un coût total 2, 63 M€.

et les conifères, la vigne étant surtout affectée par un changement de qualité des baies. Les régions sont différemment affectées : opportunités pour le nord-est de la France en raison de l'augmentation de température, risques pour le sud-ouest en raison de la baisse de pluviométrie (voir figure ci-dessus). Le choix d'une variété encore plus tardive que DK augmenterait simultanément la production et le besoin d'irrigation. Les résultats de CLIMATOR ont été utilisés dans diverses opérations de prospective ou de programmation (Ministères de l'Agriculture et de l'Ecologie, Région Nord-Pas de Calais, Région Aquitaine, Poitou-Charentes...). On notera l'investissement de plusieurs chercheurs de CLIMATOR dans un projet « suite » international piloté par des équipes de la NASA et de l'Université de Floride (<http://www.agmp.org/>).

Production scientifique et brevets

Les résultats de CLIMATOR ont fait l'objet d'un « Livre Vert » (Brisson¹ et Levraut, 2010) : Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. 335 pp, édité à 2000 exemplaires par l'ADEME et accessible en ligne : <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?sort=1&cid=96&m=3&id=70992&ref=&nocache=yes&p1=111> La version anglaise est disponible via : <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=76705&p1=30&ref=12441>.

Ils ont également conduit à 6 publications dans des revues à comité de lecture et à une vingtaine de communications internationales.

¹Nadine Brisson, coordinatrice de CLIMATOR nous a malheureusement quitté en 2011. Tout le collectif du projet et l'ANR lui rendent hommage.

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2007

VALIDATE

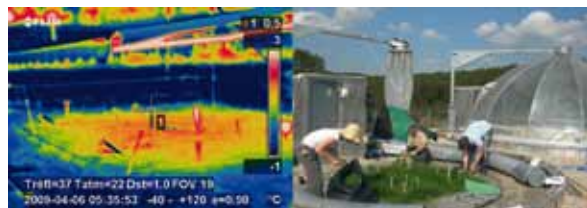
Comment adapter les prairies et les élevages français au changement climatique ?

Vulnérabilité des prairies et des élevages de ruminants au changement climatique et aux événements extrêmes

L'évolution des aléas climatiques a récemment été évaluée par le GIEC. En Europe, le nombre de journées exceptionnellement chaudes a significativement augmenté depuis 1950. Dans le sud de l'Europe, les sécheresses se sont renforcées à la fois en fréquence et en intensité. Cette tendance devrait s'accroître d'ici à la fin du siècle avec des vagues de chaleur 10 fois plus fréquentes qu'à l'époque actuelle. En revanche, la fréquence de retour d'épisodes de précipitations intenses ne devrait pas varier significativement. Toutes les projections indiquent qu'indépendamment des efforts de réduction souhaitables des émissions de GES, ces aléas climatiques se reproduiront plus souvent que par le passé. Dans ce contexte, l'objectif de VALIDATE est de comprendre les impacts de la variabilité future du climat sur les prairies et les élevages herbagers et de tester des pistes d'adaptation. Des scénarii climatiques régionalisés de la variabilité des précipitations et des températures et son évolution au cours du siècle ont été considérés. La vulnérabilité des élevages herbagers a été étudiée en combinant l'expérimentation, les modélisations biotechnique et socio-économique. Les conséquences pour l'environnement (émissions nettes de GES, recharge des nappes, qualité de l'eau) et pour la biodiversité (diversité floristique, diversité microbienne des sols) des prairies ont été évaluées. Enfin, des pistes d'adaptation ont été testées aux échelles de la conduite agronomique de la prairie, de la conduite des troupeaux et l'adaptation des systèmes d'élevage.

Manipuler et modéliser les prairies face au changement climatique

Le projet a développé trois expériences complémentaires : i) exposition, par transplantation de monolithes, d'une prairie semi-naturelle de montagne au climat moyen projeté pour 2070 avec ou sans augmentation du CO_2 atmosphérique, ii) exposition de prairies semées ou semi-naturelles situées le long d'un gradient climatique (quatre sites : Alpes, Ouest, Massif-Central et Méditerranée) à un réchauffement à l'air libre et à des sécheresses et canicules obtenues par une combinaison d'exclusion de la pluie et de réchauffement infra-rouge et iii) exposition dans l'ECOTRON- Montpellier d'une prairie semi-naturelle à la combinaison de sécheresses et canicules et d'augmentation du CO_2 atmosphérique représentative des projections pour 2070. Ces expériences ont été utilisées par deux modèles pour réaliser des projections agronomiques : PASIM, un modèle mécaniste de l'écosystème prairial et STICS, un modèle plus simple utilisé en mode opérationnel pour prévoir l'impact des sécheresses sur les prairies françaises. Ces modèles agronomiques ont été forcés par un ensemble de modèles climatiques et de méthodes de régionalisation du climat. Cette démarche ensembliste a été appliquée à des stations climatiques puis à l'ensemble du territoire sur une grille de 8x8 kms. Une analyse probabiliste a été développée en prenant en compte, ou non, des adaptations simples de la gestion des prairies par les éleveurs.



a) Photographie infra-rouge d'une placette de prairie réchauffée (INRA, Theix)
b) Mise en place d'un macrocosme (ECOTRON, CNRS, Montpellier).

VALIDATE « Vulnérabilité des prairies et des élevages au changement climatique et aux événements extrêmes » est un projet de recherche fondamentale à vocation finalisée coordonné par l'INRA, Clermont Ferrand. Il associe sept laboratoires INRA, le CEFE (Centre d'Ecologie Fonctionnelle Evolutive), le LECA (Laboratoire d'Ecologie Alpine), le LEM (Laboratoire d'Ecologie Microbienne) et le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement). Le projet a débuté en janvier 2008 pour une durée de 48 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 791 k€ pour un coût global de 3,14 M€.

Résultats majeurs

La production de la prairie est plus affectée par l'augmentation de la variabilité climatique que par un réchauffement moyen de quelques degrés. Les légumineuses fixatrices d'azote et les graminées de bonne qualité fourragère sont les plus sensibles, les plantes à réserves (pivots, rhizomes) et celles déjà adaptées (variétés méditerranéennes) étant les plus résilientes. Une baisse de la fréquence d'exploitation de la prairie a renforcé sa résilience. Les résultats expérimentaux soulignent également des conséquences négatives pour l'environnement : le réchauffement entraîne une dégradation du bilan de GES de la prairie et la quantité d'eau drainée vers la nappe est fortement réduite. Toutefois, l'augmentation du CO_2 atmosphérique limite ces effets négatifs. La modélisation illustre les risques et les opportunités pour les élevages herbagers français : risque élevé de chute de la production à l'herbe de lait et de viande durant la période estivale ; en revanche, nette augmentation du potentiel de production aux autres saisons. La démarche participative a abouti à des propositions de transformations des systèmes d'élevage. Les résultats du projet ont alimenté la préparation du volet Agriculture du Plan National d'Adaptation au Changement Climatique.

Production scientifique et brevets

Les résultats du projet ont été valorisés par 19 publications dans des revues internationales à comité de lecture, une trentaine de communications, dont plusieurs invitées, 5 conférences de vulgarisation, la soutenance de 3 thèses. Ils ont également permis l'établissement de nouveaux projets collaboratifs, notamment dans le cadre du FP7.

Programme « Gestion et Impacts du Changement Climatique », édition 2009 SECALP

Adaptation des territoires alpins aux sécheresses

Adaptation des territoires alpins à la recrudescence des sécheresses dans un contexte de changement global

Les scénarii d'évolution du climat prévoient non seulement une poursuite du réchauffement observée sur les Alpes, mais aussi une augmentation des extrêmes climatiques tels que les phénomènes de sécheresse, en particulier dans les zones sous influence méditerranéenne. L'influence de ces modifications sur les pratiques de gestion, les systèmes d'exploitation et leur durabilité écologique, économique et sociale est inconnue. L'objectif de SECALP était d'analyser les mécanismes d'adaptation des territoires semi-naturels de montagne face aux changements climatiques, particulièrement la récurrence des sécheresses. Les objectifs spécifiques étaient : i) d'améliorer la compréhension des mécanismes de résilience et de transformation des écosystèmes, et des processus d'adaptation des acteurs agricoles et forestiers, ii) de proposer des orientations pour accompagner ces acteurs au travers des politiques publiques agri-environnementales et de développement territorial, et iii) de proposer des stratégies d'observation à long terme pouvant favoriser l'adaptation des acteurs.

Une approche interdisciplinaire combinant observation écologique à long terme, expérimentations agronomiques et approche sociologique

Le travail concerne les 2 sites de la Zone Atelier Alpes, le Vercors et l'Oisans, représentatifs des systèmes société-environnement des Alpes intermédiaires. L'analyse des données à long terme sur le Vercors a permis de décrire les effets du climat sur la végétation des alpages et sur la démographie forestière. De plus, des manipulations expérimentales combinant sécheresse et réchauffement ont ciblé les mécanismes démographiques et fonctionnels contrôlant les réponses des espèces de pelouses subalpines et des principales essences forestières. Des enquêtes en exploitation et auprès de bergers ont visé à comprendre le fonctionnement du système fourrager. La participation d'experts locaux, combinée aux résultats sur les conséquences écologiques des modalités climatiques et aux études prospectives pour les modalités socio-économiques, ont permis de construire 4 scénarii couplant 2 modalités climatiques et 2 modalités socio-économiques. Face à ces scénarii, les acteurs agricoles et forestiers ont proposé des stratégies d'adaptation et des propositions pour les politiques agri-environnementales et territoriales. Enfin, le projet SECALP a analysé les protocoles existants pour soutenir la construction d'un réseau d'observations à long terme des sécheresses et de leurs effets sur les socio-écosystèmes de montagne.

Résultats majeurs

Les écosystèmes de montagne ont une forte résilience aux événements de sécheresse, récente ou expérimentale. Des premières réponses sont cependant perceptibles pour le recrutement forestier. Les effets à long terme, en particulier de successions d'années de sécheresse exceptionnelle, restent inconnus. Il existe une cohérence importante entre réponses écologiques observables selon les



Dispositifs de manipulation de la pluviométrie sur l'Alpage de la Grande Cabane, Réserve Naturelle des Hauts Plateaux du Vercors (à gauche) et au Col du Lautaret (à droite).

SECALP « Adaptation des territoires alpins à la recrudescence des sécheresses dans un contexte de changement global » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LECA (Laboratoire d'Ecologie Alpine, Grenoble). Il a associé les UR EM (Ecosystèmes Montagnards) et DTM (Développement des Territoires de Montagne) de l'IRSTEA (Institut de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture) ainsi que le Parc National des Ecrins. Le projet a commencé en novembre 2009 pour une durée de 27 mois. Il a bénéficié d'un financement du GICC de 213 k€ pour un coût global de 709 k€.

échelles de temps, réponses d'adaptation récentes des acteurs, et anticipations sur la base de scénarii combinant sécheresse et contexte sociétal. La mise en place d'un système d'observation adapté aux contraintes des milieux de montagne répondrait aux besoins des scientifiques et des acteurs des politiques territoriales.

Production scientifique et brevets

Benot M.L., Saccone P., Vicente R., Pautrat E., Morvan-Bertrand A., Decau, M.L., Grigulis K., Prud'homme M.P., Lavorel S., 2012. How climate change may limit the control by mowing of dominance by *Festuca paniculata* in subalpine grasslands. *Plant Ecology and Diversity* (submitted).

Defossez E., Lasbouygues O., Courbaud B., G. Kunstler G., 2012. Do indirect plant interactions follow the stress gradient hypothesis? An experimental test on the regeneration success of six tree species in the French Alps. *Plant Ecology and Diversity* (in revision).

Jung V., Albert C.H., Violle C., Kunstler G., Loucougaray G., Spiegelberger T., 2012. Understanding the functional response of grasslands communities to extreme drought events. *Global Change Biology* (submitted).

Lamarque P., Quéfier F., Artaux A., Eveilleau C., Nettié B., Dobremez L., Barnaud C., Lavorel S., 2012. A participative scenario approach to mountain grasslands land management change. *Landscape and Urban Planning* (submitted).

Nettié B., Dobremez L., Coussy J.L., Romagny T., 2010. Attitudes des éleveurs et sensibilité des systèmes d'élevage face aux sécheresses dans les Alpes françaises. *Revue de Géographie Alpine*, 98-4, <http://rga.revues.org/index1294.html>.

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2008

ECLIS

L'élevage aggrave ou atténue-t-il la vulnérabilité rurale en Afrique de l'Ouest ?

Proposer et tester des indicateurs de vulnérabilité rurale face aux changements climatiques et sociétaux

Les populations rurales d'Afrique de l'Ouest Sud Saharienne ont connu au cours des 50 dernières années des bouleversements liés à une réduction des pluies observée depuis la fin des années 60 et à un essor démographique concomitant. La dégradation des services de l'écosystème et la paupérisation des ruraux dans un contexte économique et politique contraignant posent le problème de la vulnérabilité des sociétés rurales face à ces changements. Or l'élevage au Sahel, et de plus en plus en zone tropicale subhumide, est déterminant dans l'économie des familles et le fonctionnement des agro-écosystèmes. Le projet ECLIS a pour objectifs d'évaluer la contribution de l'élevage à la vulnérabilité, la résilience et l'adaptabilité des familles rurales, d'identifier et de tester des indicateurs de vulnérabilité.

Une approche historique et transdisciplinaire des dynamiques de l'écosystème et des sociétés rurales pratiquant l'élevage en Afrique de l'Ouest

L'identification d'indicateurs de vulnérabilité passe par une analyse transdisciplinaire des dynamiques historiques des services de l'écosystème et des sociétés rurales pratiquant l'élevage sur les 50 dernières années. Les indicateurs sont identifiés puis testés sur quatre sites communaux choisis pour leur représentativité régionale, en particulier par rapport au gradient bioclimatique Ouest Africain allant de l'aride au sub-humide : Tessékéré au Sénégal, Hombori au Mali, Dantiandou au Niger et Djougou au Bénin. Pour tenir compte des politiques administratives de décentralisation de la gestion des ressources naturelles, l'échelle d'analyse retenue est la commune rurale. Celles-ci d'instauration récente, sont vastes en superficie, hétérogènes en ressources avec des populations et des pratiques d'élevage diversifiées. La diversité des pratiques dans une même entité géographique en relation avec l'économie familiale, l'accès aux ressources et leur sécurisation sert précisément l'identification d'indicateurs. Finalement, une analyse transverse des indicateurs communaux permet d'identifier des règles d'extrapolation testées sur l'Afrique de l'Ouest.

Résultats majeurs

Les indicateurs confirment que l'élevage atténue la vulnérabilité économique des familles rurales et favorise l'émergence de pôles de fertilité des sols dans les terroirs. Ils révèlent aussi la vulnérabilité de l'élevage pastoral naisseur à l'expansion des cultures et aux restrictions d'accès qui accompagnent l'essor démographique. Etablis à l'échelle de communes, les indicateurs devraient être des outils d'aide à la décision des politiques communales et publiques. Les retombées scientifiques d'ECLIS sont liées à la transdisciplinarité des recherches à l'interface entre sciences biophysiques et sciences humaines. Enfin, ECLIS devrait valoriser les bases de données existantes sur le climat, les écosystèmes et les systèmes agraires, en particulier en liaison avec le SOERE AMMA-CATCH.



Le schéma conceptuel de l'approche ECLIS resitue les composantes de la vulnérabilité des familles rurales : exposition et incapacité d'adaptation par rapport au risque (cycle en vert). Sont aussi définis l'indicateur de vulnérabilité et son test par la trajectoire historique (parme), ainsi que les domaines d'application (orange).

ECLIS « Elevage Climat et Société » est un projet de recherche fondamentale à vocation finalisée coordonné par le GET (Géosciences Environnement Toulouse). Il associe HSM (Hydrosciences Montpellier), le LTHE (Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement), l'IRAM (Institut de Recherches et d'Applications des Méthodes de développement), l'ADES (Aménagement, Développement, Environnement, Santé et Sociétés), PRODIG (Pôle de Recherche sur l'Organisation et la Diffusion de l'Information Géographique), le PPZS (Projet Pastoral Zone Sèche) qui lui-même associe le CIRAD (Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement) ainsi que 4 organismes sénégalais : l'Université Cheik Anta Diop, l'IS-RA (Institut Sénégalais de Recherches Agronomiques), l'Ecole Nationale d'Economie Appliquée et l'Unité Mixte Internationale Résiliences. Le projet a débuté en janvier 2008 pour une durée de 48 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 638 k€ pour un coût global de 4 M€.

Production scientifique et brevets

Citons notamment :

- Lesnoff M., 2011. Méthodes d'enquête pour l'estimation des paramètres démographiques des cheptels de ruminants domestiques tropicaux en milieux villageois. Doc. CIRAD, 17 pp.
- Becerra S., Saqalli M., Gangneron F., Dia H., 2012. Ordinary vulnerabilities, coping strategies and future adaptability to water crisis in the Sahelian Mali (Gourma). Human Ecology (accepted).
- Touré O., Bonnet B., 2010. Etudes de cas sur la vulnérabilité et l'adaptabilité des éleveurs face aux événements dans la commune de Tessékéré au Sénégal. Rapport de recherche IRAM, 105 pp.
- Wane A., 2010. Rapport sur la commercialisation des produits d'élevage. Cas du Ferlo (Sahel sénégalais). Rapport CIRAD PPZS, 23 pp.

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2008

PICREVAT

Optimiser les prévisions climatiques saisonnières pour l'agriculture tropicale

Analyser la traduction d'un signal climatique partiellement prévisible vers les échelles des impacts agricoles et son adéquation avec les attentes des utilisateurs finaux

La production agricole représente un enjeu crucial de la vulnérabilité des sociétés tropicales, et elle dépend de nombreux facteurs, mais la variabilité pluviométrique a potentiellement un impact très fort. Les pluies tropicales, essentiellement de nature convective, sont intégrées dans le temps et dans l'espace par des mécanismes emboîtés et les cumuls saisonniers sont partiellement prévisibles du fait de l'influence thermodynamique des champs de surface, dont les températures de surface océanique. Leur inertie temporelle permet la fourniture routinière de prévisions saisonnières à l'échelle régionale depuis près de 15 ans. Le projet PICREVAT analyse certaines sources qui limitent l'utilisation efficace de ces prévisions saisonnières selon plusieurs approches : d'abord en recherchant comment un signal saisonnier est désagrégué vers des échelles spatio-temporelles plus fines, théoriquement plus en adéquation avec l'impact réel sur les productions agricoles ; ensuite en confrontant ce qui est possible du point de vue physique avec l'information attendue la plus susceptible d'adapter efficacement les pratiques afin d'augmenter la production finale et/ou de diminuer les risques.

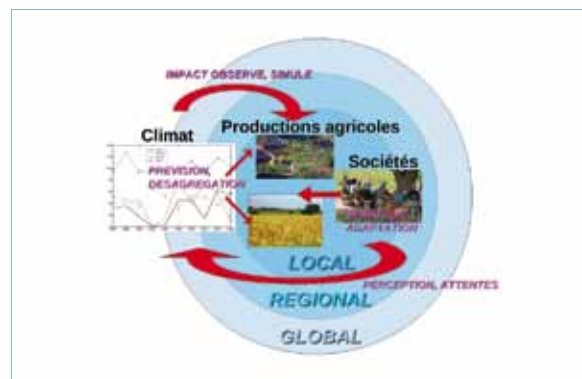


Schéma général de la problématique du projet PICREVAT.

Approche intégrative combinant modélisation agronomique, analyse statistique et numérique du climat et enquêtes socio-ethnographiques

PICREVAT est un projet multidisciplinaire (géographie, climatologie, agronomie, ethnologie) conduit sur trois terrains différents (Afrique de l'Est avec un zoom principal sur le Kenya et le Nord de la Tanzanie, le nord du Cameroun et l'Argentine centrale), ce qui permet des comparaisons méthodologiques utiles, mais aussi l'examen de trois régions soumises à différents niveaux de prévisibilité potentielle et dont les structures agricoles sont fondamentalement différentes. Les méthodes utilisées variées répondent à la diversité des champs disciplinaires. Ainsi, des analyses statistiques élaborées sont combinées à des simulations aussi bien climatiques qu'agronomiques et des enquêtes socio-ethnographiques. Les résultats escomptés sont d'une part, l'identification des différents goulots d'étranglement (physiques, agronomiques, techniques et sociologiques) dans la chaîne entre les utilisateurs agricoles des prévisions climatiques et les climatologues réalisant les prévisions et d'autre part, une amélioration des informations utiles dans ce contexte par la biais de la détermination d'indicateurs et de méthodes s'appuyant sur des outils qui seront disponibles en fin de projet. Le projet s'attachant à l'analyse de situations très contrastées a pour objectif non seulement de documenter les attendus et la pertinence des prévisions saisonnières mais aussi de mettre en évidence les convergences et les divergences en fonction de ces situations.

PICREVAT « Prévision de l'Information Climatique pour la Réduction de la Vulnérabilité de l'Agriculture Tropicale » est un projet de recherche fondamentale à vocation finalisée coordonné par le CEREGE (Centre Européen de Recherches et d'Enseignement en Géosciences de l'Environnement). Il associe le CRC (Centre de Recherches en Climatologie), le LOCEAN (Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentation et Analyses Numériques), le CIRAD (Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement) et l'IEDES (Institut d'Etude du Développement Economique et Social, Université de Paris 1). Le projet a débuté en janvier 2009 pour une durée de 48 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 708 k€ pour un coût global de 2,2 M€.

Résultats majeurs

Les retombées attendues sont aussi bien méthodologiques que thématiques et pratiques. Tout d'abord, la comparaison de plusieurs régions doit permettre de définir un protocole pour quantifier la prévisibilité potentielle aux échelles fines des impacts agricoles couplé avec l'analyse précise des paramètres qui conditionnent ou pas la traduction des signaux climatiques au travers des échelles imbriquées du système climatique. Une attente particulière concerne également la mise en évidence des paramètres à la fois attendus par les utilisateurs finaux et potentiellement prévisibles à l'échelle régionale.

Production scientifique et brevets

Citons notamment :

Camberlin P., Moron V., Okoola R., Philippon N., Gitau W., 2009. Components of rainy seasons variability in Equatorial East Africa : onset, cessation, rainfall frequency and intensity. Theoretical and Appl. Climatology, doi:10.1007/s00704-009-0113-1.
Pohl B., Crétat J., Camberlin P., 2011. Testing WRF capability in simulating the atmospheric water cycle over East Africa. Climate Dyn., doi:10.1007/s00382-011-1024-2.

Programme « Gestion et Impacts du Changement Climatique », édition 2005 RÉPONSES DES POPULATIONS DE VERTÉBRÉS...

Réponses des populations de vertébrés aux changements climatiques

Vers des modèles prédictifs de réponse basés sur les processus démographiques

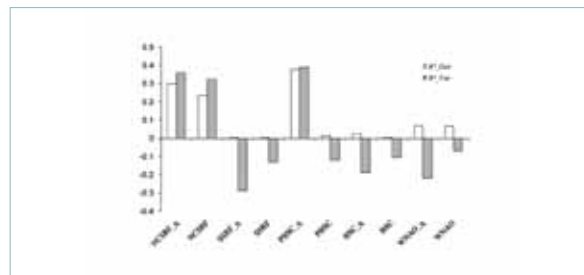
La plupart des modèles destinés à prédire des changements d'aire de répartition ou de risque d'extinction sous les effets des changements climatiques se sont appuyés sur l'étude des phénomènes plutôt que sur celle des mécanismes. Ils décrivent la future distribution géographique d'une espèce comme l'ensemble des aires où les futures conditions seront, d'après les prévisions des modèles climatiques, identiques à celles qui caractérisent l'aire de répartition actuelle de l'espèce. Ces modèles, dits de « niches climatiques », constituent une première approche indispensable. Cependant, ils doivent être complétés par des approches intégrant explicitement les processus sous-tendant les impacts du climat sur les populations. Des modèles stochastiques de projection de population, qui permettent de décrire la dynamique d'une population en termes d'effectifs de taux d'accroissement ou de probabilité d'extinction pour des conditions environnementales données sont en cours de développement. Dans ce contexte, le projet a poursuivi quatre objectifs : i) identifier et quantifier les impacts des facteurs climatiques sur les paramètres démographiques dans les populations de vertébrés étudiées par le réseau CLIM-POP, ii) mettre en œuvre les modèles stochastiques de projection de population pour étudier la sensibilité des populations aux changements des facteurs climatiques, iii) étudier dans quelle mesure la sensibilité des populations aux variations des facteurs climatiques dépend de la forme de la relation entre facteurs climatiques et paramètres démographiques et iv) évaluer l'influence de fortes interdépendances entre paramètres démographiques sur l'amplitude des réponses des espèces aux changements de valeur moyenne et de variabilité des facteurs climatiques.

Paramétrage et premières applications de modèles prédictifs

Une synthèse a été produite qui définit et évalue un ensemble de techniques statistiques pour l'analyse des impacts démographiques des facteurs climatiques. De plus, l'importante expérience collective acquise grâce aux travaux effectués dans chaque équipe du réseau CLIM-POP a permis d'identifier des lacunes méthodologiques. Des méthodes destinées à les combler ont été mises en œuvre, en particulier pour l'analyse de données de suivi à l'échelle individuelle. Ainsi, ont été développés des outils statistiques permettant de modéliser les variations d'un paramètre démographique à l'échelle multi-population, les relations non-linéaires entre facteurs climatiques et paramètres démographiques, ou encore, les schémas de causalité complexes dans lesquels, par exemple, un facteur climatique influence un paramètre démographique indirectement, via son impact sur les ressources alimentaires. Pour développer ces méthodes, l'extrême flexibilité de la modélisation Bayésienne a été exploitée.

Résultats majeurs

La méthodologie utilisée a conduit à définir et à développer une panoplie d'outils analytiques performants pour répondre aux objectifs du projet. Des études de cas ont permis d'identifier un ensemble



Estimation of the fraction of temporal variation in the adult survival of Baden-Württemberg white storks *Ciconia ciconia* accounted for by candidate climatic covariates based on analysis of deviance (R^2_{Dev}), or on analysis of variance (R^2_{Var}).

Réponses des populations de vertébrés aux changements climatiques - paramétrage et premières applications de modèles prédictifs basés sur les processus démographiques » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LBBE (Laboratoire de Biométrie et Biologie Evolutive, Université Claude Bernard Lyon 1). Le projet a commencé en 2006 et a duré 24 mois. Il a bénéficié d'un financement du GlCC de 143 k€ pour un coût global de 515 k€.

de patrons de variation démographique à partir de populations de plusieurs espèces de vertébrés. L'analyse intégrée de l'impact des variations climatiques sur la démographie et la dynamique des populations de vertébrés a été ébauchée, afin de rendre explicitement compte des mécanismes démographiques à travers lesquels la dynamique d'une population de vertébrés est influencée par ces variations. La tenue d'un colloque de restitution finale des résultats et le développement d'un réseau de recherche au niveau international sont à mettre au crédit du projet.

Production scientifique et brevets

Parmi la trentaine de publications dans des journaux internationaux à comité de lecture, citons :

- Barbraud C., *et al.*, 2008. J. of Appl. Ecology, 45:1460-1467.
- Delord K., *et al.*, 2008. Biological Conservation, 141:1840-1856.
- Gimenez O., *et al.*, 2008. American Naturalist, 172:441-448.
- Grosbois V., *et al.*, 2008. Biological Reviews 83:357-399.
- Hamel S., *et al.*, 2009. J. of Animal Ecology 78:143-151.
- Jenouvrier S., *et al.*, 2009. Global Change Ecology, 15:268-279.
- Lepetz V., *et al.* 2009. Global Change Biology 15:454-466.
- Marquis O., *et al.*, 2008. Ecology 89:2575-2583.
- Massot M., *et al.*, 2008. Global Change Biology 14:461-469.
- Moller A. P., 2008. Oecologia, 155:845-857.
- Morris W. F., *et al.*, 2008. Ecology 89:19-25.
- Nevoux M., J., *et al.*, 2008. J. of Animal Ecology 77:1143-1152.
- Nilsen E. B., *et al.*, 2009. J. of Animal Ecology 78:585-594.
- Rolland V., *et al.*, 2009. Biological Conservation 142:1084-1095.

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2008

ACOCLI

Le traitement cognitif des informations climatiques

Etude de l'adaptation cognitive face aux changements climatiques en fonction des facteurs culturels et environnementaux

Le projet a pour objectif l'étude des capacités cognitives et leur rôle dans l'adaptation humaine aux changements climatiques. Dans une approche historico-culturelle de la cognition, on considère que dans l'interaction homme/climat, le contrôle de la nature et la maîtrise de la pensée sont reliés de façon réciproque : le changement provoqué par l'homme dans la nature change sa propre nature. Nous pensons que la cognition humaine est adaptative aux contraintes de l'environnement en y incluant leurs changements. Cependant, les changements globaux accélérés ont pu créer une vulnérabilité et des conflits cognitifs, des difficultés de compréhension et par conséquent des modèles de résolution de problème défaillants. L'objectif du projet consiste à identifier le traitement cognitif des informations climatiques, en relation avec l'environnement de l'individu dans les domaines cognitifs suivants : catégorisation, compréhension, analogie, raisonnement, cognitions temporelles et spatiales, prise de décision. Il suppose également que des différences intra- et interculturelles, développementales et environnementales influencent les modes de traitement des informations climatiques.

Enquêtes de terrain et expérimentations en milieu de vie, modélisation de l'adaptation cognitive aux changements climatiques

Le projet a étudié divers aspects de la cognition chez des populations exposées à différents niveaux de risques des changements climatiques en France métropolitaine et en ultramarine : région à « haut risque » (Nouvelle Calédonie) ; régions à « moyen risque » (Guyane, Alpes, Pyrénées) et régions « protégées » (Paris, Ile- de- France), mais aussi en fonction des différences culturelles et d'une perspective développementale, dans quatre groupes d'âge. Les méthodes de recueil des données reposent essentiellement sur l'enquête de terrain préliminaire et la méthode expérimentale. En travaillant dans les milieux de vie des sujets, des quasi-expérimentations combinant à la fois la rigueur expérimentale et les avantages du recueil de données sur le terrain ont été mis en œuvre par la réalisation de plus de 800 entretiens sur les différents terrains d'études. Ce travail exploratoire a permis de développer toute une batterie d'expériences servant à identifier les modes de traitement cognitifs d'informations climatiques. Les méthodes d'analyse sont issues des diverses branches de la psychologie et de l'anthropologie cognitive. Les données obtenues permettent la modélisation de l'adaptation cognitive aux changements climatiques.

Résultats majeurs

Les résultats suggèrent que la majorité des sujets manifestent des difficultés cognitives pour organiser les informations climatiques disponibles en une vision cohérente. Toutefois, les différentes expérimentations montrent que les performances cognitives des sujets sont influencées par les modes culturels de pensée et les spécificités environnementales de leurs milieux de vie. Les sujets les plus vulnérables cognitivement sont les personnes vivant dans les milieux



Maquette de l'entrée de l'exposition interactive et itinérante, réalisée sur la base des résultats du projet ACOCLI, visant à confronter, d'une manière ludique, les propres représentations des sujets sur le changement climatique avec ceux relatifs aux recherches scientifiques.

ACOCLI « Adaptation cognitive aux changements climatiques » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le Laboratoire Paragraphe, Université Paris 8. Il associe l'Université de Cergy-Pontoise. Le projet a débuté en janvier 2009 pour une durée de 36 mois. Il bénéficie d'un financement de l'ANR de 236 k€ pour un coût global de 400 k€.

les plus protégés et qui ne disposent pas d'expériences climatiques, comme à Paris ou dans la région parisienne. Tout d'abord, nous avons identifié chez ces individus soit l'absence totale, soit un niveau de développement très élémentaire du concept de climat. Cela constituerait un obstacle majeur dans le développement des représentations des changements climatiques. Ensuite, les données montrent une importante inconsistance cognitive, qui ne permet pas de relier les dimensions spatiales et temporelles, locales et globales des changements climatiques. Finalement, les données montrent une stagnation développementale nécessitant le renforcement de la résilience face aux changements climatiques par des modes de communication et d'informations dynamiques adaptés aux spécificités des sujets auxquels ces supports sont destinés. ACOCLI a abouti à une maquette d'exposition interactive ainsi qu'à des logiciels didactiques et ludiques permettant aux usagers d'évaluer leurs représentations sur les changements climatiques et d'identifier leurs stratégies de résolution du problème et ainsi améliorer leurs attitudes cognitives et comportementales nécessaires à l'adaptation humaine aux changements climatiques.

Production scientifique et brevets

Citons notamment :

Lammel A., *et al.*, 2011. Traditional way of thinking and prediction of climate change in New Caledonia (France). *Indian J. of Traditional Knowledge* 10 (1): 13-20.

Lammel A., *et al.*, 2011. Cultural and environmental changes : Cognitive adaptation to global warming. *Proc. of the XXth Cross-Cultural Psychology*, University of Melbourne, Australie (in press).

Lammel A., *et al.*, 2011. L'apport de la psychologie cognitive à l'étude de l'adaptation aux changements climatiques : la notion de vulnérabilité cognitive. *Vertigo, Revue en Sciences de l'Environnement* (accepted).

Programme « Gestion et Impacts du Changement Climatique », édition 2008

DRIAS

« DRIAS, les futurs du climat » : un service d'accès aux informations climatiques pour l'adaptation. Nous n'avons droit qu'à un seul climat ; plusieurs futurs sont possibles ; à nous de choisir.

Pour faciliter l'accès et aider à la bonne utilisation des informations issues des projections climatiques régionalisées françaises

La prise de conscience des conséquences futures du changement climatique a fait émerger un besoin toujours plus important de données et d'informations. Des études d'impact pour différents secteurs d'activité à la planification des mesures d'adaptation, la diversité des acteurs impliqués dans les problématiques liées au climat est aussi riche que le sont leurs besoins. Toutefois, l'accès à l'information demeure compliqué et son utilisation complexe, ceci pour un très grand nombre d'utilisateurs. En parallèle à cette demande toujours croissante, la communauté scientifique de la modélisation climatique produit une importante quantité d'informations issues des projets et travaux de recherche. Ces informations sont sous-exploitées malgré un intérêt qui dépasse les objectifs initiaux de leurs développements. L'enjeu de l'adaptation est marqué désormais par l'engagement de tous les acteurs de la société. Une stratégie nationale, puis un Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC), et des dispositifs réglementaires imposent l'action. Les collectivités territoriales, les chercheurs, les entreprises, les associations et les citoyens sont tous demandeurs d'informations et de projections climatiques. Le besoin de transfert de connaissances des producteurs de simulations climatiques vers les utilisateurs impliqués dans les diverses problématiques d'impact et d'adaptation est considérable. Le projet propose de répondre à ce besoin en développant un portail web dédié offrant l'accès aux données numériques produites par les principaux centres de modélisation climatique français (IPSL, CERFACS, CNRM-GAME), mais également la découverte des principaux indicateurs climatiques sur nos territoires, et de nombreuses ressources d'accompagnement. Le service « DRIAS, les futurs du climat » constitue un maillon essentiel dans le développement et la mise en place des services climatiques soutenus et voulus par la Nation.

Développement d'un portail Internet dédié, s'appuyant notamment sur une étude comparative et les besoins exprimés par un échantillon représentatif d'utilisateurs potentiels

Le projet s'est appuyé sur un Comité d'Utilisateurs pour : i) constituer un échantillon représentatif des différentes communautés d'utilisateurs potentiels (équipes de recherche, quelle que soit leur connaissance de la modélisation climatique, bureaux d'études, entreprises, associations, collectivités territoriales), ii) contribuer à exprimer les besoins, iii) valider les choix faits par l'équipe projet, iv) effectuer des tests, et ainsi de faciliter la communication entre producteurs et utilisateurs. Il a notamment permis la réalisation d'une enquête afin de mieux cerner les besoins, les pratiques et les habitudes des utilisateurs. En parallèle à cette enquête utilisateurs, d'autres travaux ont été menés visant à préciser les spécifications de l'ensemble du système à mettre en place, s'appuyant sur une analyse du paysage national et international et l'écoute-client en matière d'adaptation. Ces travaux préliminaires, nécessaires à la mise en place d'un sys-



Pages de l'Espace Découverte du Portail « DRIAS, les futurs du climat ». La vignette de droite contient des cartes représentant pour différents horizons (bas) et pour différentes simulations (gauche), l'évolution pour la fin du 21^{ème} siècle de la température moyenne quotidienne pour le scénario d'évolution socio-économique A1B.

DRIAS « Donner accès aux scénarios climatiques Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnements » est un projet de recherche à vocation finalisée coordonné par la Direction de la Climatologie de Météo- France. Il associe le CERFACS (Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique), le CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques de Météo- France) et l'IPSL (Institut Pierre Simon Laplace). Le projet a commencé en mars 2010 et a duré 30 mois. Il a bénéficié d'un financement du GICC de 314 k€ pour un coût global de 628 k€.

tème complexe devant rendre simple des notions ardues, ont servi de base pour les spécifications du portail « DRIAS, les futurs du climat ». Sa réalisation a bénéficié de l'expérience de systèmes de production de produits climatologiques standard et de leur diffusion au moyen de portails web, acquis par la Direction de la Climatologie de Météo- France, ainsi que d'une étroite coopération entre climatologues chercheurs et opérationnels.

Résultats majeurs

Le portail dédié « DRIAS, les futurs du climat », une des mesures phares du PNACC, permet aux acteurs impliqués dans les questions d'adaptation d'accéder facilement à un ensemble d'informations plus ou moins complexes sur le climat futur, allant de documents explicatifs au téléchargement de simulations climatiques au format numérique, en passant par la visualisation interactive de cartes. Reposant sur un système de production robuste et en phase avec le monde de la recherche, ce portail se trouve être une des pierres angulaires des services climatiques français, ainsi qu'un outil majeur pour l'adaptation en France.

Production scientifique et brevets

Lémond J., *et al.*, 2011: DRIAS: a step toward Climate Services in France, *Adv. Sci. Res.*, 6, 179-186, doi:10.5194/asr-6-179-2011, <http://www.adv-sci-res.net/6/179/2011/asr-6-179-2011.html>.

7

LA VULNÉRABILITÉ DES HYDROSYSTÈMES CONTINENTAUX AUX CHANGEMENTS GLOBAUX : LE CAS DES RESSOURCES EN EAU ET LEUR ADAPTATION

LES PRINCIPALES AVANCÉES

Les projets retenus concernent, à part pratiquement égale, les recherches à caractère fondamental et finalisé, plusieurs de ces dernières faisant l'objet de partenariats public-privé.

Ils se répartissent sur l'ensemble des enjeux mentionnés dans la partie II. Ils couvrent la diversité des impacts anthropiques sur les hydrosystèmes tels que le réchauffement de la planète et les scénarii d'évolution de la ressource en eau, la pression démographique sur cette dernière, la dégradation des sols, la production d'aérosols, les pollutions diffuses d'origine agricole, l'urbanisation et ses conséquences sur la géomorphologie des cours d'eau et sur les effluents urbains, la biodiversité des zones humides. Ils concernent des milieux aussi variés que les eaux superficielles, les nappes alluviales et profondes, les zones nivo-glaciaires et leur vulnérabilité face aux changements globaux.

Plusieurs projets conduits dans les grandes régions françaises contribuent à la mise en œuvre de la DCE permettant aux gestionnaires des ressources en eau de prendre des mesures d'anticipation, voire d'adaptation.

Les terrains expérimentaux sont aussi bien nationaux que situés à l'étranger. Deux projets comparent un site français et un site à l'étranger. Les sites des Zones Ateliers de l'InEE, des SDAGE ou des SO/SOERE sont mis à contribution dans une majorité de projets.

Les échelles spatiales et temporelles considérées sont fonction des processus étudiés. Elles vont de quelques hectares à plusieurs milliers de km² en fonction des réservoirs et des sous-systèmes étudiés pour suivre les flux et les bilans de leurs composantes édaphiques, morphologiques, pédologiques et hydrologiques et s'étendent de quelques heures à plusieurs siècles selon qu'il s'agit des crues rapides ou du renouvellement des eaux des nappes très profondes.

Le développement ou l'amélioration de méthodologies expérimentales et la constitution ou la valorisation de bases de données *in situ* et satellitaires ont permis la mise en œuvre de nombreuses et diverses modélisations numériques directes, inverses ou couplées pour appréhender la vulnérabilité des hydrosystèmes aux changements globaux et les incertitudes associées, d'apprécier leur résilience et de proposer des scénarii d'évolution future des ressources en eau émanant des projections du GIEC.

Améliorer la connaissance sur les mécanismes par des innovations métrologiques et méthodologiques

L'utilisation couplée de différents géochronomètres a permis la datation absolue des glaces polaires (^{81}Kr , ^{36}Cl) et des eaux souterraines (^{81}Kr , ^{36}Cl , ^{14}C , ^{85}Kr , ^4He) sur des gammes d'âge allant de près de 800 000 ans à l'actuel, grâce au développement d'un spectromètre de masse ultra-sensible fonctionnant à l'aide de lasers qui permet la mesure de seulement quelques milliers d'atomes de ^{81}Kr et ^{85}Kr et à la mesure préalable de concentration des isotopes radioactifs ^{81}Kr et ^{85}Kr du krypton par un second spectromètre. On retiendra que la méthode du ^{36}Cl pour la datation des eaux, encore émergente en France, s'appuie sur le Service national ASTER.

Les variations de gravité observée au sol par gravimétrie absolue et par le satellite GRACE ont permis de quantifier l'influence de la mousson Ouest-Africaine aux échelles locale et continentale et de déterminer les variations des masses d'eau associées à la variabilité interannuelle de la mousson. Confrontée aux données de piézométrie et d'humidité du sol, l'hydrogravimétrie apporte une information nouvelle et intégrative sur les paramètres hydrogéologiques des milieux insaturé et saturé, telle que la porosité de drainage, et complémentaire à d'autres méthodes géophysiques comme la résonance magnétique protonique.

L'échantillonnage de quatre sites de l'agglomération parisienne et l'étude en laboratoire du fractionnement de la matière organique sur des résines chromatographiques ont démontré le caractère hydro-

phile de la matière organique dissoute dans les rejets urbains et la forte influence de cette dernière sur la spéciation des métaux et donc sur leur biodisponibilité et leur toxicité, notamment grâce à des tests réalisés à l'aide de micro-crustacés (daphnies) en présence de mélanges de cuivre et de matière organique.

Observer pour mieux comprendre et protéger les ressources en eau

Des campagnes de mesure *in situ* à haute résolution temporelle de pression partielle en CO_2 (pCO_2) dans les eaux des chenaux et des plaines d'inondation de l'Amazonie, complétées par des observations satellitaires, ont permis de montrer, pour la première fois pour un tel grand bassin tropical, que la forte variabilité des pCO_2 s'expliquait par une consommation due au phytoplancton et par des apports en provenance des zones végétalisées, mis en évidence par des mesures d'activité microbienne et par des traceurs de la matière organique. Le dégazage de CO_2 est alimenté en majorité par du carbone fixé sur place par la végétation semi-aquatique. Dans son ensemble, il apparaît que le fleuve Amazone n'est pas une source si importante de CO_2 , mais pourrait au contraire avoir un bilan net proche de l'équilibre.

Des campagnes de terrain réalisées dans des climats contrastés des glaciers des Alpes, de l'Antarctique et de Bolivie, ainsi qu'au Col de Porte (Chartreuse) ont permis de mieux caractériser les propriétés de la couche limite de surface en milieu nivoglacière, par anémométrie sonique et hygrométrie à rayonnement infrarouge. Les résultats montrent que la méthode des fluctuations turbulentes, peu utilisée en milieu

nivo-glaciaire, reste opérationnelle aux très faibles valeurs d'humidité et de pression de la haute altitude tropicale permettant ainsi la spatialisation des flux de fonte à l'échelle des bassins de montagne.

Les mesures d'aérosols effectuées en continu à l'Observatoire climatique Pyramid du Népal ont montré que la présence de particules absorbantes pouvait induire localement un réchauffement des basses couches atmosphériques, supérieur aux valeurs du GIEC pour les GES et un refroidissement à la surface. L'utilisation d'images satellitaires montre que le nombre et la surface des lacs glaciaires de la région a augmenté (signe de fonte et recul des glaciers) et que les glaciers ont perdu en moyenne un équivalent en eau de -0.20 ± 0.11 mm/an entre 2000 et 2011. Ces derniers résultats visent à appuyer les stratégies des populations locales d'adaptation face aux modifications attendues des ressources en eau et des menaces potentielles liées à l'évolution de ces dernières.

L'utilisation conjointe d'outils hydrogéologiques et géochimiques dans des contextes climatiques et socio-économiques contrastés : la Bretagne, menacée par des contaminations en nitrates et l'Inde où l'augmentation des teneurs en fluor engendre des questions de santé public (développement de la fluorose) a mis en évidence l'existence d'une forte réactivité chimique et biologique des aquifères de socle. Les résultats, obtenus dans le cadre d'un partenariat public-privé, montrent que l'accroissement de la surface des rizières sur la salinisation des eaux souterraines impactait fortement le développement de la fluorose parmi la population des enfants scolarisés, dans le cas indien. Les études

menées en France mettent en exergue les capacités d'épuration naturelle du milieu et l'importance des échanges entre les compartiments mobiles et fossiles. Les modèles de site utilisés contribuent à la définition de stratégies agricoles et économiques pour en réduire la vulnérabilité à moyen terme, en liaison avec les autorités locales de la commune de Ploemeur et en conformité avec la vision du gouvernement de l'Andhra Pradesh.

La vulnérabilité des usagers de l'eau aux changements globaux et leurs conséquences sur l'espace et l'organisation rurale des riziculteurs situés également dans la zone de socle du sud de l'Inde ont été étudiées par différentes approches combinant des enquêtes auprès des agriculteurs, l'interprétation d'images satellitaires et la modélisation sous climat actuel et futur. Les résultats obtenus dans le cadre d'un partenariat public-privé, ont permis de mieux cibler les actions à mettre en place, grâce notamment au développement d'un indicateur unique et individuel, pour une gestion plus durable des ressources en eau et de l'agriculture.

La mise en œuvre sur le bassin du Bani (130 000 km², principal affluent du Niger dont son cours supérieur se trouve à l'intersection des zones climatiques sahéliennes plus sèches et soudaniennes plus humides), de différents outils allant de l'analyse critique de données stationnelles de pluie et de débit, à la modélisation hydrologique en passant par le traitement d'images satellitaires à haute résolution spatiale et par la cartographie d'occupation des sols, a permis d'évaluer les ressources en eau présentes et à venir du bassin sous les forçages climatique, envi-

ronnemental et démographique et d'appréhender sa vulnérabilité à l'aide d'indicateurs climatiques et géographiques.

Mettre en œuvre des stratégies de gestion des ressources en eau par la modélisation

La modélisation hydrologique et hydrogéologique des ressources en eau potable et agricole de différents bassins versants des Pyrénées-Orientales fondée sur l'utilisation de scénarii d'évolution climatique à court (2020-2040) et à moyen terme (2040-2060) associée à plusieurs hypothèses socio-économiques construites à partir d'Ateliers de réflexion prospective menés en partenariat public-privé en veillant à identifier les sources d'incertitude, montre que la ressource en eau future du territoire étudié devrait diminuer à un niveau tel (de l'ordre de 20 à 40 %, surtout en été et en automne) et que les stratégies d'économie d'eau actuellement envisagées par les gestionnaires ne permettront pas de compenser les besoins et ce, dès 2030.

La modélisation hydrologique des bassins de la Seine et de la Somme obtenue, d'abord par calage sur les observations récentes, puis sous climat futur et comprenant l'analyse des incertitudes qui y sont associées, met en évidence un assèchement prononcé de ces bassins au cours du prochain siècle, avec une baisse du niveau des nappes, des débits moyens et plus encore des débits d'étiage, ce qui pourrait pénaliser l'agriculture irriguée en Beauce. Les principales incertitudes sur ces résultats proviennent des modèles de climat, et plus particulièrement de la simulation des précipitations. La démarche développée a été reprise pour des études d'impact hy-

drologique dans les bassins du Rhin, de la Loire, de la Durance ainsi que du MEDDE pour proposer des stratégies d'adaptation au changement climatique pour les secteurs liés à l'eau à l'échelle de la France entière.

Dans le bassin supérieur du Rhin, le rôle prépondérant de l'infiltration des rivières sur la recharge de la nappe a été confirmé par la mise en œuvre d'une approche couplant les eaux superficielles et souterraines. La modélisation hydrogéologique et hydrométéorologique Safran-Isba-Modcou, par ailleurs largement utilisée par Météo-France pour estimer la ressource en eau des bassins versants français, jointe à des procédures de calage pour estimer les paramètres pour des jeux de données sous climat actuel et tel que projeté par différents scénarii du GIEC montrent que les débits des hautes eaux seront plus élevés du fait des variations des précipitations et de la fonte du manteau neigeux. En revanche, les débits d'étiage seront plus faibles avec une infiltration toujours conséquente vers la nappe, dont le niveau ne devrait varier sensiblement que dans la partie Sud. Si ces impacts sont démontrés pour presque tous les scénarii, ils sont difficilement quantifiables avec précision, compte tenu des incertitudes liées aux modèles et aux paramètres estimés par calage.

Une approche probabiliste « orienté impact » a été développée sur le bassin amont de la Durance de régime nival, par trois modèles différents de descente d'échelle statistique (MDES) en vue d'évaluer leur transposabilité en climat modifié. Sur la base des sorties de 12 modèles climatiques disponibles pour la période 1860-2100, les résultats, obtenus dans le cadre

d'un partenariat public-privé, montrent que l'approche multi-modèles et multi-runs utilisée est incontournable pour toute étude d'impact hydrologique du changement climatique afin de prendre en compte les incertitudes associées aux erreurs de modélisation des GCM et des MDES d'une part, à la variabilité naturelle et chaotique du climat régional d'autre part. La dispersion résultant de l'ensemble des scénarii hydrologiques simulés sur le bassin est ainsi particulièrement importante, rendant incertaine l'évolution des débits globaux. Cependant, la forte réduction de l'enneigement associée au réchauffement climatique simulé par tous les GCM considérés permet, dans le cas particulier d'un bassin alpin, d'obtenir un signal robuste d'évolution de la saisonnalité des débits, et par conséquent des ressources en eau et des ressources énergétiques associées aux aménagements hydroélectriques, notamment de la retenue du barrage de Serre-Ponçon.

Des bases de données originales et très complètes sur deux bassins versants appartenant à des Observatoires de long terme (l'Yzeron, 150 km² situé dans la région lyonnaise, la Chézine, 34 km² en banlieue nantaise) ont conduit à proposer des indicateurs permettant de caractériser l'impact de l'étalement urbain sur l'hydrologie de ces bassins périurbains et la vulnérabilité des hydrosystèmes associés. La tenue d'un Atelier de prospective territoriale mené dans le cadre d'un partenariat public-privé a permis d'identifier les évolutions possibles de l'occupation des sols à l'échéance 2030 et de progresser sur la conception des modèles hydrologiques et des risques d'érosion du lit des rivières périurbaines pour lesquels des solutions correctives sont proposées en lien avec la DCE.

La réponse des zones humides des plaines alluviales de l'Ain et du Rhône supérieur aux étiages induits par le changement global à l'horizon 2030 a été étudiée par la modélisation des eaux superficielles et souterraines complétée par des mesures en laboratoire et *in situ*. Les résultats conduisent à la construction d'une base de connaissance sur le fonctionnement hydrologique, les caractéristiques physico-chimiques des habitats et biologiques des communautés végétales, animales et microbiennes, l'ensemble étant susceptible de mettre en œuvre une politique rigoureuse de la gestion des ressources en eau et de la biodiversité des écosystèmes considérés en liaison avec la DCE.

Les cours d'eau de deux espèces piscicoles particulièrement sensibles au changement global, le saumon et le chabot, situées dans leurs aires de distribution, les bassins armoricain et du Bez (Drôme), respectivement, ont été suivis sur la longue durée. Pour le saumon, les différents scénarii climatiques testés rendent compte d'une plus ou moins forte contraction de leur répartition autour des Iles Britanniques. Pour les deux espèces, le réchauffement climatique modifie profondément la croissance des individus, l'âge à la reproduction pour le saumon et le chabot et l'âge à la migration du saumon. Un premier modèle stochastique individu-centré d'aide à la décision pour la gestion des populations de saumon a été développé pour évaluer leur évolution démographique selon différents scénarii de changements climatiques et différentes pressions d'exploitation.

La vulnérabilité des hydrosystèmes continentaux aux changements globaux : le cas des ressources en eau et leur adaptation

Acronyme et nom du projet		Le projet en un titre
DEG	Développements expérimentaux innovants et datation multi-méthodes des eaux souterraines et des glaces polaires	La datation des eaux souterraines et des glaces polaires
GHYRAF	Gravité et Hydrologie en Afrique	Le suivi temporel des variations des réserves d'eau souterraine en Afrique de l'Ouest
BIOMET	Influence des matières organiques non humifiées sur la biodisponibilité des métaux-traces dans les eaux fortement anthropisées	Impacts des métaux lourds dans les milieux aquatiques sous forte pression urbaine
CARBAMA	Biogéochimie du CARBone et échanges atmosphériques dans le système fluvial de l'AMAZone	Le fleuve Amazone et ses plaines d'inondations : source ou puits de CO ₂ ?
TAG	Turbulence et Ablation Glaciaire	Mieux estimer les flux turbulents en milieu nivo-glaciaire pour quantifier la fonte
PAPRIKA	Réponses de la cryosphère aux pressions anthropiques : impact sur la ressource en eau et l'adaptation socio-économique au Népal	La pollution atmosphérique affecte-t-elle les glaciers et les ressources en eau de l'Himalaya ?
MOHINI	Modélisation intégrée des ressources en eau des aquifères de socle : vulnérabilité aux changements globaux d'origine anthropique	Vulnérabilité des eaux souterraines aux évolutions climatiques et sociétales : le cas des aquifères de socle
SHIVA	Evaluation socio-économique de la vulnérabilité rurale des usagers de l'eau sous l'effet des changements globaux dans la zone de socle du sud de l'Inde	Quelle est la vulnérabilité des agriculteurs aux changements globaux ?
RESSAC	Vulnérabilité des Ressources en Eau Superficielle au Sahel aux évolutions Anthropiques et Climatiques à moyen terme	Changement global et vulnérabilité d'un affluent du fleuve Niger : état des lieux et perspective
VULCAIN	VULnerability of hydrosystems to combined effect of Climate changes and human Activities in mediterranean area	Ressources en eau et changement global en zone méditerranéenne
RexHySS	Impact du changement climatique sur les Ressources en Eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et de la Somme	Le changement climatique menace-t-il les ressources en eau dans les bassins de la Seine et de la Somme ?
VulNaR	La nappe du Rhin Supérieur : effets des changements climatiques sur sa dynamique et sa vulnérabilité	Effets du changement climatique sur l'hydrologie du Bassin du Rhin Supérieur
RIWER 2030	Regional Climate, Water, Energy Resources and uncertainties from 1960 to 2030	Gestion de la ressource en eau : durabilité et incertitudes liées aux projections futures du climat
AVuPUR	Assessing the Vulnerability of Peri-Urban Rivers	Impact de l'urbanisation sur l'hydrologie et la géomorphologie des rivières périurbaines
WETCHANGE	Biodiversité et fonctions des zones humides en réponse aux étiages sévères	Impact du changement global sur le fonctionnement des zones humides alluviales
GICC	Changement global et stratégies démographiques des populations piscicoles	Changement global et espèces piscicoles dans les cours d'eau

Programme « Blanc », édition 2006

DEG

Méthodes innovantes pour dater les eaux souterraines et les glaces polaires

La datation des eaux souterraines anciennes et des glaces polaires antarctiques

La datation des eaux souterraines et des glaces polaires anciennes est aujourd'hui d'une très grande importance pour aborder des problèmes environnementaux majeurs comme la séquestration du CO₂, le stockage des déchets nucléaires en formations géologiques profondes ou l'étude du climat terrestre passé tel qu'il est enregistré dans les carottes de glace antarctiques. Toutes ces problématiques environnementales ont en commun de concerner des échelles de temps couvrant plusieurs centaines de milliers d'années pour lesquelles peu de méthodes de datation absolues sont aujourd'hui opérationnelles. Cela implique le développement de méthodes et de techniques d'analyse innovantes ultra-sensibles prenant en compte notamment les contraintes expérimentales fortes qui existent en raison des volumes limités d'échantillons d'eau ou de glace disponibles sur les sites étudiés.

Les méthodes de datation fondées sur les isotopes ⁸¹Kr, ⁸⁵Kr et ³⁶Cl

L'objectif du projet DEG est de mettre en œuvre des méthodes innovantes de datation absolue fondées sur la mesure des isotopes radioactifs ⁸¹Kr (période 229 ka), ⁸⁵Kr (10,73 a) et ³⁶Cl (301 ka) et de méthodes classiques de datation fondées sur les isotopes ¹⁴C (5,73 Ka) et ⁴He (radiogénique). L'utilisation couplée de ces géochronomètres doit permettre de dater les glaces polaires (⁸¹Kr-³⁶Cl) et les eaux souterraines (⁸¹Kr, ³⁶Cl, ¹⁴C, ⁸⁵Kr, ⁴He) sur des gammes d'âge allant de près de 800 000 ans à l'actuel. La méthode du ³⁶Cl pour la datation des eaux est encore émergente en France et son développement s'appuie sur la mise en service de l'instrument national ASTER) du CEREGE. La datation fondée sur les isotopes ⁸¹Kr et ⁸⁵Kr mise en œuvre par le CENBG a nécessité la construction d'instruments spécifiques complexes. Le spectromètre de masse innovant ultra-sensible développé possède une source fonctionnant à l'aide de lasers qui permet la mesure de seulement quelques milliers d'atomes de ⁸¹Kr et ⁸⁵Kr. Un deuxième spectromètre de masse réalise une étape préalable de concentration des isotopes radioactifs ⁸¹Kr et ⁸⁵Kr du krypton.



Spectromètre de masse permettant de concentrer les isotopes radioactifs ⁸¹Kr et le ⁸⁵Kr du krypton. Les atomes de Kr sont implantés dans des feuilles d'aluminium et libérés sélectivement sous vide à l'aide d'un laser infrarouge.

DEG « Développements expérimentaux innovants et datation multi-méthodes des eaux souterraines et des glaces polaires » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le CNAB/CENBG (Laboratoire de Chimie Analytique et Bio-environnementale, Centre d'Etudes Nucléaires de Bordeaux Gradignan). Il associe le CEREGE (Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement) et l'IDES (Interactions et Dynamique des Environnements de Surface). Le projet a débuté en novembre 2006 pour une durée de 36 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 280 k€ pour un coût global de 1,4 M€.

Résultats majeurs

Les analyses en ¹⁴C et ³⁶Cl d'eaux souterraines profondes du bassin de Paris ont montré des activités souvent proches de la limite de détection en ¹⁴C et à l'équilibre séculaire pour le ³⁶Cl. Ces conditions sont compatibles avec un caractère très ancien des eaux (> 10 000 ans), également suggéré par les teneurs en ⁴He mesurées. Un nouveau type de spectromètre de masse a été construit pour concentrer le ⁸¹Kr et le ⁸⁵Kr et permettre l'analyse du Kr radioactif pour dater les eaux souterraines. Les mesures de Kr à venir pourraient ainsi permettre de confirmer les résultats obtenus.

Production scientifique et brevets

Lavastre V., *et al.*, 2010. App. Geochem., 25 : 123-142.
Lavielle B., *et al.*, 2010. Development of a new facility for dating old groundwaters by using ⁸¹Kr. Clay in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement. 4th Int. meeting, Nantes, France.
Lavielle B., *et al.*, 2010. Development of a new facility for dating old groundwaters and ice cores based on ⁸¹Kr measurement. Goldsmith Conf., : June 13-18 (actes A567), Knoxville, US.

Programme « Blanc », édition 2009

GHYRAF

Le suivi temporel des variations des réserves d'eau souterraine en Afrique de l'Ouest

Contribution hydrologique aux variations du champ de gravité en Afrique de l'Ouest

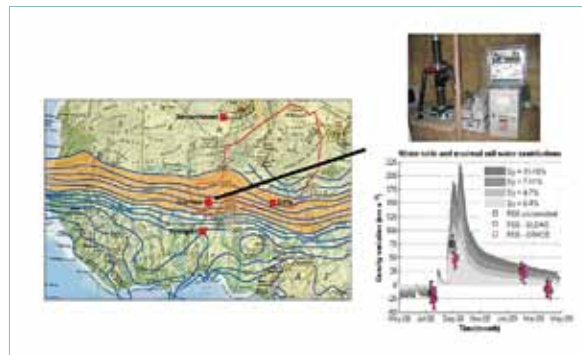
L'objectif principal du projet GHYRAF est d'apporter de nouvelles contraintes sur le cycle de l'eau en Afrique de l'Ouest, par la confrontation entre modèles hydrologiques et observations multidisciplinaires (gravimétrie sol et satellitaire, géodésie, hydrologie, météorologie) des variations saisonnières des réserves en eau. La zone d'étude épouse le fort gradient pluviométrique depuis le Sahara (sec et sans variation de stock) jusqu'au Golfe de Guinée (forte pluviométrie annuelle) en passant par le Sahel semi-aride (à forte variabilité interannuelle). Le projet permet aussi une comparaison entre les mesures de pesanteur au sol et par le satellite GRACE des variations de stocks à des échelles spatiales différentes allant du bassin versant de taille réduite (quelques km²) aux grands bassins africains (Fleuve Niger, Lac Tchad).

L'hydrogravimétrie : un outil pour le suivi des stocks d'eau

La réponse hydrologique d'un système aux variations climatiques est complexe du fait de la nature du cycle hydrologique transformant les précipitations en ruissellement, infiltration, évapotranspiration et stockage, la région sahélienne étant soumise à une forte variabilité spatiale et temporelle de ces différents processus. Des mesures périodiques (4 fois par an) de gravimétrie absolue ont été mises en œuvre sur 3 sites spécifiques au Bénin (Djougou) et au Niger (Niamey, Diffa) à la pluviométrie très différente, pour permettre de contraindre les variations temporelles des stocks d'eau à l'échelle locale (quelques centaines de m²). Les mesures par le satellite GRACE permettent d'estimer les effets de redistribution des masses d'eau à l'échelle continentale (quelques centaines de km²). Les observations gravimétriques conduisent ainsi à détecter les principales variations de la nappe et de la zone insaturée, en liaison avec la mousson Ouest-Africaine. Combinée à des mesures hydrodynamiques (limnimétrie, piézométrie, humidité du sol), l'hydrogravimétrie permet d'apporter une information nouvelle sur les paramètres hydrogéologiques du milieu et de mieux contraindre les bilans hydrologiques, préalable nécessaire à une bonne gestion de la ressource en eau.

Résultats majeurs

Les variations de gravité observées au sol et par satellite sur les sites du Niger et du Bénin ont permis de quantifier l'influence de la mousson aux échelles locale et continentale et notamment de déterminer les variations de stock associées à la variabilité interannuelle de celle-ci. Confrontées aux données hydrologiques disponibles, les mesures de gravimétrie ont apporté une information nouvelle et intégrative sur les propriétés de stockage de l'aquifère (porosité de drainage), complémentaire à celle d'autres méthodes géophysiques telle que la résonance magnéto-protonique. Une campagne intensive de micro-gravimétrie a permis d'imager les variations spatiales des stocks d'eau à petite échelle spatiale (< 1 km) et temporelle (hebdomadaire), et de détecter des zones de stockage préférentiel à l'aplomb de petites ravines. A plus grande échelle, l'analyse des observations de gravimétrie spatiale montre que les variations saisonnières sur les bassins du Niger et du Tchad sont en bon accord avec les modèles hydrologiques globaux et avec le forçage météorologique. Les ob-



A gauche, les sites d'étude du projet GHYRAF. A droite, les variations de gravité observées au sol (gravimètre absolu FG5) sur le site près de Niamey pendant la mousson de 2008 et la modélisation gravimétrique qui conduit à une valeur de porosité de drainage (Sy) en accord avec les mesures par résonance magnéto-protonique.

GHYRAF « Gravité et Hydrologie en Afrique » est un projet de recherche fondamentale coordonné par l'IPGS (Institut de Physique du Globe de Strasbourg). Il associe l'IPGP (Institut de Physique du Globe de Paris), Géosciences Montpellier, HSM (HydroSciences Montpellier) et le GET (Géosciences Environnement Toulouse). Le projet a débuté en janvier 2008 pour une durée de 48 mois. Il bénéficie d'un financement de l'ANR de 475 k€ pour un coût global de 3, 4 M€, ainsi que de l'appui des Représentations de l'IRD au Niger et au Bénin et des Universités et Services de l'Eau de ces deux pays.

servations GPS ont permis d'identifier le cycle de mousson dans le déplacement vertical élastique de la surface terrestre en réponse à la charge hydrologique.

Production scientifique et brevets

- Bastola S., Delclaux F., 2011. Temporal extension of meteorological records for simulation modeling of Lake Chad Basin (Africa) using satellite rainfall data and reanalysis datasets. *Meteo. Appl.*, doi: 10.1002/met.257.
- Boy J.P., *et al.*, 2011. Retrieval of large scale hydrological signal in Africa from GRACE time-variable gravity fields. *Pure and Appl. Geophys.*, doi: 10.1007/s00024-011-0416-x.
- Hinderer J., and the GHYRAF team, 2011. Land water storage changes from ground and space geodesy: first results from the GHYRAF (Gravity and Hydrology in Africa) experiment. *Pure and Appl. Geophys.*, doi: 10.1007/s00024-011-0417-9.
- Le Coz M., *et al.*, 2011. Multiple-point statistics for modeling facies heterogeneities in a porous media: the Komadougou-Yobe alluvium, Lake Chad basin. *Math. Geosci.*, doi 10.1007/s11004-9353-6.
- Pfeffer J., *et al.*, 2011. Local and global hydrological contribution to time variable gravity in southwest Niger. *Geophys. J. Int.*, 184: 661-672.
- Séguis L., *et al.*, 2011. Origins of streamflow in a crystalline basement catchment in a sub-humid Sudanian zone: The Donga basin (Benin, West Africa). *J. Hydrol.*, 402 :1-13.

Programme « Jeunes Chercheurs, Jeunes Chercheuses », édition 2005

BIOMET

Impact des métaux lourds dans les milieux aquatiques sous forte pression urbaine

Caractérisation du rôle de la matière organique d'origine urbaine sur la biodisponibilité des métaux dans les milieux aquatiques

Dans les milieux aquatiques, la spéciation des métaux traces (dits « lourds »), c'est-à-dire leur répartition entre leurs différentes formes chimiques, conditionne leur biodisponibilité vis-à-vis des organismes vivants. La matière organique, en raison de sa capacité à lier les métaux, joue un rôle clé dans cette spéciation, et notamment sa fraction humique (fraction hydrophobe acide). Cette fraction représente en moyenne de 40 à 60% de la matière organique dissoute (MOD) dans les eaux naturelles de surface. Dans les cours d'eau sous forte influence anthropique, en raison des rejets urbains, la proportion de la fraction hydrophile augmente. Cependant, étant donnée la très grande difficulté de l'isolation de la matière organique hydrophile, très peu d'informations sont disponibles dans la littérature concernant l'affinité complexante de la matière organique hydrophile vis-à-vis des métaux traces. Les objectifs du projet BIOMET sont multiples : il s'agit d'une part, de caractériser la matière organique provenant des rejets de station d'épuration (en particulier la fraction hydrophile) et d'autre part, d'étudier sa capacité à moduler la spéciation et biodisponibilité des métaux afin de mieux estimer l'impact des métaux traces dans les milieux aquatiques sous forte pression urbaine.

Le fractionnement de la matière organique dissoute selon des critères de polarité pour l'étude spécifique de la fraction hydrophile

La matière organique dissoute provenant de quatre sites du bassin de la Seine a été échantillonnée. Ils sont représentatifs de sites peu impactés par les rejets urbains, de rejets urbains de temps sec (les effluents traités de la station d'épuration Seine-Aval) et de sites fortement impactés par les rejets urbains à l'aval des principaux rejets de l'agglomération parisienne. La matière organique échantillonnée a été fractionnée selon un critère de polarité et purifiée. Les fractions hydrophobes et hydrophiles ont ainsi pu être caractérisées séparément. Cette méthodologie nous a permis d'étudier la fraction hydrophile isolée. Afin de mettre en évidence l'influence de chaque fraction de matière organique sur la spéciation des métaux, les constantes et capacités de complexation des métaux ont été déterminées pour chaque fraction de matière organique grâce à la modélisation des données expérimentales. L'influence de chaque fraction sur la biodisponibilité et la toxicité du cuivre a également été caractérisée grâce à des tests de toxicité réalisés à l'aide de daphnies (micro- crustacés) en présence de mélanges de cuivre et de matière organique.

Résultats majeurs

Il a été démontré que la matière organique d'origine urbaine contient principalement de la matière organique dissoute hydrophile. Ces rejets urbains augmentent sensiblement le caractère hydrophile dans la Seine à l'aval de l'agglomération parisienne. L'influence de cette MOD hydrophile sur la spéciation des métaux et donc sur leur biogéochimie est forte puisqu'elle présente un nombre élevé de sites fixateurs et des constantes de complexation importantes. La dimi-



Fractionnement de la matière organique dissoute par passage de l'échantillon sur des résines chromatographiques.

BIOMET « Influence des matières organiques non humifiées sur la biodisponibilité des métaux traces dans les eaux fortement anthropisées » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LEESU (Laboratoire Eau, Environnement et Systèmes Urbains). Il associe l'IRSTEA (Institut de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture), le LGE (Laboratoire de Géochimie des Eaux), le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement) et Bioemco (Biogéochimie et écologie des milieux continentaux). Le projet a débuté en décembre 2005 pour une durée de 39 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 120 k€ pour un coût global de 250 k€.

nution importante de la biodisponibilité des métaux dans les milieux aquatiques en présence de la fraction hydrophile de la matière organique a été démontrée.

Production scientifique et brevets

Muresan B., Pernet-Coudrier B., Cossa D., Varrault G., 2011. Measurement and modelling of mercury complexation by dissolved organic matter isolates from freshwater and effluents of a major wastewater treatment plant. *Appl. Geochem.*, 26 (12): 2057–2063.
Pernet-Coudrier B., Companys E., Galceran J., Morey M., Mouchel J.M., Puy J., Ruiz N., Varrault G., 2011. Pb-binding to various dissolved organic matter in urban aquatic systems: key role of the most hydrophilic fraction. *Geoch. and Cosmoch. Acta*, doi:10.1016/j.gca.2011.04.030, 75-4001-4019.
Pernet-Coudrier B., Varrault G., Saad M., Croué J.P., Dignac M.F., Mouchel J.M., 2011. Characterization of dissolved organic matter in Parisian urban aquatic systems: predominance of hydrophilic and proteinaceous structures. *Biogeochemistry* 106 (1): 89-106.
Filella M., Quentel F., Pernet-Coudrier B., Varrault G., 2009. Application of a refractory organic matter quantification method to wastewater effluents. *Int. J. of Environ. Analytical Chem.*, 89 (8-12): 799-807.
Pernet-Coudrier B., Clouzet L., Varrault G., Tusseau-Vuillemin M.H., Verger A., Mouchel J.M., 2008. Dissolved organic matter from treated effluent of a major wastewater treatment plant: characterization and influence on copper toxicity. *Chemosphere* 73 (4):593-599.

Programme « Blanc », édition 2008

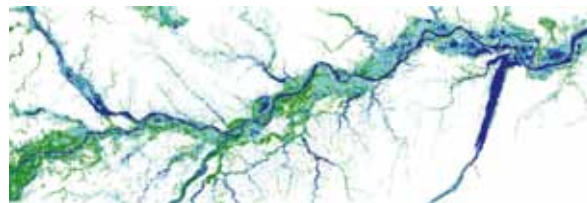
CARBAMA

Le fleuve Amazone et ses plaines d'inondations :
source ou puits de CO₂ ?**Le bilan de carbone du fleuve Amazone doit être revisité en quantifiant le rôle de la végétation des plaines d'inondation**

Les systèmes fluviaux sont reconnus depuis peu, non plus uniquement comme des vecteurs de carbone du continent vers l'Océan, mais comme des sources de CO₂ pour l'atmosphère. Les quelques estimations du dégazage de CO₂ à l'échelle globale indiquent que ce flux pourrait être équivalent au pompage de carbone anthropique par la biosphère terrestre, ce qui pose le problème du bilan net de carbone des continents et de leur capacité à le stocker à moyen terme. Les grands fleuves tropicaux et leurs plaines d'inondation contribuent pour une large part à ce dégazage, estimé à 0.5 Pg C par an pour le seul fleuve Amazone. Cependant, ce chiffre est fondé sur des observations principalement dans les chenaux du fleuve et ses tributaires, et très peu dans ses plaines d'inondation qui, en Amazonie, représentent plus de 2/3 de la surface aquatique, et où de la végétation pourrait d'une part, limiter les dégazages, et d'autre part, alimenter les eaux en carbone qui sera dégazé plus en aval. Le projet CARBAMA vise à comprendre les spécificités du cycle du carbone dans ces plaines d'inondation et à quantifier le rôle de la végétation semi-aquatique dans le bilan de CO₂ du fleuve.

Des mesures à haute résolution sur le terrain couplées à de l'imagerie satellitaire

Le projet CARBAMA réalise, pour la première fois dans un grand système fluvial, des mesures à haute résolution de pression partielle en CO₂ dans les eaux des chenaux et des plaines d'inondation, y compris lorsque le niveau d'eau est très bas et ce, à partir de très petites embarcations. La matière organique est caractérisée à l'aide d'un croisement de traceurs (lipides, lignine, isotopes) qui permettent de distinguer les sources provenant du phytoplancton, des macrophytes, de la forêt inondée et du milieu terrestre. Ensuite, des mesures d'activité microbienne (respiration, production primaire et bactérienne) ont été réalisées pour voir dans quelle mesure la balance entre autotrophie et hétérotrophie peut expliquer ou non le dégazage de CO₂. Enfin, l'imagerie satellitaire permet de quantifier l'extension des eaux et de la végétation pendant les campagnes de mesure. Nous avons choisi d'étudier un tronçon de l'Amazone comportant un gradient biogéographique très marqué allant d'une prédominance de la forêt inondée en amont à celle des lacs de plaine d'inondation à l'aval. Quatre campagnes entre 2009 et 2011 ont permis de couvrir l'ensemble du cycle hydrologique.



Site d'étude du projet CARBAMA et carte du tronçon du fleuve Amazone (850 km) dérivée de la mosaïque J-ERS (résolution 100 m), montrant les eaux permanentes du chenal principal (bleu roi), les plaines d'inondation occupées par la forêt inondable (vert) et les lacs temporaires (bleu ciel).

CARBAMA « Biogéochimie du CARBOne et échanges atmosphériques dans le système fluvial de l'AMAZONE » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le Laboratoire EPOC (Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux). Il associe le GET (Géosciences Environnement Toulouse), BOREA (Biologie des Organismes et Ecosystèmes Aquatiques), le LGE (Laboratoire de Géochimie des Eaux) et le LOG (Laboratoire d'Océanologie et Géosciences). Le projet a débuté en janvier 2009 pour une durée de 48 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 809 k€ pour un coût global de 3,23 M€.

Résultats majeurs

La forte variabilité des pressions partielles en CO₂ dans les eaux des plaines d'inondation s'explique clairement par une consommation due au phytoplancton et par des apports en provenance des zones végétalisées. Ceci est confirmé par les mesures d'activités microbiennes et par les traceurs de matière organique. Les résultats montrent que le dégazage de CO₂ est alimenté en majorité par du carbone fixé sur place par la végétation semi-aquatique. Dans son ensemble, il apparaît que le fleuve Amazone n'est pas une source si importante de CO₂, mais pourrait au contraire avoir un bilan net proche de l'équilibre.

Production scientifique et brevets

Outre la publication ci-dessous, 4 autres ont été soumises dans des revues internationales à comité de lecture et d'autres sont en préparation pendant la 4^{ème} année du projet qui sera consacrée en grande partie à la valorisation des résultats.

Mortillaro J.M., Abril G., Moreira-Turcq P., Sobrinho R., Perez M., Meziane T., 2011. Fatty acid and stable isotopes (¹³C, ¹⁵N) signatures of particulate organic matter in the Lower Amazon River: seasonal contrasts and connectivity between floodplain lakes and the mainstream. *Organic Geochemistry* 42: 1159–1168.

Programme « Jeunes Chercheurs, Jeunes Chercheuses », édition 2005

TAG

Mieux estimer les flux turbulents en milieu nivo-glaciaire pour quantifier la fonte

Etude des interactions dynamiques entre l'atmosphère et le bilan d'énergie glaciaire en montagne

Le climat contrôle la fonte des glaciers et de la neige par les flux radiatifs et turbulents de chaleur sensible et latente. La compréhension du forçage du changement climatique sur la neige et les glaciers passe donc par l'étude de ces flux. En régime catabatique, la source principale d'incertitude est due aux flux turbulents qui résultent des interactions dynamiques entre l'atmosphère et une surface froide caractérisée par un fort albédo et une faible rugosité de surface. Le projet TAG, qui présente une forte composante expérimentale, visait à mieux caractériser les propriétés de la couche limite atmosphérique en milieu nivo-glaciaire afin d'améliorer les schémas de spatialisation des flux de fonte à l'échelle du bassin de montagne caractérisé par de forts gradients des variables météorologiques. Les objectifs étaient : i) l'analyse des variabilités spatiale et temporelle des flux turbulents et de la partition de l'énergie incidente en sublimation et fonte, ii) l'étude des effets du réchauffement atmosphérique sur les glaciers, incluant les rétroactions de surface sur la stabilité de l'air et iii) l'amélioration du calcul des variations glaciaires dans les modèles climatiques.

Etude de la couche limite atmosphérique par la mesure des gradients moyens et des flux turbulents

Différentes méthodes de mesure des flux turbulents et des hauteurs de rugosité ont été comparées afin de quantifier les incertitudes sur les profils aérodynamiques, les pesées lysimétriques et les corrélations turbulentes. La mise en œuvre de cette dernière méthode nécessite des instruments d'utilisation délicate, au temps de réponse rapide, tels qu'un anémomètre sonique et un hygromètre à rayonnement infrarouge (voir fig. ci-dessous). Alors que la méthode des fluctuations turbulentes reste peu utilisée en milieu nivo-glaciaire, caractérisé par une stabilité thermique, le projet a montré que celle-ci est opérationnelle aux très faibles valeurs d'humidité et de pression de la haute altitude tropicale. L'analyse des profils verticaux moyens de vent, de température et d'hygrométrie a permis de valider les hypothèses de mesure des flux et déterminer les propriétés de la couche de surface. L'analyse des flux radiatifs permet de boucler les bilans d'énergie et de quantifier l'importance relative des flux turbulents. Les campagnes de terrain ont été réalisées dans les climats contrastés des glaciers de Saint-Sorlin (Alpes), Prud'Homme (Antarctique) et Zongo (Andes), et au Col de Porte (Chartreuse- Alpes) dans le cadre du SOERE GLACIOCLIM.

Résultats majeurs

Bien que réalisée dans des conditions glaciaires difficiles, l'analyse des profils a permis de caractériser le vent catabatique et les hauteurs de rugosité pour améliorer la modélisation des flux. Le traitement des données de corrélation turbulente a fait l'objet d'une optimisation qui met en évidence que la principale erreur commise est sur le flux de



Dispositif de mesure des fluctuations turbulentes, des profils de température et de vent sur le glacier Zongo situé en Bolivie à 5 050 m d'altitude.

TAG «Turbulence et Ablation Glaciaire» est un projet de recherche fondamentale coordonné par l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement). Il associe l'Unité de Recherche GREATICE de l'IRD, le LGGE (Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement) et le CEN (Centre d'Etude de la Neige de Météo- France, Grenoble). Le projet a débuté en décembre 2005 pour une durée de 48 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 125 k€ pour un coût global de 560 k€.

chaleur latente due à la séparation des capteurs d'humidité et de vent. Un modèle de fonte, de type « degré- jour », montre qu'il n'est pas adapté aux glaciers tropicaux où la fonte est contrôlée par les flux radiatifs qui sont mal corrélés à la température.

Production scientifique et brevets

Lejeune Y., Wagnon P., Bouilloud L., Chevallier P., Etchevers P., Martin E., Sicart J.E., Habets F., 2007. Melting of snow cover in a tropical mountain environment in Bolivia: Processes and modelling. *J. of Hydrometeorology* 8 (4): 922-937.
Sicart J.E., Hock R., Six D., 2008. Glacier melt, air temperature, and energy balance in different climates: The Bolivian Tropics, the French Alps, and northern Sweden. *J. Geophys. Res.-Atmospheres* 113 (D24113), doi:10.1029/2008jd010406.
Six D., Wagnon P., Sicart J.E., Vincent C., 2009. Meteorological controls on surface energy balance on Saint-Sorlin glacier (France): ablation season 2006. *Annals of Glaciology* 50 : 66-72.
Sicart J.E., Hock R., Ribstein P., Litt M., Ramirez E., 2011. Analysis of seasonal variations in mass balance and meltwater discharge of the tropical Zongo glacier by application of a distributed energy balance model. *J. Geophys. Res.*, 116 (D13105), doi:10.1029/2010JD015105.

Programme « Changements Environnementaux Planétaires », édition 2009

PAPRIKA

La pollution atmosphérique affecte-t-elle les glaciers et les ressources en eau de l'Himalaya?

Réactions de la cryosphère aux pressions anthropiques : conséquences sur les ressources en eau et l'adaptation socio-économique au Népal

De récentes études, bien qu'incomplètes, montrent une réduction de la surface du couvert nival et du volume de la plupart des glaciers himalayens au cours des dernières décennies, susceptible d'impacter les ressources en eau et la vie de millions de personnes dans cette région. Cependant, les mécanismes reliant le changement climatique et la cryosphère sont complexes et le réchauffement n'est pas le seul responsable de la fonte nivale ou glaciaire. Ils sont également contrôlés par les conditions atmosphériques, aux échelles locale et régionale, notamment par la mousson asiatique qui dirige les flux de précipitations neigeuses et pluviales sur la région en été. Les fortes concentrations en polluants atmosphériques mesurées dans des zones élevées et reculées de cette région impactent aussi la fonte glaciaire et nivale. Le projet PAPRIKA s'intéresse aux processus physiques et chimiques de l'évolution actuelle et future de la cryosphère liée au changement climatique, à la modification de la composition chimique de l'atmosphère et aux conséquences de cette évolution sur les ressources en eau du bassin de la Koshi au Népal.

Modélisations climatiques et hydrologiques calibrées et validées par des mesures atmosphériques, glaciologiques, hydrologiques et des enquêtes auprès des populations

Alors que de fortes concentrations de carbone suie et d'autres espèces ont été détectées à 5100 m au Népal depuis 2006 et que des études préliminaires montrent un fort impact potentiel sur le réchauffement de l'atmosphère et sur la fonte de la neige via la modification de l'albédo, le projet a pour objectifs : i) de compléter les observations à la station NCO-P (Nepal Climate Observatory at Pyramid) par des mesures et prélèvements sur un glacier voisin pour quantifier ces impacts sur la neige, ii) d'utiliser cette information pour développer un modèle de neige prenant en compte les aérosols, iii) de développer des scénarii climatiques et des outils de modélisation (globale et régionale) prenant en compte les aérosols pour représenter la disponibilité et la variabilité de la ressource en eau à l'échelle régionale, iv) d'étudier la perception, la vulnérabilité et les options d'adaptation des communautés face aux changements de disponibilité de la ressource en eau dans le bassin de la Koshi et v) d'intégrer les connaissances scientifiques ci-dessus aux capacités intrinsèques des communautés locales à faire face aux évolutions attendues de la ressource en eau et aux menaces potentielles associées.

Résultats majeurs

Les mesures des aérosols effectuées en continu à la station NCO-P ont montré que la présence de particules absorbantes pouvait induire localement un réchauffement des basses couches de l'atmosphère (forçage radiatif positif de $+10$ à 20 Wm^{-2}) ainsi qu'un refroidissement à la surface (forçage radiatif compris entre -4 et -20 Wm^{-2}). Le réchauf-



« Atmospheric Brown Cloud » vu depuis la station NCO-P (Nepal Climate Observatory at Pyramid) (By courtesy of Ev-K2-CNR).

PAPRIKA « Réponses de la cryosphère aux pressions anthropiques : impact sur la ressource en eau et l'adaptation socio-économique au Népal » est un projet de recherche fondamentale à vocation finalisée coordonné par le LTHE (Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement). Il associe le LGGE (Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement), le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement), HSM (HydroSciences Montpellier), PACTE (Politiques publiques, ACTION politique, Territoires) et le CEH (Centre d'Etudes Himalayennes). Le projet a débuté en janvier 2010 pour une durée de 48 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 664 k€ pour un coût global de 2,83 M€.

fement des basses couches de l'atmosphère causé par les particules absorbantes est supérieur aux valeurs indiquées par le GIEC pour les gaz à effet de serre. Parallèlement, l'utilisation d'images satellitaires montre que le nombre et la surface des lacs glaciaires a augmenté dans la région du Khumbu (signe de fonte et recul des glaciers) et que les glaciers ont perdu en moyenne $-0.20 \pm 0.11 \text{ m/an}$ (équivalent en eau) entre 2000 et 2011.

Production scientifique et brevets

Marcq S., *et al.*, 2010. Aerosol optical properties and radiative forcing in the high Himalaya based on measurements at the Nepal Climate Observatory-Pyramid site (5079m.a.s.l.). *Atmos. Chem. Phys.*, 10 : 5859–5872.

Gardelle J., *et al.*, 2011. Contrasted evolution of glacial lakes along the Hindu Kush Himalaya mountain range between 1990 and 2009. *Global Planet Change* 75 (1-2).

Gardelle J., *et al.*, 2012. Impact of resolution and radar penetration on glacier elevation changes computed from multi-temporal DEMs. *J. of Glaciology* (in press).

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2007

MOHINI

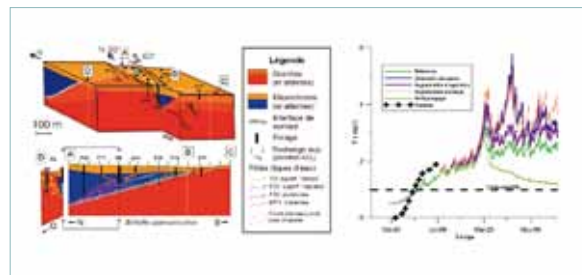
Vulnérabilité des eaux souterraines aux évolutions climatiques et sociétales : le cas des aquifères de socle

Impacts de l'exploitation des aquifères sur la disponibilité et la qualité des eaux souterraines

Longtemps considérées étanches, les roches granitiques et métamorphiques contiennent en fait un réservoir important d'eaux fossiles dans la roche et d'eaux mobiles transitant rapidement par un réseau complexe de zones altérées, fracturées et d'autres types de discontinuités géologiques. Cette nouvelle ressource en eau est particulièrement intéressante en région tempérée comme alternative aux eaux de surface très anthropisées. En régions aride et semi-aride, elle constitue souvent la seule ressource d'eau potable et est largement utilisée pour l'irrigation. Cela concerne la majeure partie de l'Inde et de l'Afrique. C'est une ressource doublement vulnérable : vulnérable aux évolutions des pratiques agricoles et de l'occupation des sols à cause des circulations rapides des eaux mobiles, vulnérable aux changements climatiques à cause des interactions avec les eaux fossiles. Une utilisation trop intensive conduit à une déstabilisation de la qualité chimique de la ressource, à des contaminations chroniques. Le projet MOHINI vise à identifier les processus de recharge, de renouvellement, d'épuration et d'échanges entre compartiments mobiles et fossiles et à établir des prévisions d'évolution sur le moyen terme. Les objectifs sont de contribuer à la gestion durable et à la préservation de la ressource.

Développement de méthodes de mesure et de modélisation des transferts et de la dégradation des contaminants

Le projet s'appuie sur deux sites exploités dans des contextes climatiques et socio-économiques contrastés : la Bretagne menacée par des contaminations en nitrates et l'Inde où l'augmentation des teneurs en fluor engendre des questions de santé publique (i.e. développement de la fluorose). L'utilisation conjointe d'outils hydrogéologiques et géochimiques a montré l'existence d'une forte réactivité chimique et biologique des aquifères aux échelles des puits et des parcelles agricoles. Des études complémentaires en laboratoire caractérisent précisément le rôle des interactions eau-roche dans la mobilisation ou la dégradation des contaminants. Les modèles de site permettent d'intégrer ces processus locaux à l'échelle du bassin versant en prenant en compte les contrôles géologiques et topographiques. En Inde, l'évaluation de la vulnérabilité va jusqu'à la conduite d'exams bucco-dentaires sur les enfants scolarisés. Les modèles de site sont également utilisés pour prédire l'effet de différents scénarii climatiques sur la vulnérabilité et contribuer à la définition de stratégies agricoles et économiques à moyen terme en lien avec les autorités locales (commune de Ploemeur) ou en conformité avec la vision du gouvernement de l'Andhra Pradesh.



A gauche : Schéma des circulations et des échanges chimiques sur le site de Ploemeur déduites du projet MOHINI. A droite : Simulation de l'évolution des teneurs en fluor selon différents scénarii climatiques et d'occupation des sols sur le bassin de Maheswahram (Inde) et évolution du développement de la fluorose parmi la population (croix).

MOHINI « Modélisation intégrée des ressources en eau des aquifères de socle : vulnérabilité aux changements globaux d'origine anthropique » est un projet de recherche fondamentale à vocation finalisée coordonné par le BRGM. Il associe les laboratoires de Géosciences de Rennes et de Montpellier, le LHyGeS (Laboratoire d'Hydrologie et de Géochemie de Strasbourg - ex CGS), la PME ITASCA et le NGRI (National Geophysical Research Institute, India). Le projet a débuté en janvier 2008 pour une durée de 48 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 803 k€ pour un coût global de 1,99 M€.

Résultats majeurs

Le projet MOHINI, mené dans le cadre d'un partenariat public-privé, a montré que les transferts dans les aquifères de socle présentent un fort couplage entre les transferts verticaux rapides à partir de la surface et des circulations horizontales plus classiques. L'impact de l'accroissement de la surface des rizières sur la salinisation et les teneurs en fluor des eaux souterraines ainsi que sur le développement de la fluorose parmi la population ont été mis en évidence sur le site indien. Les études menées en France sur les nitrates montrent néanmoins les capacités d'épuration naturelle du milieu et l'importance des échanges entre les compartiments mobiles et fossiles. Le projet propose également des méthodes pour une gestion durable de l'environnement équilibrant les facteurs de contamination et d'épuration naturelle.

Production scientifique et brevets

Les résultats ont conduit à : 19 publications dans des revues internationales à comité de lecture, la soutenance de 4 thèses, au développement d'un logiciel et la tenue de conférences de vulgarisation. Des débats publics ont été organisés par le projet en France avec les régions municipales, les mairies, les élus et en Inde avec la Banque Mondiale, les agriculteurs et les étudiants. Une collaboration a été établie avec le projet SHIVA (VMCS 2008) sur la vulnérabilité économique des agriculteurs indiens.

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2008

SHIVA

Quelle est la vulnérabilité des agriculteurs indiens aux changements globaux ?

De la définition d'un indicateur adapté de vulnérabilité des agriculteurs à l'estimation des impacts sur l'espace rural

Malgré un climat semi-aride relativement sec, le sud de l'Inde est caractérisé par une irrigation généralisée du riz par inondation. Pour cela, il est fait appel en grande partie aux eaux souterraines stockées dans la partie superficielle des aquifères de socle. La forte pression exercée sur les réservoirs souterrains et la variabilité de l'intensité de la mousson se traduisent par une baisse chronique des niveaux d'eau dans les nappes conduisant à l'abandon de nombreux puits impactant les revenus des agriculteurs et autres usagers de l'eau directement dépendant de cette précieuse ressource. L'objectif du projet SHIVA est d'évaluer la vulnérabilité des usagers de l'eau aux changements globaux et leurs conséquences sur l'espace et l'organisation rurale. Un indicateur permet de quantifier l'état actuel de vulnérabilité de chaque agriculteur. Construit en accord avec la définition du GIEC, il intègre la sensibilité des agriculteurs aux changements, mais aussi leur capacité d'adaptation. 3000 agriculteurs, enquêtés sur 3 sites pilotes de la zone étudiée permettent d'évaluer leur vulnérabilité actuelle, mais aussi de caractériser leurs systèmes de production, de consommation et leurs pratiques d'irrigation. Des travaux de prospectives climatiques et agricoles permettent d'émettre des hypothèses sur les changements climatiques et anthropiques qui sont transcrites de façon à être introduites dans l'indicateur de vulnérabilité future de chaque agriculteur enquêté.

Combinaison de méthodes cartographiques, climatologiques, hydrologiques et économiques

Quatre principaux verrous ont été levés pour aboutir aux résultats attendus. Le premier concerne la régionalisation des modèles globaux de changement climatique. Les observations climatiques passées ont été comparées à cinq modèles de circulation générale sur lesquels a été appliquée une méthode statistique qui reflète les données observées et permet de simuler les précipitations et températures journalières futures, selon le scénario A2 du GIEC. Le second verrou est la simulation des principaux bilans verticaux de recharge et de pompage à l'échelle d'un grand bassin versant pour des années météorologiques contrastées, afin de mesurer la réponse à une perturbation d'ordre climatique ou à un changement des besoins en eau. Le modèle SWAT est utilisé pour simuler les flux d'eau (évapotranspiration, recharge, ruissellement) en fonction des cartes d'occupation du sol et des données météorologiques. Le troisième verrou concerne la détermination précise de l'occupation du sol actuelle et future. Celle-ci a été obtenue par l'interprétation d'images satellitaires pour la situation présente et le générateur d'occupation LANDS-FACTS pour construire les cartes futures, sur la base de scénario de changements économiques. Enfin, le dernier verrou concerne la conception même de l'indicateur de vulnérabilité. La vulnérabilité des individus est décomposée en une suite de facteurs qui sont ensuite agrégés pour composer un indicateur unique et individuel permettant de comparer les agriculteurs entre eux et de les classer du plus au moins vulnérable.



Préparation des rizières sur le bassin versant de Kudaliar, au Nord d'Hyderabad.

SHIVA « Evaluation socio-économique de la vulnérabilité rurale des usagers de l'eau sous l'effet des changements globaux dans la zone de socle du sud de l'Inde » est un projet de recherche fondamentale à vocation finalisée coordonné par le BRGM. Il associe le GET (Géosciences Environnement Toulouse, avec sa cellule à Bangalore), l'IFP (Institut Français de Pondichéry et son Laboratoire de Géomatique), le CSH (Centre des Sciences Humaines de New Delhi) et la PME SIRS (Systèmes d'Information à Référence Spatiale, Lille). Des partenaires indiens en hydrologie (IISc, Indian Institute of Science de Bangalore), en hydrogéologie (NGRI, National Geophysical Research Institute, Hyderabad) et en économie (CESS, Center of Economic and Social Studies, Hyderabad) interviennent en tant que partenaires associés sur des points particuliers de l'étude. Le projet a débuté en janvier 2009 pour une durée de 48 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 787 k€ pour un coût global de 1,58 M€.

Résultats majeurs

Les résultats, obtenus dans le cadre d'un partenariat public-privé, ont permis de mieux connaître à grande échelle les aquifères développés au sein du profil d'altération des roches cristallines. La cartographie géologique de l'épaisseur et de la structure de ces profils permet d'estimer la géométrie des réservoirs et les réserves en eau présentes et futures, ce qui constitue une avancée pour la connaissance et la gestion de ces aquifères. La compréhension des mécanismes de vulnérabilité chez les agriculteurs vient compléter ces avancées dans la mesure où elle permet de mieux cibler les actions à mettre en place pour une gestion plus durable des ressources en eau et de l'agriculture.

Production scientifique et brevets

Outre la réalisation d'une vidéo, citons les publications dans des revues à comité de lecture suivantes :

- Maréchal J.C., *et al.*, 2012. A new method to estimate aquifer thickness using multiple pumping tests. *Hydrogeology J.*, (accepted).
 Aulong S., *et al.*, 2012. Are South Indian farmers adaptable to global change? A case in an Andhra Pradesh catchment basin. *Regional Environ. Change* (in press).
 Vigaud N., *et al.*, 2012. Probabilistic downscaling of GCMs scenarios over southern India. *Int. J. of Climatology* (submitted).
 Perrin J., *et al.*, 2012. Modeling water availability in semi-arid hard-rock regions of southern India. *Agri. Water Manage.*, (submitted).

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2006

RESSAC

Changement global et vulnérabilité d'un affluent du fleuve Niger : état des lieux et perspective

Dynamique globale environnementale, vulnérabilité et estimation à moyen terme de la ressource en eau de surface

D'après le GIEC (2007), « le continent africain serait particulièrement touché par les incidences de l'évolution du climat ». Il est par conséquent nécessaire d'y porter une attention particulière car il ne possède que peu de moyens pour faire face aux changements globaux. Le bassin du Bani (130 000 km²) est le principal affluent du fleuve Niger dans son cours supérieur et se trouve à l'intersection des zones climatiques sahéliennes, plus sèches, et soudanaises, plus humides. C'est une région importante pour le Mali qui fonde son économie principalement sur le développement d'une agriculture pluviale, même si des projets d'hydro-aménagements pourraient augmenter la part de l'agriculture irriguée. L'économie du Pays dépend donc des ressources en eau disponibles qui, ces dernières décennies, ont fortement évolué et qui, à l'avenir, restent très incertaines. L'enjeu du projet RESSAC est de parvenir à améliorer notre aptitude à estimer à moyen terme ces ressources en eau en prenant en compte la dynamique du bassin, dynamique résultant soit de processus naturels, soit de changements anthropiques. Certains aléas touchant le bassin et ses aspects structurels sont analysés et permettent de donner un aperçu de sa vulnérabilité.

Scenarii climatiques et socio-économiques, techniques d'observation de l'environnement et modélisation hydrologique

Pour suivre et évaluer la dynamique spatio-temporelle du bassin versant, le projet a mis en œuvre ou développé les aspects suivants : i) des méthodes de traitement d'images à haute résolution sur des sites-témoins extrapolés à l'ensemble du bassin et permettant un suivi diachronique de l'évolution de l'occupation du sol, ii) des modèles socio-économiques d'évaluation des conséquences d'une pression démographique croissante sur le milieu, iii) des modèles climatiques globaux (GCM) et régionaux (RCM) pour évaluer les tendances climatiques futures et iv) des techniques de désagrégation des signaux globaux des GCMs à des échelles compatibles avec l'observation et la modélisation hydrologique. Ces outils ont permis d'évaluer les ressources en eau à l'avenir du bassin sous les forçages climatique, environnemental et démographique, et d'appréhender sa vulnérabilité en termes de ressources en eau, définie à l'aide de différents indicateurs climatiques et géographiques.



Bassin du Bani : carte d'implantation des intersections entre les bas-fonds (zones potentielles de cultures en bleu-vert) et des marchés de distribution de la production (cercle jaune).

RESSAC « Vulnérabilité des Ressources en Eau Superficielle au Sahel aux évolutions Anthropiques et Climatiques à moyen terme » est un projet de recherche fondamentale coordonné par HSM (HydroSciences Montpellier). Il associe le CRC (Centre de Recherches de Climatologie), les unités du CIRAD G-EAU (Gestion de l'Eau, Acteurs, Usages) et TETIS (Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale) et l'ESO (Espaces et Sociétés de l'Université du Maine). Le projet a débuté en janvier 2007 pour une durée de 54 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 490 k€ pour un coût global de 2,42 M€.

Résultats majeurs

Le projet a mis en évidence la difficulté de travailler dans une région où les données sont rares et leurs tendances futures largement méconnues. Néanmoins, les aspects « aléa » et « structurel » de la vulnérabilité ont été étudiés. Plus précisément, les aléas pris en compte, passés et à venir, ont concerné les ressources en eau mais aussi la pression démographique et l'occupation des sols. Une analyse plus poussée des relations entre les eaux superficielles et souterraines et le perfectionnement des méthodes mises en œuvre permettant d'effectuer des transferts d'échelle d'observation et d'impact de la dynamique du bassin versant figurent parmi les suites envisagées.

Production scientifique et brevets

Vigaud N., Roucou P., Fontaine B., Sijikumar S., Tyteca S., 2009. WRF/ARPEGE-CLIMAT simulated climate trends over West Africa. *Clim. Dyn.*, doi: 10.1007/s00382-009-0707-4.
Roudier P., Mahé G., 2010. Study of water stress and droughts with indicators using daily data on the Bani basin (Mali). *Int. J. Climatol.*, doi: 10.1002/joc.2013.
Ruelland D., Ardoin-Bardin S., Collet L., Roucou P., 2012. Simulating future trends in hydrological regime of a large Sudano-Sahelian catchment under climate change. *J. Hydrol.*, doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.01.002 (in press).

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2006

VULCAIN

Ressource en eau et changement global
en zone méditerranéenneCaractérisation de la vulnérabilité de la
ressource en eau vis-à-vis du changement
global en zone méditerranéenne

La région méditerranéenne, « hot spot » du changement climatique, devra subir une poursuite du réchauffement et une diminution des précipitations. Par ailleurs, le rapide accroissement démographique risque d'aggraver son déficit structurel en termes de ressource en eau. Le projet VULCAIN propose une méthode de comparaison des impacts du changement climatique et socio-économique sur les ressources en eau du département des Pyrénées Orientales. Des scénarii de climat et d'évolution des usages en eau potable et agricole ont été élaborés, leur impact sur les ressources en eau du territoire a été caractérisé et comparé au travers d'un bilan besoins-ressources, en veillant à identifier les sources d'incertitudes. Le travail réalisé montre que la ressource en eau future du territoire étudié devrait diminuer à un niveau que les stratégies d'économie d'eau actuellement envisagées ne permettront pas de compenser et ce, dès le court terme (2030). Les résultats et méthodes obtenus ont été repris dans d'autres projets de recherche, ainsi que dans des études opérationnelles en cours sur la gestion future de l'eau du territoire concerné.

Simulation des besoins et des ressources en
eau et comparaison de l'impact de scénarii
climatiques et socio-économiques

Le cadre climatique actuel a d'abord été décrit au travers d'analyses de détection des non-stationnarités, puis des scénarii climatiques ont été produits à court (2020-40) et à moyen terme (2040-60), à partir des simulations des modèles de climat les plus récents. Des modèles de calcul de la demande en eau pour les usages (eau potable et agricole) ont été conçus pour pallier le manque de données dans ce domaine. Ces modèles ont permis de calculer la demande en eau future associée à plusieurs scénarii socio-économiques construits dans le cadre d'Ateliers de réflexion prospective, auxquels ont été associés les acteurs du territoire concerné. Des modèles hydrologiques et hydrogéologiques permettant de décrire le lien entre climat et ressource en eau ont été alimentés par les scénarii climatiques pour en déduire quel serait l'état futur de la ressource en eau. Un bilan entre les ressources en eau disponibles dans le futur et les besoins actuels (demande en eau potable, agricole, loisirs...) de la société a permis de fixer les enjeux de la vulnérabilité. Enfin, les demandes en eau des scénarii futurs ont été intégrées dans le bilan pour les comparer aux impacts liés au climat.



Le contexte de l'étude : une plaine littorale cultivée contenant un aquifère multicouche et bordée par un massif montagneux enneigé et drainé par trois Fleuves au régime méditerranéen (Photo : I. Terrasson).

VULCAIN « VULnerability of hydrosystems to combined effect of Climate changes and human Activities in mediterranean area » est un projet de recherche fondamentale à vocation finalisée coordonné par le BRGM. Il a associé le Bureau d'études BRL Ingénierie, HSM (HydroSciences Montpellier) et le GAME (Groupe d'Etude de l'Atmosphère Météorologique, Météo-France). Le projet a débuté en janvier 2007 pour une durée de 47 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 409 k€ pour un coût total de 823 k€. Il a été labellisé par le pôle « Risques » PACA-LRO.

Résultats majeurs

Les résultats du projet, mené dans le cadre d'un partenariat public-privé, montrent que la vulnérabilité du territoire étudié face au changement global dépend de manière prépondérante de l'évolution du climat et ce, dès le court terme (2030). En effet, les scénarii construits conduisent à des diminutions de la ressource en eau superficielle bien supérieures aux évolutions de la demande en eau potable et agricole (y compris en intégrant les stratégies d'économie d'eau). Cette situation nécessite de mobiliser fortement le potentiel d'adaptation du territoire (optimisation de la gestion de la ressource, maillage et création de nouvelles ressources). On retiendra que de nombreuses structures de gestion de la Région se sont appropriées la réflexion prospective menée dans le cadre de VULCAIN qui, par ailleurs, a fait l'objet de nombreuses présentations en France et à l'étranger, mais aussi d'actions de vulgarisation (conférences, film : www.youtube.com/watch?v=ZLWAqkCUY_Y).

Production scientifique et brevets

Citons les publications suivantes :

Chaouche *et al.*, 2010. C. R. Geoscience 342 : 234-243.

Rinaudo *et al.*, 2012. Agri. Water Manage., (accepté).

Auxquelles s'ajoutent 5 autres articles en cours de soumission dans des revues internationales à comité de lecture.

Programme « Gestion et Impacts du Changement Climatique », édition 2007

RExHySS

Le changement climatique menace-t-il les ressources en eau dans les bassins de la Seine et de la Somme ?

Ressources en eau et activités humaines

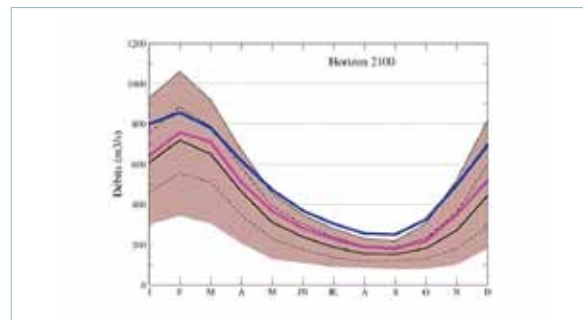
Les ressources en eau exploitables par les sociétés humaines (pour l'eau potable, l'irrigation, et les usages industriels y compris pour le refroidissement) proviennent des cours d'eau et des nappes souterraines. Elles se quantifient en termes de débits des eaux superficielles et des niveaux des nappes. Elles dépendent fortement du climat, d'où la question de leur vulnérabilité au changement climatique qui se développe suite à l'augmentation des gaz à effet de serre (GES). Le projet RExHySS vise à évaluer l'impact de ce changement climatique sur les ressources en eau des bassins de la Seine et de la Somme, dans le Nord de la France, qui sont tous deux soumis à un climat océanique, avec une influence régulatrice des nappes souterraines sur les débits. Les questions posées concernent l'évolution des ressources en eau au 21^{ème} siècle, avec une attention particulière envers les extrêmes hydrologiques (débits de crue et d'étiage, sécheresses). Le projet s'est notamment attaché à analyser l'évolution de certaines manifestations de ces extrêmes particulièrement sensibles pour la société : crues et inondations dans la vallée aval de la Somme ; eaux souterraines, agriculture intensive et irrigation en Beauce.

La modélisation hydrologique et l'analyse des incertitudes associées

Le principe général est d'utiliser le climat futur simulé par un modèle de climat global en fonction d'un scénario d'émissions en GES pour le 21^{ème} siècle, et de le transformer en débits et niveaux des nappes, par l'intermédiaire de modèles hydrologiques de bassin, qui sont d'abord calés pour bien reproduire les observations récentes. Entre ces deux étapes, il est nécessaire de désagréger le climat simulé, pour introduire les hétérogénéités spatiales non résolues à grande échelle, tout en corrigeant les biais les plus pénalisants pour la simulation hydrologique. Le projet a bénéficié de deux méthodes de désagréation récentes (méthodes quantile-quantile et des régimes de temps), qui rendent compte de la variabilité climatique journalière à inter-annuelle et permettent d'aborder les extrêmes hydrologiques, caractérisés par analyse fréquentielle (période de retour notamment). Dans ce cadre, les sources d'incertitude sont nombreuses, et il est important de les analyser pour conclure sur la confiance à accorder aux changements projetés. Pour cela, plusieurs possibilités ont été considérées pour chaque source d'incertitude (scénarii d'émissions, modèles de climat, méthodes de désagréation, modèles hydrologiques), qui ont alors pu être quantifiés par analyse de variance.

Résultats majeurs

La conclusion la plus robuste est un assèchement prononcé des bassins de la Seine et de la Somme au cours du 21^{ème} siècle, avec une baisse du niveau des nappes, des débits moyens et plus encore des débits d'étiage, ce qui pourrait pénaliser l'agriculture irriguée en Beauce. Les débits de crue, par contre, ne changeraient pas significativement. Les principales incertitudes sur ces résultats proviennent des modèles de climat, et plus particulièrement de la simulation des précipitations. La démarche développée par RExHySS dans le cadre d'un partenariat public-privé a été reprise pour des études d'impact hydrologique dans les bassins du Rhin (projet ANR VulNaR), de la Loire (Plan Loire ICC-Hydroqual), de la Durance (Risque, Ressource



Débits mensuels moyens simulés à l'exutoire de la Seine (Poses) à l'horizon 2100. L'enveloppe représente les minima et maxima simulés par 5 modèles hydrologiques sur un ensemble de 12 scénarios climatiques désagréés. Les traits noirs (pleins et pointillés) donnent la moyenne de l'ensemble +/- un écart-type. Les courbes bleues et roses représentent les moyennes des simulations au temps présent et en 2050, respectivement qui montrent la diminution des débits projetée au cours du 21^{ème} siècle.

RExHySS « Impact du changement climatique sur les Ressources en Eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme » est un projet de recherche fondamentale à vocation finalisée coordonné par le Laboratoire Sisyphe (Structure et fonctionnement des hydrosystèmes continents). Il associe le CERFACS (Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique), le Laboratoire GAME (Groupe d'étude de l'Atmosphère Météorologique, Météo-France), le Centre de Géosciences/Amines, l'Unité Hydrologie-Hydraulique de l'IRSTEA (Institut de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture /Lyon), le BRGM- Eau/Orléans, l'INRA (Environnement et Grande Cultures, Grignon) et deux bureaux d'étude (Hydratec et SOGREAH). Le projet a débuté en mars 2007 pour une durée de 30 mois. Il a bénéficié d'un financement du GICC de 254 k€ pour un coût global de 560 k€.

en eau et gestion Durable, GICC R²D²-2050), ainsi pour l'étude Explore 2070 du Ministère de l'Ecologie visant à proposer des stratégies d'adaptation au changement climatique pour les secteurs liés à l'eau à l'échelle de la France entière.

Production scientifique et brevets

Boé J., Terray L., Martin E., Habets F., 2009. Projected changes in components of the hydrological cycle in French river basins during the 21st century. 45, W08426.

Ducharne A., et l'équipe RExHySS, 2010. Impact du changement climatique sur les ressources en eau et les extrêmes hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme. In "Ecosystèmes et événements extrêmes", Ed: H. Décamps. Rapport sur la Science et la technologie N°29, Académie des Sciences.

Ducharne A., Sauquet E., Habets F., Déqué M., Gascoin S., Hachour A., Martin E., Oudin L., Pagé C., Terray L., Thiéry D., Viennot P., 2011. Evolution potentielle du régime des crues de la Seine sous changement climatique. La Houille Blanche, N°1 : 51-57.

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2007

VULNAR

Effets du changement climatique sur l'hydrologie du Bassin du Rhin Supérieur

Modéliser et quantifier les effets du changement climatique sur les cours d'eau et la nappe du fossé Rhénan

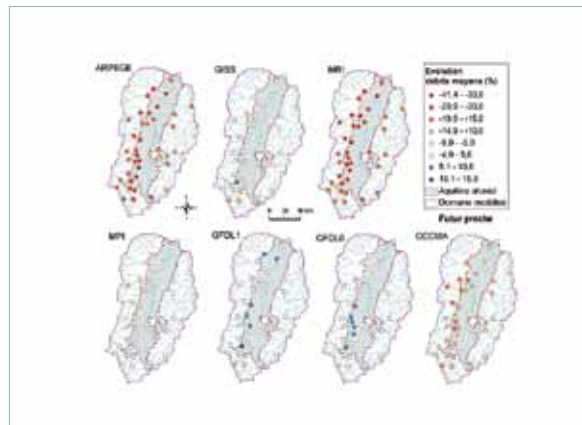
La nappe phréatique du Rhin supérieur est très vulnérable du fait de l'absence de protection naturelle, de sa proximité avec la surface du sol et des échanges importants entre eaux de surface et eaux souterraines. Ces caractéristiques laissent supposer que le changement climatique, additionné à la pression due aux activités humaines, pourrait engendrer des modifications significatives de la dynamique du cycle de l'eau à l'échelle du Bassin du Rhin Supérieur. Le projet VulNaR a pour objectifs : i) de parfaire les connaissances encore insuffisantes sur les relations entre l'eau de surface et l'eau souterraine (infiltrations, drainages), ii) d'évaluer les incertitudes liées à la paramétrisation des modèles et des projections climatiques et iii) de prédire les effets du changement climatique sur la ressource en eau (dynamique, stock) en y associant une évaluation des incertitudes de modélisation. Les méthodes développées et les modèles mis au point pourraient devenir à terme de véritables outils de gestion des ressources en eau et d'évaluation des impacts du changement climatique.

Modélisation multi-échelle de l'hydrologie dans le bassin du Rhin Supérieur

Le projet contribue à améliorer nos connaissances sur le couplage entre les modèles hydrogéologiques, qui décrivent la dynamique des eaux souterraines, et les modèles hydrométéorologiques. Le modèle Safran-Isba-Modcou, déjà exploité sur une grande partie de la France par Météo-France pour estimer la ressource en eau sur les bassins versants des fleuves français, a été amélioré pour prendre en compte la faible profondeur de la nappe du Rhin, les interactions très fortes entre les eaux de surface et souterraines et la présence de grandes zones humides. Une modélisation complémentaire, couplée à une procédure automatique de calage, a été réalisée sur la nappe du Rhin Supérieur. L'utilisation de ces deux types de modélisation a permis de définir plusieurs jeux de paramètres après calage des modèles sur une période de référence (1986-2001). Différents scénarii d'émission de gaz à effet de serre, d'aérosols et de projections climatiques (cf CMIP3 et 4^{ème} rapport du GIEC) ont été retenus pour évaluer l'impact de ces changements climatiques pendant la période 2000-2100. L'ensemble des jeux de données issus du calage a été utilisé pour évaluer les incertitudes sur les projections hydrologiques.

Résultats majeurs

Le projet a confirmé le rôle prépondérant de l'infiltration des rivières sur la recharge de la nappe et il a permis d'estimer l'impact du changement climatique : les débits des hautes eaux seront plus élevés du fait des variations des précipitations et de la fonte du manteau neigeux et les débits d'étiage seront plus faibles avec une infiltration toujours conséquente vers la nappe, dont le niveau ne devrait varier sensiblement que dans la partie Sud. Si ces impacts sont démontrés pour presque tous les scénarii, ils sont difficilement quantifiables, compte tenu des incertitudes liées aux modèles et aux paramètres estimés par calage.



Impacts du changement climatique sur les débits annuels estimés à partir de 7 projections climatiques sous scénario d'émission A1B du GIEC, à l'horizon 2050.

VULNAR « La nappe du Rhin Supérieur : effets des changements climatiques sur sa dynamique et sa vulnérabilité » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LHyGeS (Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie de Strasbourg). Il associe le Centre de Géosciences de l'Ecole des Mines de Paris, le GAME (Groupe d'étude de l'Atmosphère Météorologique, Météo-France) et Sisyphe (Structure et fonctionnement des systèmes hydriques continentaux). Le projet a débuté en janvier 2008 pour une durée de 48 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 412 k€ pour un coût global de 1,3 M€.

Production scientifique et brevets

Majdalani S., Ackerer P., 2011. Identification of groundwater parameters using an adaptive multiscale method. *Groundwater*, doi: 10.1111/j.1745-6584.2010.00750.

Thierion C., Longuevergne L., Habets F., Ledoux E., Ackerer P., Majdalani S., Leblois E., Lecluse S., Martin E., Queguiner S., Viennot P., 2012. Modeling the Upper Rhine Graben hydrosystem: a parameter sensitivity analysis. *J. of Hydrol.*, (in press).

David C., Habets F., Maidment D.R., Yang E.L., 2011. Rapid applied to the SIM-France model. *Hydrol. Process.*, 25 :3412-3425, doi: 10.1002/hyp.8070.

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2008

RIWER2030

Gestion de la ressource en eau : durabilité et incertitudes liées aux projections futures du climat

Evaluer la durabilité des systèmes de gestion de la ressource en eau en tenant compte des incertitudes sur les projections hydroclimatiques

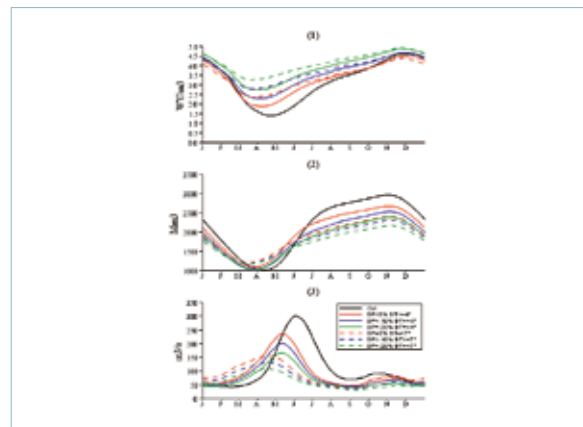
Penser l'adaptation ou rechercher des stratégies de gestion optimales et durables de la ressource en eau, tels que sont les grands ouvrages hydrauliques, nécessite d'évaluer leur performance dans un contexte de climat modifié. Le projet porte sur l'élaboration d'un cadre méthodologique permettant : i) de générer des scénarii hydro-météorologiques correspondant aux scénarii d'émissions et simulations climatiques, ii) d'identifier et d'évaluer les fragilités des systèmes de gestion actuelle, iii) de proposer des pistes d'adaptation et de caractériser la sensibilité et la vulnérabilité de l'anthroposystème aux changements prévus. Le développement et l'évaluation de différents modèles de la chaîne d'analyse qui sont pilotés par les contraintes liées à l'analyse d'impact constituent une originalité importante de RIWER2030. Une autre originalité est la méthodologie mise en place pour réduire et propager les incertitudes associées à la génération des scénarii hydrométéorologiques. Les travaux, réalisés dans le cadre d'un partenariat public-privé, portent sur le bassin amont de la Durance comprenant le barrage de Serre-Ponçon et le bassin de la Loire à l'amont de Gien.

Simulations hydrométéorologiques d'ensemble et optimisation stochastique de la gestion des réservoirs hydrauliques

La durabilité des anthroposystèmes est évaluée en comparant, pour les périodes actuelles et futures, la performance d'une stratégie de gestion dite « optimale » résultant de l'identification des périodes et des usages auxquels il est le plus intéressant d'allouer une part de la ressource disponible. Pour se rapprocher des conditions réelles rencontrées en opérationnel par le gestionnaire, la stratégie de placement de l'eau est définie en conditions d'avenir incertain par l'utilisation d'une programmation dynamique stochastique de façon à rendre compte d'objectifs de gestion hiérarchisés. Les incertitudes liées à ces évaluations sont quantifiées au travers d'un ensemble de projections hydroclimatiques obtenues pour différents modèles, différentes paramétrisations ou différentes expériences d'un même modèle. Les sources d'incertitude sont liées aux modèles climatiques, aux modèles de descente d'échelle statistiques (MDES) mis en oeuvre pour générer des scénarii météorologiques sur la base de prédictors atmosphériques de grande échelle et aux modèles hydrologiques utilisés.

Résultats majeurs

Un cadre d'évaluation probabiliste « orienté impact » a été développé pour évaluer trois MDES, notamment leur transposition en climat modifié. Un ensemble de scénarii a été produit pour plusieurs versions de ces modèles sur la base des sorties de 12 modèles climatiques disponibles pour la période 1860-2100. Il apparaît que la contribution des MDES à l'incertitude globale sur les changements hydrométéorologiques estimés entre la période actuelle et les différentes pé-



Régimes hydrologiques actuels et futurs du bassin supérieur de la Durance (débits, m³/s) sous divers scénarii simplifiés de changement de précipitation (DP, %) et de température (DT, °C), figure du bas. Trajectoires optimisées du remplissage de la retenue de Serre-Ponçon (M³) pour ces apports et une demande hydroélectrique fixée, figure du milieu. Valeurs correspondantes de l'eau de stockage (rapport entre les gains réalisables pour une utilisation future ou immédiate d'un m³ d'eau stocké) pour un niveau de remplissage moyen de la retenue, figure du haut.

RIWER2030 « Regional Climate, Water, Energy Resources and uncertainties from 1960 to 2030 » est un projet de recherche fondamentale à vocation finalisée coordonné par le LTHE (Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement). Il associe le LNHE (Laboratoire National d'Hydraulique et d'Environnement) et la DTG (Division Technique Générale, EDF). Le projet a débuté en janvier 2009 pour une durée de 48 mois. Il bénéficie d'un financement de l'ANR de 371 k€ pour un coût global de 1,1 M€.

riodes futures s'avère non négligeable devant celle que proposent les modèles de climat. Par ailleurs, la variabilité intrinsèque des modèles climatiques, de même que la composante stochastique de la génération associée aux MDES nécessite d'être prise en compte dans les évaluations d'impact en climat futur.

Production scientifique et brevets

Bourqui M., *et al.*, 2011. Hydrological validation of statistical downscaling methods applied to climate model projections. In « Hydroclimatology: Variability and Change », IAHS Publ., 344: 32-38.
Lafaysse M., *et al.*, 2011. Influence of spatial discretization, underground water storage and glacier melt on a physically-based hydrological model of the Upper Durance River basin. J. of Hydrol., 403: 116 - 129.
Mezghani A., Hingray B., 2009. A combined downscaling-disaggregation weather generator for stochastic generation of multisite hourly weather variables in complex terrain: development and multi-scale validation for the Upper Rhône River Basin. J. of Hydrol., 377 (3-4) : 245-260.

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2007

AVUPUR

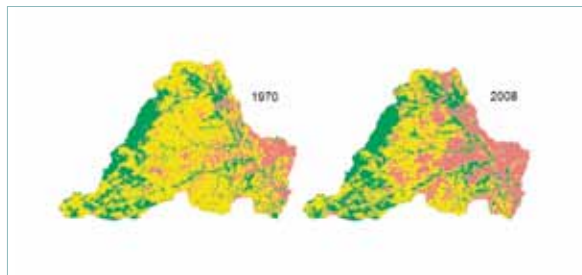
Impact de l'urbanisation sur l'hydrologie et la géomorphologie des rivières périurbaines

L'eau dans les bassins versants périurbains : des cheminements complexes dans un milieu fortement anthropisé

L'augmentation de la population mondiale affecte en particulier les zones périurbaines, périphériques aux grandes villes. Ceci conduit à une augmentation des surfaces imperméabilisées et à une complexification des espaces, via la construction de réseaux (routes, fossés, réseaux d'eau potable ou d'assainissement). Ces évolutions impactent le cycle de l'eau et les écosystèmes aquatiques via une augmentation et une accélération des ruissellements rapides, une diminution de la recharge des nappes, une modification des chemins naturels de l'eau de pluie par les réseaux artificiels et un changement des apports sédimentaires aux cours d'eau. Ceci peut conduire à des problèmes d'inondations, de pollution et d'érosion du lit des rivières périurbaines, pour lesquels des solutions correctives doivent être proposées en lien avec la Directive Cadre sur l'Eau. Les bassins périurbains sont des milieux complexes, du fait de la juxtaposition de zones rurales naturelles ou agricoles, de zones urbaines artificialisées et de la multiplicité des réseaux. Le projet AVUPUR avait pour objectif de produire des connaissances et des outils de simulation sur l'hydrologie des bassins versants périurbains, tout en dégageant des éléments d'aide à la décision pour les gestionnaires de ces bassins.

Mieux comprendre l'hydrologie des bassins périurbains : intérêt d'une approche combinant analyse de données et modélisation

Le projet s'est appuyé sur deux bassins versants appartenant à des Observatoires de long terme : l'Yzeron (150 km², région lyonnaise) et la Chézine (34 km², banlieue de Nantes). Pour comprendre les systèmes étudiés, nous avons : i) collecté et analysé les données géographiques et hydrologiques existantes, ii) mis en place des expérimentations pour documenter la réponse hydrologique des bassins et iii) développé et comparé différentes méthodes de cartographie de l'occupation des sols pour quantifier leur imperméabilisation et la végétation. Le projet a également développé des outils de simulation du cycle hydrologique dans ces bassins. A fine échelle, des modèles originaux décrivant les différents objets du paysage ont été proposés pour comprendre et hiérarchiser les objets et processus importants. Pour les bassins plus grands, nous avons adapté des modèles existants. Ils ont été évalués à l'aide d'indicateurs dérivés de l'analyse des données, qui permettent aussi de quantifier la vulnérabilité des bassins à l'urbanisation. Un Atelier de prospective territoriale a permis d'identifier les évolutions possibles de l'occupation des sols de l'Yzeron en 2030. Les scénarii produits ont été introduits dans les modèles hydrologiques pour quantifier l'impact possible sur l'hydrologie et le risque d'incision.



Cartographie de l'occupation des sols de l'Yzeron en 3 classes (rose : artificialisé ; jaune : agricole ; vert : forêt) pour les années 1970 et 2008. L'urbanisation progresse de l'aval vers l'amont et l'artificialisation passe de 21 % de la surface totale en 1970 à 38 % en 2008 (EVS, 2010).

AVUPUR « Assessing the Vulnerability of Peri-Urban Rivers » est un projet de recherche fondamentale à vocation finalisée coordonné l'IRSTEA (Institut de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture, Lyon). Il associe EVS (Environnement Ville et Société), l'IRSTV (Institut de Recherche des Sciences et Techniques de la Ville), l'Ecole d'ingénieurs ISARA de Lyon et les entreprises HYDROWIDE et INSAVALOR. Le projet a débuté en janvier 2008 pour une durée de 42 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 659 k€ pour un coût global de 2,8 M€.

Résultats majeurs

Le projet, mené dans le cadre d'un partenariat public-privé, a permis la constitution de bases de données originales et très complètes sur les bassins pilotes qui ont été exploitées pour proposer des indicateurs permettant de caractériser l'impact de l'urbanisation sur l'hydrologie des bassins périurbains et leur vulnérabilité. Le projet AVUPUR a aussi permis de progresser sur la conception de modèles hydrologiques adaptés à la complexité des bassins périurbains. L'apport de la cartographie détaillée de l'occupation des sols tant pour les besoins de la modélisation hydrologique que pour la prospective territoriale a enfin été illustré.

Production scientifique et brevets

Parmi la douzaine de publications dans des revues internationales, la présentation de 80 communications internationales et nationales à divers congrès et l'élaboration du logiciel TANATO2 sous licence GPL3, mentionnons en particulier l'édition d'un numéro spécial de J. of Hydrol. sur « L'hydrologie des bassins périurbains » en cours de réalisation, et une conférence de restitution des résultats du projet à destination des acteurs du monde de l'eau intitulée : Impacts de l'urbanisation sur les rivières péri-urbaines - Compréhension et modélisation des phénomènes hydro- géomorphologiques (1ère Conférence thématique de l'OTHU- Lyon) avec publication des actes et la production de 5 fiches techniques à destination des gestionnaires.

Programme « Changements Environnementaux Planétaires », édition 2009

WETCHANGE

Impact du changement global sur le fonctionnement des zones humides alluviales

Impact des plaines alluviales humides sur leur fonctionnement et leur biodiversité

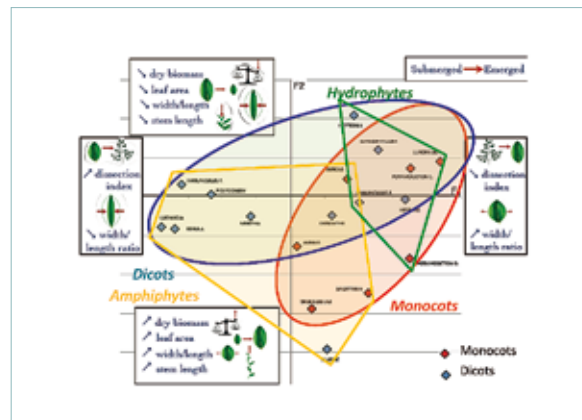
Les fonctions des Zones Humides (ZHs) sont cruciales pour les populations humaines et la biodiversité. Le changement global affectant les ressources en eau de surface et souterraine aura un impact considérable sur les ZHs alluviales, qui sont essentielles pour le bon fonctionnement des cours d'eau. L'objectif du projet WETCHANGE est de mesurer à l'échelle de deux tronçons de cours d'eau contrastés (Rhône, Ain) la réponse écologique et la vulnérabilité de différents types de zones humides aux assèchements. Le projet repose sur : i) la construction d'un scénario hydroclimatique de l'impact du changement global sur la recharge hydrique des cours d'eau, puis d'un modèle hydrogéologique du système alluvial nappe-rivière, fournissant le régime d'exondation des ZHs, ii) des mesures *in situ* et des expérimentations en laboratoire des réponses physiques, chimiques et biologiques aux assèchements et iii) la construction d'une base de connaissance des scénarii de réponses des ZHs en fonction de leurs caractéristiques fonctionnelles, permettant d'orienter les politiques de gestion de la ressource en eau pour les rendre compatibles avec la conservation des zones humides.

Modélisation hydrogéologique et réponses fonctionnelles mesurées pour un scénario climatique à 20 ans et construction d'une typologie des vulnérabilités

La modélisation des relations eaux de surface-eaux souterraines des tronçons de rivières repose sur les chroniques pluviométriques et débitométriques et sur les scénarii du GIEC. La maille de 8 km rend nécessaire un changement d'échelle par désagrégation statistique, afin d'obtenir une résolution adaptée aux ZHs (la dizaine de m). Les changements végétaux et animaux mesurés depuis 30 ans sont confrontés aux changements hydrologiques passés, ce qui permet de prévoir les réponses futures de ces écosystèmes. Pour produire des résultats plus généralisables, on procède à des mesures en laboratoire et *in situ* des réponses des habitats (vitesse de dessèchement et changements physico-chimiques des sols), des espèces (plantes, invertébrés aquatiques) et des fonctions microbiennes (nitrification, dénitrification), pendant la mise en place de l'assèchement, et après le retour des eaux. La combinaison de ces connaissances a pour objectif de produire une classification des réponses aux assèchements des écosystèmes en termes de biodiversité et de fonctionnement, afin de considérer les plus menacés à l'échéance de 20 ans par les modifications hydrologiques liées au changement global.

Résultats majeurs

Les outils développés seront immédiatement valorisables dans le cadre de la DCE (Directive Cadre sur l'Eau), pour aider à la gestion cohérente des ressources en eau des vallées alluviales. Les acteurs du consortium sont pour cela en relation permanente avec les structures régionales de gestion de la biodiversité et des ressources en eau (Conservatoires, Agence de l'Eau, DREAL). Les résultats sont également diffusés à l'échelon national par la ZABR (Zone Atelier du Bassin du Rhône), et devraient bénéficier de l'aide du Pôle « Mares,



Comparaison des formes exondées et inondées des espèces végétales symbolisées par des points et placées à proximité lorsqu'elles montrent des réponses à l'exondation analogues. Les hydrophytes (entourées en vert) qui sont des espèces associées aux eaux permanentes, montrent une faible capacité de variation morphologique (les feuilles sont moins découpées et plus larges). Les réponses sont peu spécifiques de l'appartenance phylogénétique, comme le montre la superposition partielle des deux nuages rouges (monocots) et bleus (dicots et eudicots).

WETCHANGE « Biodiversité et fonctions des zones humides en réponse aux étages sévères » est un projet de recherche fondamentale à vocation finalisée coordonné par le LEHNA (Laboratoire des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés, Lyon). Il associe l'ENMSE (Ecole Nationale supérieure des Mines de Saint-Etienne) et l'IRSTEA (Institut de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture, Milieux aquatiques, écologie et pollutions). Le projet a débuté en mars 2010 pour une durée de 36 mois. Il bénéficie d'un financement de l'ANR de 693 k€ pour un coût global de 1,23 M€.

Zones Humides intérieures, Vallées Alluviales ». Outre les publications scientifiques, le transfert se fera au travers de guides techniques, et d'Ateliers auxquels seront conviés les gestionnaires.

Production scientifique et brevets

Citons notamment :

- Maazouzi C., *et al.*, 2011. Ecophysiological responses to temperature of the "killer shrimp": *Dikerogammarus villosus*: is the invader really stronger than the native *Gammarus pulex* ? Comparative Biochem. and Physiol., A- Molecular and Integrative Physiology 159 : 268-274.
- Arthaud F., *et al.*, 2012. Disturbances control plant species richness along productivity and dispersal gradients in shallow lakes. J. of Vegetation Sci. (accepted).
- Arthaud F., *et al.*, 2012. Eutrophication and drought disturbance shape functional diversity and life-history traits of aquatic plants in shallow lakes. Aquatic Sci. (in press).
- Cottin D., *et al.*, 2012. Disentangling the effect of regional and local conditions in the thermal tolerance of freshwater crustaceans. Naturwissenschaften (in press).

Programme « Gestion et Impacts du Changement Climatique », édition 2005

GICC

Changement global et espèces piscicoles
dans les cours d'eauEvaluer les implications multiples du
réchauffement sur la répartition et la
dynamique des populations de poissons

Les conséquences des changements climatiques sont susceptibles d'affecter de façon significative la plupart des écosystèmes tant du point de vue de leur fonctionnement que de la biodiversité qu'ils abritent. L'un des défis majeurs auxquels sont confrontés les écologues est leur capacité à prédire les impacts potentiels futurs sur les populations et les communautés aquatiques, alors que les cours d'eau sont déjà fortement altérés. De par leur sensibilité à la température (poikilothermie), les populations piscicoles seront fortement affectées. Le projet vise à étudier les capacités de réponses de deux espèces au réchauffement : le saumon pour son caractère emblématique et les projets de restauration déjà engagés, et le chabot pour sa capacité à jouer un rôle d'espèce sentinelle d'état de la biodiversité dans les têtes de bassins. L'une des originalités du projet a été de chercher à marier des approches à large échelle (aires de distribution en France, communautés de poissons en Afrique de l'Ouest), de développer des modèles de dynamique de population intégrant le facteur thermique, et des études éco-physiologiques et comportementales concernant la reproduction.

Suivis long-terme, expérimentations
et modélisations

A l'échelle de l'Europe et des bassins hydrographiques, la constitution d'une base de données de la répartition historique du saumon (19^{ème} siècle) a permis de prédire par des modèles statistiques les évolutions potentielles de l'aire de distribution de cette espèce selon différents scénarios climatiques. Dans le massif armoricain, l'influence de la variabilité climatique sur la dynamique des populations locales a été analysée par des échantillonnages réguliers de 23 cours d'eau depuis les années 70. L'influence possible de l'eutrophisation des cours d'eau sur les évolutions observées est également abordée par des méthodes isotopiques. Pour le chabot, le suivi des populations du bassin du Bez (Drôme, 2001-2008) est à la base de la construction d'un modèle original de croissance (relation taille-âge) intégrant l'effet de la température. A partir de l'ensemble des informations biologiques collectées (traits de vie), un premier modèle stochastique individu-centré rend compte de l'influence du climat sur l'évolution à long terme de cette population tout en considérant les variabilités spatiales et individuelles. La capacité des deux espèces à se reproduire a été testée expérimentalement tant au niveau du maintien des comportements associés à l'accouplement (saumon) que de la viabilité des œufs produits (saumon, chabot).

Résultats majeurs

Les populations de chabot et de saumon situées à la lisière sud de leurs aires de distribution seront particulièrement sensibles. Pour le saumon, les différents scénarii climatiques testés rendent compte d'une plus ou moins forte contraction de leur répartition autour des Iles Britanniques. Pour les deux espèces, le réchauffement modifie profondément la croissance des individus, l'âge à la reproduction



Evolution potentielle de l'aire de distribution du saumon entre 1900 (aire historique) et 2100 selon le scénario climatique A2.
Jaune : bassins non colonisés. Rouge : disparition de l'espèce en 2100.
Bleu : maintien de l'espèce en 2100.

« **Changement global et stratégies démographiques des populations piscicoles** » est un projet de recherche finalisée coordonné par IRSTEA (Institut de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture). Il a associé les Unités EPBX et HYAX de IRSTEA, le LBBE (Laboratoire de Biométrie et de Biologie Evolutive, Lyon 1-CNRS), l'INRA (AgroCampus, Rennes 1 et l'Unité ECOBIOP/ Ecologie Comportementale et Biologie des Populations), l'IRD, le MNHN et le Laboratoire BOREA (Biologie des Organismes et Ecosystèmes Aquatiques/UPMC). Le projet a débuté en juillet 2007 pour une durée de 30 mois. Il a bénéficié d'un financement du GICC de 221 k€ pour un coût total de 526 k€.

(saumon, chabot) et l'âge à la migration (saumon). Un premier modèle d'aide à la décision pour la gestion des populations de saumon a été développé pour évaluer leur évolution démographique selon différents scénarii de changements climatiques et différentes pressions d'exploitation.

Production scientifique et brevets

Charles S., et al., 2008. An individual-based model to describe a bullhead population dynamic including temperature variations. *Ecological Modelling*: 215:377-392.
Lassalle G., Rochard E., 2009. Impact of twenty-first century climate change on diadromous fish spread over Europe, North Africa and the Middle East. *Global Change Biology*: 15, 1072-1089.
Rivot E., et al., 2009. Climate change may have affected growth and life history of Atlantic salmon juveniles over the past 30 years. *American Fisheries Society Symposium*: 69: 855-857.
Reyjols Y., et al., 2009. Effects of temperature on biological and biochemical indicators of the life-history strategy of bullhead (*Cottus gobio* L.). *J. of Fish Biology*: 75: 1427-1445.

8

LA VULNÉRABILITÉ DES HYDROSYSTÈMES CONTINENTAUX : LE CAS DES RES- SOURCES EN SOL ET DE LEUR ÉVOLUTION FACE AUX CHANGEMENTS GLOBAUX

LES PRINCIPALES AVANCÉES

Les projets de recherche au caractère fondamental ou finalisé s'inscrivent dans les enjeux et les objectifs mentionnés dans la partie II. Les études sont menées par les voies de l'observation *in situ*, de l'expérimentation fine de laboratoire et de la modélisation des processus physiques, chimiques et biologiques. Des méthodes originales de cartographie de la vulnérabilité des sols aux changements globaux, notamment liée à l'érosion, sont développées. Les terrains expérimentaux sont aussi bien nationaux que situés à l'étranger, dans le cadre soit d'un partenariat public-privé, soit de collaborations bilatérales. Plusieurs de ces projets s'appuient sur les sites des ZA ou des SO / SOERE.

Améliorer la connaissance sur les mécanismes d'évolution de la ressource sol

Les mécanismes d'intérêt sont nombreux et divers. On constate une part significative de travaux sur les aspects biologiques, ce qui illustre la prise de conscience actuelle de l'importance de ces mécanismes dans le fonctionnement des sols. C'est ainsi qu'ont été

abordées plusieurs questions spécifiques. Elles portent sur : i) la diversité des communautés microbiennes du sol en regard de la typologie des sols et des contraintes environnementales, ii) la dynamique des croûtes biologiques de surface des sols en milieu sahélien, issues de la colonisation de croûtes physiques par les cyanobactéries et qui sont des indicateurs d'altération des écosystèmes et iii) les processus de stockage du carbone dont la connaissance est essentielle pour pouvoir prédire l'évolution de la séquestration du carbone dans les sols et ainsi son rôle dans la régulation du cycle du CO₂ et de l'effet de serre.

Les résultats acquis sont en premier lieu la constitution de bases de données originales relatives à la variabilité des caractéristiques biologiques des sols (diversité génétique microbienne, diversité des croûtes biologiques) sur des gradients climatiques et environnementaux, et l'analyse des facteurs des diversités observées. Ils portent ensuite sur la compréhension de plusieurs mécanismes, dont i) l'effet des alternances saison des pluies / saison sèche sur la structuration des communautés microbiennes, ii) la capacité d'adaptation aux stress hydriques et salins de rhizobium (bactéries inoculables à certaines cultures pour accroître et stabiliser le rendement) et iii) l'identification de dynamiques spécifiques de transformation des matières organiques du sol à l'échelle moléculaire qui montrent que le retour apparent à l'équilibre du stock organique global des sols après 30 ans d'afforestation recouvre une réalité bien plus complexe au niveau des molécules composant ce stock.

Par ailleurs, plusieurs projets concernent l'analyse des mécanismes d'érosion. Il s'agit d'une thématique plus classique mais dont

l'intérêt reste prégnant car l'érosion est un des processus de dégradation de la ressource en sol les plus étendus et reconnus à travers le monde et pour lequel les méthodes de diagnostic et de protection sont fortement demandées.

Les projets ont abordé différentes échelles d'analyse depuis de grands systèmes morpho-climatiques comme l'Himalaya et la plaine du Gange ou l'espace méditerranéen jusqu'à des bassins versants de petite ou moyenne extension.

Ils ont été l'occasion d'avancées méthodologiques portant sur l'acquisition de données haute-fréquence des flux érosifs, sur la datation de l'érosion hydrique et aratoire par l'analyse isotopique des sédiments et la luminescence stimulée optiquement, sur le traçage de l'origine des sédiments des bassins versants.

Les bases de données qui en résultent ainsi que le développement conjoint de modèles permettent des analyses rétrospective et prospective de l'érosion. Il apparaît ainsi que sur des échelles de temps longues (20 000 ans), l'érosion himalayenne est dominée par les matériaux issus de glissements de terrain. A l'échelle centennale, c'est l'influence de la structure du paysage sur l'évolution des sols par érosion qui est mise en évidence. Et à l'échelle saisonnière, il est observé que le transport de sédiments est contrôlé par la fonte des neiges ou l'occurrence d'orages selon les environnements étudiés.

Enfin, un projet a abordé l'évolution à long terme des propriétés des argiles compactées afin d'évaluer la capacité d'emploi de ce matériau pour imperméabiliser des sites de stockage de déchets ménagers ou industriels. Il ne s'agit plus là d'étudier les mécanismes

relatifs au fonctionnement et à la préservation de la ressource en sol, mais d'exploiter la fonction du sol et du sous-sol comme source de matériau pour une gestion des pollutions liées aux déchets issus des activités anthropiques. Les résultats montrent une très bonne durabilité de l'étanchéité des argiles purifiées testées vis-à-vis de lixiviats fortement chargés en polluants métalliques. Elles pourraient être utilisées comme géo-membranes avec des épaisseurs de quelques mm en remplacement des matériaux actuels mis en place sur des épaisseurs de l'ordre du mètre.

Déterminer les impacts subis par le sol du fait des changements globaux

Au-delà de l'analyse de mécanismes, les projets ont permis d'évaluer certains impacts des changements globaux sur la ressource en sol à différentes échelles de temps et d'espace, et d'identifier leurs origines spécifiques, notamment entre les changements liés à l'évolution de l'occupation du sol et ceux liés au changement climatique.

On a pu voir ainsi dans la section précédente, l'influence des gradients climatiques sur les communautés microbiennes et les croûtes biologiques du sol dans les milieux sahéliens. Les changements climatiques sont donc susceptibles d'avoir des effets significatifs sur les propriétés biologiques des sols, notamment au niveau microbien. L'influence réciproque des pratiques d'entretien des sols n'a toutefois pas été clairement identifiée par les projets bien qu'ils aient conduits des enquêtes auprès des utilisateurs agricoles et pastoraux des sols.

Pour les impacts physiques, en particulier ceux concernant l'érosion, les pertes

en terres et le transport de sédiments, les résultats acquis indiquent assez nettement l'influence prédominante de l'occupation du sol si on analyse le phénomène érosif sur le siècle passé ou à venir. Ainsi, sur la zone méditerranéenne, la gestion d'une couverture végétale continue dans l'espace et dans le temps apparaît comme un levier déterminant contre la dégradation des sols.

De manière générale, les travaux menés suggèrent que les stratégies de gestion des paysages et des sols peuvent améliorer la résilience de la ressource sol vis-à-vis des changements climatiques et anthropiques.

Développer les méthodologies d'observation et de cartographie des sols

La connaissance de la diversité des sols et de leurs propriétés reste très insuffisante au plan mondial tant en termes d'extension spatiale des cartographies disponibles que de leur résolution spatiale et de la précision de la description des sols. Or cette connaissance est indispensable pour une meilleure compréhension de la diversité des mécanismes affectant le fonctionnement des sols et pour assister les décisions en matière de gestion des sols et de ses fonctions. Il s'agit là d'un verrou scientifique de premier ordre en ce qui concerne l'étude des sols et de leur vulnérabilité.

Plusieurs projets développent de nouvelles méthodes d'observation du sol et de ses propriétés afin d'obtenir des caractérisations plus complètes, avec de meilleures résolutions spatiales et autorisant des couvertures sur de grandes surfaces à coût réduit.

L'une des méthodologies développées a porté sur la cartographie de la vulnérabilité des

sols à l'érosion. Elle repose sur la construction d'une base de données exhaustive des facteurs de l'érosion et fait l'objet d'une application à l'échelle de l'ensemble du bassin méditerranéen.

Une autre méthodologie mise en oeuvre repose sur le recours à l'imagerie hyperspectrale Visible-Proche Infrarouge, supposée fournir une estimation directe des propriétés des sols de surface et dont l'offre devrait croître significativement dans un futur proche, grâce au lancement de nouveaux satellites. Son test en vraie grandeur à partir de mesures aéroportées montre que la cartographie numérique à des résolutions très fines de certaines des propriétés usuelles des sols (granulométrie, pH, teneurs en éléments) devient possible. Elle fera sans doute partie d'une des méthodes majeures de l'initiative de cartographie numérique des sols au plan mondial, le programme international GlobalSoilMap.net.

Enfin, l'interférométrie radar et l'imagerie satellitaire ont permis la mesure et la modélisation hydro-géo-mécanique des faibles mouvements du sol induits par les fluctuations des niveaux piézométriques, en relation avec le PPRI parisien.

A côté de ces développements en matière d'imagerie et de cartographie des sols, une nouvelle méthode d'investigation sismo-électrique a été développée pour détecter la nature et la répartition des fluides dans le domaine souterrain à partir de la mesure des signaux électro-magnétiques créés par les mouvements relatifs entre fluides et matrice rocheuse. Une première étape a été la mise au point de pré-amplificateurs et d'une nouvelle technique de filtrage pour mieux extraire les signaux de faible amplitude.

La vulnérabilité des hydrosystèmes continentaux : le cas des ressources en sol et leur évolution face aux changements globaux

Acronyme et nom du projet		Le projet en un titre
BIOCRUST	Vulnérabilité des croûtes biologiques et dégradation des sols en zone sahélienne	Des indicateurs d'altération des fonctions des écosystèmes face aux changements climatiques et d'usages des sols
SoIAO	Implication des communautés bactériennes dans l'état de vulnérabilité des sols sahéliens : approches biologiques, physico-chimiques et sociales	Les sols agricoles d'Afrique de l'Ouest face aux changements climatiques
DYNAMOS	DYNAmique MOléculaire du carbone des Sols	La dynamique du carbone organique des sols vue à l'échelle moléculaire
STREAMS	Sediment Transport and Erosion Across MountainS	Le transport hydro-sédimentaire en région montagneuse
CALIMERO	Influence du CLIMAt sur les paysages et l'EROsion : l'exemple du bassin himalayen	L'érosion passée et future de l'Himalaya et le transport sédimentaire dans la plaine du Gange
METALCLAY	Evolution des propriétés macroscopiques d'argiles compactées et soumises à l'infiltration de polluants métalliques	Les barrières argileuses de stockage de déchets : sont-elles performantes pour retenir les polluants ?
LANDSOIL	Landscape design for soil conservation under land use and climate change	Protéger les sols en raisonnant l'organisation des paysages
MESOEROS21	Mediterranean Soils Erosion and vulnerability to global change during the 21 st century	La vulnérabilité des sols à l'érosion en région méditerranéenne au 21 ^{ème} siècle
DIGISOL-HYMED	Cartographie numérique des sols par imagerie hyperspectrale pour la modélisation environnementale en région méditerranéenne	Vers une cartographie numérique des sols méditerranéens
HYDROGEOBAT	Impacts géologiques et géotechniques des mouvements de nappes phréatiques sur le bâti : analyse, mesure, simulation, prévention	L'espace sous la ville : de nouveaux défis pour le "design with Nature"
TRANSEK	TRANSient ElectroKinetics : Seismo-electromagnetic conversion in porous media	Détection des fluides par mesures électriques liées à la propagation des ondes sismiques

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2008

BIOCRUST

Vulnérabilité des croûtes biologiques et dégradation des sols en zone sahélienne

Définir des indicateurs d'altération des fonctions des écosystèmes face aux changements climatiques et d'usages des sols

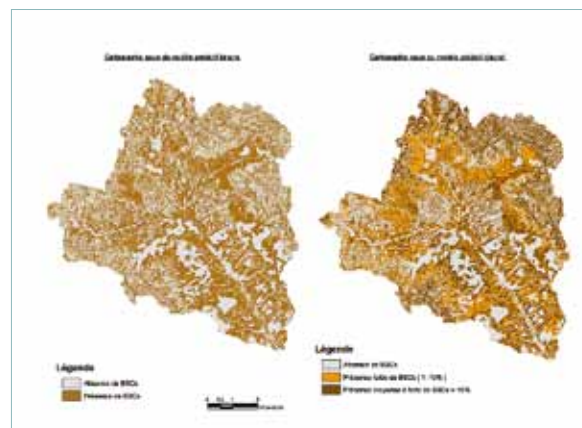
La dégradation des sols constitue un problème environnemental majeur affectant les ressources des zones arides et semi-arides. Elle est principalement due aux conditions climatiques défavorables mais aussi à une pression anthropique accrue. En zone sahélienne, l'insuffisance des ressources en eau, combinée à la faiblesse du couvert végétal, se traduit par une modification des propriétés physiques des sols et l'apparition des croûtes physiques qui limitent la production végétale et favorisent le ruissellement et l'érosion. Lorsqu'elles ne sont pas rapidement érodées, ces croûtes sont le siège d'une colonisation par des micro-organismes (en majorité des cyanobactéries) qui concourent à la formation de croûtes biologiques. Le projet BIOCRUST porte sur l'étude de la dynamique spatio-temporelle des croûtes biologiques (Biological Soil Crusts, BSC). Il a pour objectif d'utiliser les BSC comme un indicateur précoce d'altération des fonctions des écosystèmes sahéliens face aux changements climatiques et d'usage de terres. Les travaux portent sur la compréhension de l'impact de ces changements sur les BSC et les conséquences sur le fonctionnement des écosystèmes sahéliens.

Caractérisation, cartographie et évaluation de la vulnérabilité des fonctions écologiques des croûtes biologiques

L'étude des fonctions écologiques relatives aux flux de matière (C, N, eau et sédiments) dans l'écosystème constitue le socle des activités de recherche du projet BIOCRUST. Des approches pluridisciplinaires et multi-échelles sont développées pour appréhender la résilience de certains écosystèmes sahéliens face aux perturbations climatiques et anthropiques. Les données recueillies selon un gradient climatique nord-sud et des pratiques d'usages des terres contrastées (culture, jachère et pâturage) aident à la connaissance des caractéristiques des BSC et l'évaluation de la vulnérabilité de leurs fonctions écologiques aux échelles locale et régionale. L'analyse de ces données est complétée par l'élaboration d'outils de changement d'échelle basée sur la modélisation, l'utilisation de la géostatistique et la télédétection optique et radar, pour établir une cartographie de la distribution des BSC et un bilan de leurs fonctions écologiques en zone sahélienne. Une enquête socio-anthropologique auprès des utilisateurs des sols a permis de collecter des informations sur la connaissance, l'origine, et l'utilité des croûtes biologiques par rapport aux activités agricoles et pastorales.

Résultats majeurs

La base de données contenant les informations minéralogiques, biogéochimiques, biologiques, spectrales et descriptives sur les BSC est en cours d'élaboration. Les cartes de répartition des BSC aux échelles de bassins versants (1/10.000), de la région (1/100.000) et du Sahel (1/500.000) ont été réalisées. Des modèles prédictifs de présence de BSC à l'échelle des bassins versants ont été établis sur la base de régressions logistiques. L'évaluation de la vulnérabilité des



Cartographie des croûtes biologiques sur le bassin versant de Tamou (Sud-Ouest du Niger). Résultats issus de 2 modèles statistiques (discret et binaire), de l'utilisation d'images satellitaires à très haute résolution (Komsat-2), de relevés de terrain et de l'intégration d'une variable liée au gradient pluviométrique. Les deux modèles donnent des résultats satisfaisants et cohérents par rapport aux données recueillies sur le terrain.

BIOCRUST « Vulnérabilité des croûtes biologiques et dégradation des sols en zone sahélienne » est un projet de recherche fondamentale à vocation finalisée coordonné par le GEGENA2 (Groupe d'Etude des Géomatériaux et Environnements Naturels Anthropiques et Archéologiques, Université de Reims Champagne Ardenne). Il associe le BRGM, les Unités BIOEMCO (BIOgéochimie et Ecologie des Milieux CONTinentaux), TETIS (Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale, SupAgro Montpellier), FARE (Fractionnement des Agroressources et Environnement, INRA Lille), le SIRS (Systèmes d'Information à Référence Spatiale), ainsi que trois autres partenaires (NIOO-CEMO, Pays-Bas, Géosciences Azur et le Département de Géographie de UCL, Belgique) qui interviennent en tant qu'experts. Le projet a débuté en janvier 2009 pour une durée de 48 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 861 k€ pour un coût global de 1,9 M€.

fonctions écologiques des BSC au sein des écosystèmes se fera au travers de leur mise en relation avec les cartes de répartition.

Production scientifique et brevets

Malam Issa O., *et al.*, 2011. Runoff generation fostered by physical and biological crusts in semi-arid sandy soils. *Geoderma* 167-168: 22-29.

Baghdadi N., *et al.*, 2011. Estimating surface soil moisture from TerraSAR-X Data over two small catchments in the Sahelian part of Western Niger. *Remote Sens.*, 3 (6) : 1266-1283, doi:10.3390/rs3061266.

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2008

SOLAO

Les sols agricoles d'Afrique de l'Ouest face aux changements climatiques

Les communautés microbiennes des sols des régions arides sont-elles capables de s'adapter aux changements environnementaux ?

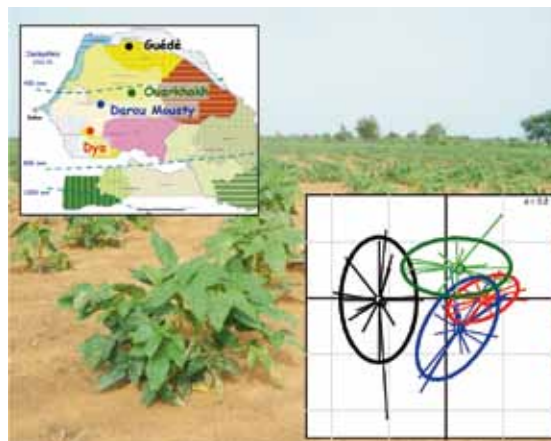
Avec une biomasse globale supérieure à celle des végétaux, une extrême diversité et de très fortes potentialités d'adaptation, les microorganismes du sol jouent un rôle capital dans le maintien de la qualité et la productivité des écosystèmes. Ils régissent les cycles biogéochimiques, libérant les nutriments pour les plantes, formant l'humus et maintenant les propriétés physico-chimiques des sols. Cependant, malgré leur rôle majeur dans le fonctionnement des écosystèmes naturels et agricoles, l'impact des changements climatiques sur ces microorganismes est très peu caractérisé. Sont-ils les premiers affectés, ou à l'inverse seront-ils les premiers à pouvoir répondre efficacement à ces nouvelles contraintes ? Le projet SolAO vise à établir l'état de vulnérabilité des sols sahéliens soumis aux changements climatiques (sécheresse, irrégularité des pluies, augmentation de la température) et anthropiques (intensification des cultures et de l'élevage, modification des pratiques culturales), et à identifier des indicateurs microbiens, physico-chimiques et sociaux (perception de la qualité des terres agricoles par les producteurs locaux) pertinents pour caractériser cet état des sols.

Regards croisés des Sciences du sol et du vivant, des Sciences humaines et sociales et des acteurs locaux sénégalais

SolAO a développé ses recherches dans quatre communautés rurales du Sénégal, réparties selon un gradient climatique du nord du Pays (Vallée du Fleuve, pluviométrie annuelle moyenne inférieure à 300 mm) au sud du Bassin Arachidier (600 à 800 mm de pluies annuelles). La structure et la texture des sols de différentes parcelles de ces quatre sites ont été caractérisées et l'évolution des principaux éléments organiques et minéraux a été suivie au cours des saisons. En parallèle, la structure et la diversité génétique des communautés microbiennes ont été caractérisées à la même échelle spatio-temporelle et en association avec la culture de niébé (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). Différents groupes de rhizobiums (bactéries que l'on peut inoculer au niébé pour accroître et stabiliser les rendements) ont été étudiés pour leurs caractéristiques écologiques et leur capacité à s'adapter à des conditions de stress. Des entretiens individuels et collectifs avec des producteurs agricoles, des observations participantes, des « walking transects » et une démarche ethno-photographique ont permis d'aborder les pratiques et représentations locales en matière de vulnérabilité des sols.

Résultats majeurs

La structuration des communautés microbiennes totales varie selon le gradient de pluviométrie croissante du Nord au Sud du Sénégal et en fonction de l'alternance saison des pluies / saison sèche : au Nord, les rhizobiums montrent plus de diversité et résistent mieux au stress hydrique et salin. Au plan local, cette diversité doit être analysée en regard de la typologie des sols établie par les paysans, sur la base de critères variés (biophysiques, climatiques, historiques,



Champ de niébé et analyse de la structure génétique des communautés microbiennes totales de sols non rhizosphériques en saison sèche : les sols de Guédi (en noir), situés en région de faible pluviométrie, se distinguent nettement de ceux des autres communautés rurales (Ouarkhokh, Darou Mousty et Dya).

SolAO « Implication des communautés bactériennes dans l'état de vulnérabilité des sols sahéliens : approches biologiques, physico-chimiques et sociales » est un projet de recherche fondamentale à vocation finalisée coordonné par l'IRD (Equipe Symbioses Tropicales et Méditerranéennes, Montpellier). Il associe le Laboratoire Ampère (Ecole Centrale de Lyon), le CE-REGE (Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement, Aix-en-Provence), le C2So (Communication, Culture et Société, ENS Lyon), le LCM (Laboratoire Commun de Microbiologie IRD/ISRA/UCAD, Dakar) et le CNCR (Conseil National de Concertation et de Coopération des Ruraux, Dakar). Le projet a débuté en janvier 2009 pour une durée de 48 mois. Il bénéficie d'un financement de l'ANR de 708 k€ pour un coût global de 2,65 M€.

sociaux...) et reflétée par les paramètres physicochimiques analysés. Au-delà de ces résultats, SolAO a permis de développer un collectif interdisciplinaire et de renforcer le partenariat entre chercheurs et organisations paysannes, base de recherches pertinentes tant au niveau fondamental que finalisé.

Production scientifique et brevets

Le projet a donné lieu à une douzaine de communications dans des congrès nationaux et internationaux (ISME13, 2010 Seattle, USA ; Congreso Internacional de Interacciones Microbianas, 2010, Puebla, Mexique ; ACCAE, 2010, Clermont-Ferrand, France ; Ecology of soil microorganisms – Microbes as important drivers of soil processes, 2011, Prague, République Tchèque...). Plusieurs publications sont en cours de rédaction ou soumises dans des revues internationales à comité de lecture.

Programme « Blanc », édition 2007

DYNAMOS

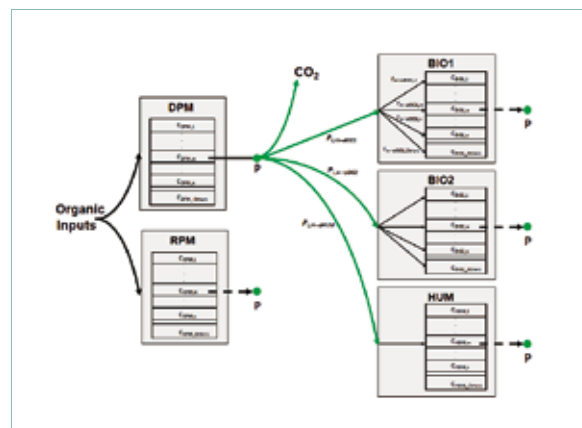
La dynamique du carbone organique des sols vue à l'échelle moléculaire

Mieux évaluer et modéliser la dynamique du carbone dans les sols en se plaçant à l'échelle des processus

Notre capacité à prédire les changements futurs des stocks de carbone dans les sols réside dans la compréhension des processus qui régissent son stockage et déstockage, sur des échelles de temps variables. Se positionner à l'échelle moléculaire semble être déterminant pour progresser sur cette question, avec notamment la prise en compte des interactions entre les groupes fonctionnels des molécules et les phases minérales et organiques des sols. Ces interactions impactent directement la vitesse de renouvellement des composés organiques. L'émergence de nouvelles techniques isotopiques au niveau moléculaire rend désormais possible la quantification des flux et des transformations moléculaires, quelles que soient les échelles de temps impliquées. Le projet DYNAMOS a pour objectifs : i) d'acquies de nouvelles données caractérisant la dynamique de molécules sélectionnées comme étant représentatives des végétaux et des microorganismes à l'échelle de la décennie et ii) de les implémenter dans le modèle C2SOM (Compound-Specific Simulation of Organic Matter dynamics) qui représente de façon simple la dynamique des constituants moléculaires de la matière organique d'un sol.

Introduction de la fonctionnalité chimique des composés organiques des sols dans les modèles de dynamique du carbone

Pour reconstruire la dynamique moléculaire du carbone du sol, le suivi isotopique d'une chrono-séquence avec conversion de végétation permet de caler précisément les apports dans le sol et la sélection de molécules spécifiques des végétaux et des microorganismes et de tracer leur devenir. Nous avons ainsi choisi deux séquences ayant connu une conversion C4 en C3 (Pointe Noire, Congo), et C3 en C4 (les Closeaux, France), puis extrait des végétaux et des sols, des molécules issues de 4 familles moléculaires (lipides, sucres, lignines et protéines). Après extraction, purification et identification des molécules du sol, leur $\delta^{13}\text{C}$ a été mesuré par Gas Chromatography-Isotope Ratio Monitoring Mass Spectrometry (GC-IRMS) et leur activité ^{14}C par Spectrométrie de Masse par Accélérateur (AMS). Les résultats obtenus ont permis de caractériser les vitesses de renouvellement de ces molécules dans le sol et ont été utilisés pour calibrer le modèle C2SOM qui dérive des modèles existants fondés sur une représentation en compartiments fonctionnels de la matière organique, compartiment dans chacun desquels les molécules sélectionnées y sont insérées. Les flux à l'échelle moléculaire et les transformations chimiques entre les compartiments sont ainsi représentés.



Le modèle C2SOM, déclinaison moléculaire du « Rothamsted Carbon model, RothC ». Toute molécule quittant l'un des réservoirs du modèle est redistribuée vers les autres compartiments avec transformation chimique lors de l'allocation vers les compartiments microbiens.

DYNAMOS « DYNAmique Moléculaire du carbone Organique des Sols » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement). Il associe les Unités de l'INRA BEF (Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers) et GSE (Géochimie des Sols et des Eaux), le CR2P (Centre de Recherche sur la Paléodiversité et les Paléoenvironnements) et BIOEMCO (Biogéochimie et Ecologie des Milieux Continentaux). Le projet a débuté en novembre 2008 pour une durée de 48 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 480 k€ pour un coût global de 2 M€.

Résultats majeurs

Les principaux résultats obtenus concernent i) l'acquisition de mesures ^{13}C et ^{14}C de lipides individuels, de composés dérivés de la lignine et des sucres, ii) la calibration du modèle C2SOM pour ces molécules et iii) l'exploitation combinée des résultats de laboratoire et de modélisation. Nous avons ainsi démontré que, contrairement aux représentations conceptuelles classiques, chaque molécule a sa propre dynamique même si, à l'échelle de la matière organique totale, le sol semble être revenu à l'équilibre après 30 ans d'aforestation, ce qui est loin d'être le cas à l'échelle des molécules individuelles.

Production scientifique et brevets

Mendez-Millan M., Nguyen Tu T.T., Balesdent J., Derenne S., Derrien D., Egasse C., Thongo A., Zeller B., Hatté C., 2012. Biogeochemistry (submitted).

Derrien D., Amelung W., 2011. Eur. J. of Soil Sci., 62: 232-252.

Gauthier C., Hatté C., 2008. Geochemistry, Geophysics and Geosystem., 9, Q80011, doi: 10.1029/2008GC001967.

Programme « Blanc », édition 2006

STREAMS

Le transport hydro-sédimentaire en région montagneuse

Pourquoi mesurer et modéliser la dynamique des sédiments fins dans les bassins versants de montagne ?

Les ressources en eau exploitables par les sociétés humaines (pour les efforts importants réalisés depuis 20 ans ont fait progresser la connaissance de la dynamique des matières en suspension dans les bassins versants. Cependant, le faible nombre d'observations à des échelles emboîtées et pour des hautes fréquences d'acquisition (moins de 1 heure) ne permet pas d'aborder les questions fondamentales concernant : i) l'origine spatiale des sédiments, ii) les temps de transit à l'intérieur des bassins versants. De plus, il n'existe pas de modélisation précise de ces mécanismes à l'échelle des bassins versants de moyennes échelles (100-1000 km²). Ces verrous constituent un frein au développement de méthodes de prévision fiables pour la gestion du transit sédimentaire, notamment dans les bassins versants aménagés pour la production hydroélectrique. Le projet STREAMS vise à l'amélioration des connaissances sur la dynamique des matières en suspension et à un double rapprochement : i) au sein de la communauté scientifique entre les hydrologues et les géochimistes en combinant leurs méthodes (observations *in situ* et analyses chimiques et isotopiques) et ii) entre les chercheurs et les utilisateurs opérationnels de la recherche (producteurs d'électricité).

Définir l'origine des sédiments et estimer leur temps de transfert dans les bassins versants

Le projet s'articule autour de deux bassins tests : la Bléone (905 km²) en France et Cointzio (635 km²) au Mexique. La mise en œuvre d'approches scientifiques et méthodologiques originales (multi- échelles, multi- sites) combinant des mesures physiques *in situ* (débitmètre, turbidimétrie) et géochimiques (spectrométrie gamma, analyses géochimiques élémentaires par activation neutronique et spectrométrie de masse) sur des échantillons de sols et de sédiments, a permis de lever plusieurs verrous concernant l'origine spatiale et les temps de transit des sédiments. L'instrumentation de 10 sites de mesures hydro- sédimentaires a permis un échantillonnage haute fréquence des flux de matières en suspension : 263 échantillons de sols, 461 échantillons de sédiments ont été analysés en laboratoire. Au total, environ 1 200 mesures ont été réalisées. L'évaluation d'un modèle à base physique a mis en évidence les limites actuelles de ce type d'outil pour représenter les transferts de sédiments. En plus de l'exploitation scientifique, les données acquises pendant le projet ont été exploitées en interne par le partenaire industriel (EdF) dans le cadre de la gestion des flux sédimentaires dans le bassin de la Durance.

Résultats majeurs

Les débits liquides, les concentrations en sédiments et les flux de matière en suspension ont été mesurés en continu en 10 stations. Les dynamiques spatiale et temporelle actuelles des sédiments fins ont été déterminées grâce à l'utilisation de radionucléides et d'éléments géochimiques comme traceurs des particules. L'analyse de la dynamique à moyen terme a été menée à partir de l'analyse de



Transport de sédiments dans des environnements contrastés. Dans le bassin versant de la Bléone situé dans les Alpes françaises (gauche), le transport des sédiments est en partie commandé par la fonte de la neige, tandis qu'il est principalement contrôlé par l'occurrence des orages intenses pendant la saison des pluies dans la ceinture trans-volcanique mexicaine (droite).

STREAMS « Sediment TRansport and Erosion Across MountainS » est un projet de recherche fondamentale à vocation finalisée coordonné par le LTHE (Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement). Il associe le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement), l'Entreprise EdF (Electricité de France) et la « Jeune Pousse » HYDROWIDE. Le projet a débuté en mars 2007 pour une durée de 42 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 490 k€ pour un coût global de 2,56 M€.

carottes sédimentaires prélevées à proximité de l'exutoire des deux bassins étudiés. Elle a permis de dater les dépôts, d'estimer le taux de sédimentation pendant les dernières décennies et de déterminer l'origine des sédiments à différentes périodes de l'année. L'ensemble des résultats a été obtenu dans le cadre d'un partenariat public-privé.

Production scientifique et brevets

Parmi la quinzaine d'articles publiés dans des revues internationales à comité de lecture ou présentés dans des conférences internationales, citons :

Duvert C., *et al.*, 2010. Drivers of erosion and suspended sediment transport in three headwater catchments. *Geomorphology* 123 (3-4): 243-256.

Evrard O., *et al.*, 2012. Sediment dynamics during the rainy season in tropical highland catchments of central Mexico using fallout radionuclides. *Geomorphology* (in press).

Gratiot N., *et al.*, 2010. Increase in surface runoff in the central mountains of Mexico: lessons from the past and predictive scenario for the next century. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14 (2): 291-300.

Navratil O., *et al.*, 2010. Fine sediment storage in a braided river reach. *Hydrol. Processes*, doi: 10.1002/hyp.7594.

Navratil O., *et al.*, 2011. Global uncertainty analysis of suspended sediment monitoring using turbidimeter in a small mountainous river catchment. *J. of Hydrol.*, 398 (3-4): 246-259 (ISSN 0022-1694).

Evrard O., *et al.*, 2011. Combining suspended sediment monitoring and fingerprinting to determine the spatial origin of fine sediment in a mountainous river catchment. *Earth Surface Proc. and Landforms* 36 (8):1072-1089 (ISSN 0197-9337).

Programme « Blanc », édition 2006

CALIMERO

Impact des variations climatiques passées et futures sur l'érosion de l'Himalaya et le transport de sédiments dans la plaine du Gange

Quantifier la sensibilité des processus d'érosion et d'altération des roches aux variables climatiques, ainsi que l'évolution des sédiments depuis les versants jusqu'aux bassins

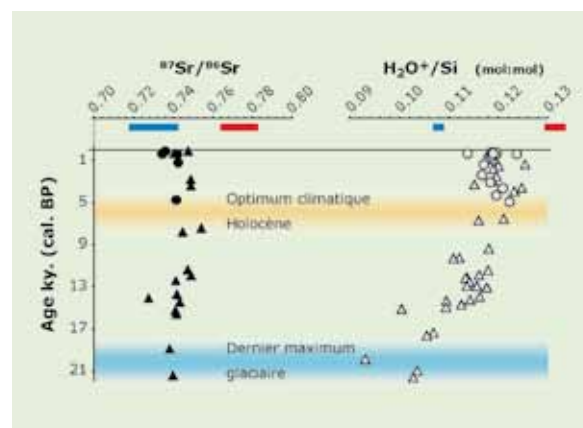
Le climat, à travers les précipitations et les températures, contrôle directement la couverture végétale, les processus et l'intensité de la production de sol, l'altération des roches et leur érosion, mais aussi le transport des sédiments depuis les versants jusqu'aux bassins océaniques. L'objectif du projet CALIMERO est de comprendre cette sensibilité des paysages et de l'érosion aux variables climatiques, dans le cas d'un grand système morpho-climatique comme celui du système Himalaya- Gange. Les implications concernent aussi bien la réponse des paysages aux variations climatiques quaternaires que celle à plus court terme du changement climatique. Le projet aborde cette problématique selon deux axes : i) l'étude et la modélisation des mécanismes actuels de l'érosion, de l'altération des roches et du transport sédimentaire ainsi que l'influence des variables climatiques à partir de mesures géomorphologiques, d'analyses géochimiques, de traçages isotopiques et d'expérimentation, ii) l'étude dans le temps des effets des changements climatiques sur les enregistrements sédimentaires au front de la chaîne himalayenne, notamment au cours des dernières transitions glaciaire- interglaciaire.

De la mesure géochimique, isotopique et géomorphologique des flux et processus d'érosion et d'altération à leur modélisation

L'originalité de l'approche réside dans le fait de combiner, de manière systématique et sur plusieurs années d'observation, de nombreuses méthodes pour "suivre" l'altération et l'érosion, et dans la mise en oeuvre de développements originaux portant sur l'intégration spatio-temporelle des flux chimiques de sédiments, l'utilisation d'un capteur en temps réel de l'érosion fluviale, la quantification de l'altération par la mesure de l'hydratation des sédiments, etc... Ces observations et analyses, complétées par des mesures expérimentales sur l'érosion fluviale, ont pour objectif de contraindre les lois qui régissent l'érosion physique et altération chimique pour les intégrer, pour la première fois conjointement, dans un modèle numérique. Le modèle est confronté aux observations actuelles et passées réalisées dans des enregistrements sédimentaires sur la réponse aux variations climatiques quaternaires, avant de pouvoir servir à la prédiction de scénarii potentiels de changements climatiques futurs.

Résultats majeurs

Le projet a déjà abouti à quelques résultats majeurs tels que l'estimation des vitesses d'érosion moyenne de la chaîne himalayenne, soit 1 mm/an et la mise en évidence de la plaine du Gange comme lieu principal de l'altération chimique. En parallèle, l'analyse chimique de sols, de roches et de sédiments, ainsi que des observations en temps réel montrent que l'érosion Himalayenne est largement dominée par le matériel issu des glissements de terrain : la déforestation en Himalaya a donc, semble-t-il, un impact faible sur l'érosion ac-



Evolution de la signature isotopique en strontium (gauche) et de l'hydratation des sédiments normalisée au contenu en silicium (droite) depuis le dernier maximum glaciaire dans des carottes prélevées dans le cône du Bengale en aval de la confluence du Gange (gamme de composition actuelle en trait rouge) et du Brahmapoutre (trait bleu). L'augmentation de l'hydratation des sédiments traduit une altération accrue du système Himalaya- Gange en réponse à l'augmentation des températures et des précipitations depuis 20 000 ans. Les analyses isotopiques permettent de s'assurer que les variations d'hydratation observées ne résultent pas d'une modification de la source des sédiments.

CALIMERO « Influence du CLIMAt sur les paysages et l'ERO-sion : l'exemple du bassin himalayen » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le CRPG (Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques, Nancy). Il associe le GET (Géosciences Environnement Toulouse) et le LHyGeS (Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie de Strasbourg). Le projet a débuté en novembre 2009 pour une durée de 48 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 550 k€ pour un coût global de 2,16 M€.

tuelle. La suite du projet portera sur l'enregistrement des variations climatiques passées, ou encore sur l'intégration des résultats dans un modèle réaliste d'évolution des paysages.

Production scientifique et brevets

- Lupker M., *et al.*, 2011. A Rouse-based method to integrate the chemical composition of river sediments: application to the Ganga basin. *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2010JF001947.
- Lupker M., *et al.*, 2012. Predominant floodplain over mountain weathering of Himalayan sediments (Ganga basin). *Geochem. and Cosmochimica Acta* (in press).
- Lupker M., *et al.*, 2012. ¹⁰Be-derived Himalayan denudation rates and sediment budgets in the Ganga basin. *Earth and Planetary Sci. Lett.*, (submitted).

Programme « Jeunes Chercheurs, Jeunes Chercheuses », édition 2007

METALCLAY

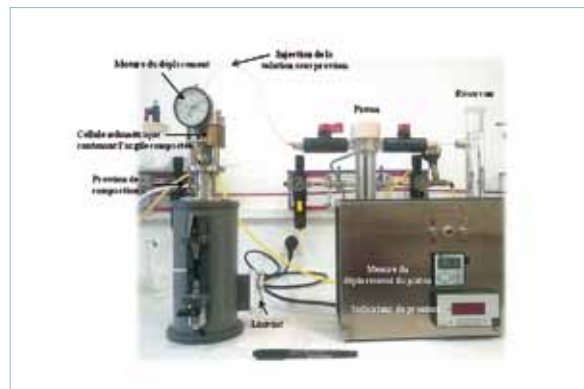
Les barrières argileuses de stockage de déchets : sont-elles performantes pour retenir les polluants ?

Simuler au laboratoire l'infiltration de polluants métalliques dans des argiles compactées pour prédire leur efficacité

La réglementation exige la présence d'une barrière argileuse étanche au fond des alvéoles de stockage de déchets ménagers et industriels, afin d'éviter la contamination du sous-sol et des nappes phréatiques. En effet, l'infiltration des eaux de pluie à travers ces déchets provoque la lixiviation des polluants qu'ils contiennent. La question qui se pose est de savoir si le contact prolongé pendant plusieurs années avec des lixiviats toxiques dégrade les bonnes propriétés d'étanchéité et de rétention des argiles. Cependant, une fois enfouies sous plusieurs mètres de déchets, il devient difficile de suivre l'évolution de leurs propriétés. Le projet METALCLAY a pour objectif de simuler en laboratoire le fonctionnement de ces argiles en infiltrant sous pression du lixiviat à travers des argiles compactées. L'intérêt des études en laboratoire est de pouvoir contraindre le système, en fixant et testant séparément l'influence de plusieurs paramètres d'entrée sur la capacité de rétention des polluants, tels que le pH, la concentration en polluants, la composition chimique de l'argile.

Les interactions entre argiles et métaux : expérimentation, caractérisation et modélisation géochimique

Le projet a développé de nouveaux équipements expérimentaux pour travailler par analogie par rapport au milieu naturel. Pour s'affranchir des problèmes d'hétérogénéité des matériaux argileux naturels, des argiles de composition chimique et minéralogique choisie ont été synthétisées dans des autoclaves à haute pression et haute température. L'autre originalité du projet a été de concevoir une cellule œdométrique, permettant de compacter l'argile, munie d'un système d'injection sous pression contrôlée. L'apport de ces équipements couplé aux analyses chimiques des lixiviats et à la caractérisation de l'argile par sonde électronique et microscopie électronique à balayage a permis de quantifier l'adsorption des polluants métalliques sur les argiles, en situation statique mais surtout dynamique. Les données expérimentales ont été introduites dans un modèle géochimique simulant les interactions argiles-métaux. L'objectif est d'une part, de caractériser les mécanismes d'adsorption et d'autre part, de proposer une simulation prédictive du transport réactif d'une solution métallique dans une barrière argileuse.



Mini-œdomètre couplé à un injecteur à pression contrôlée : appareil conçu au laboratoire pour infiltrer sous pression des solutions polluantes dans des argiles compactées afin de simuler le comportement des barrières argileuses des sites de stockage de déchets.

METALCLAY « Evolution des propriétés macroscopiques d'argiles compactées et soumises à l'infiltration de polluants métalliques » est un projet de recherche fondamentale coordonné par l'ISTO (Institut des Sciences de la Terre d'Orléans). Il a débuté en novembre 2007 pour une durée de 54 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 150 k€ pour un coût global de 550 k€.

Résultats majeurs

Que ce soit avec l'eau ou des solutions de polluants métalliques (Cu, Pb, Zn), en milieu neutre ou acide, et pour des durées d'infiltration jusqu'à une année, les argiles purifiées étudiées présentent des conductivités hydrauliques très faibles ($< 10^{-12}$ m.s⁻¹), preuve de la durabilité de leur excellente étanchéité, et une très bonne rétention des polluants. Ces argiles pourraient être utilisées comme des membranes géosynthétiques étanches dans les alvéoles de stockage de déchets sur une épaisseur de quelques millimètres uniquement, au lieu des matériaux actuellement utilisés sur une épaisseur d'un mètre.

Production scientifique et brevets

Sobolev O., Le Forestier L., Gonzalez M.A., Russina M., Kemner E., Cuello G.J., Charlet L., 2009. J. Phys. Chem., 113 : 13801-13812, doi: 10.1021/jp903179.

Le Forestier L., Muller F., Villières F., Pelletier M., 2010. Appl. Clay Sci., 48 : 18-25, doi: 10.1016/j.clay.2009.11.038.

Ghayaza M., Le Forestier L., Muller F., Tournassat C., Bény J.M., 2011. J. Colloid Interface Sci., 326 : 238-246. doi: 10.1016/j.jcis.2011.05.028.

Ghayaza M., Doctorat de l'Université d'Orléans (24 février 2012).

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2008

LANDSOIL

Protéger les sols en raisonnant l'organisation des paysages

Analyser les effets de la structure du paysage sur l'impact du changement climatique sur les sols

Les sols sont une ressource peu renouvelable qui assure des fonctions et des services essentiels pour l'homme et les écosystèmes. La pression anthropique sur les sols et les effets supposés du changement climatique conduisent à envisager des modifications significatives de leurs propriétés à l'échelle de décennies. Le projet LANDSOIL étudie les relations entre l'évolution des sols agricoles dans le contexte du changement climatique et de l'organisation des paysages, à des échelles de temps allant de la décennie au siècle. Il a pour objectif de quantifier et modéliser les effets de la structure du paysage sur la redistribution des sols et sur la dynamique de leur stockage de carbone, pour des agro-écosystèmes très différents sites de recherche de longue durée (OMERE de Roujan, Hérault ; Zone Atelier de Pleine Fougères, Ille-et-Vilaine ; Seuil, Indre et Loire). Une originalité forte réside dans le couplage de descriptions 3-D des sols, de datations de l'érosion hydrique et aratoire et de modélisations rétrospective et prospective pour quantifier les évolutions des sols. L'autre originalité porte sur la modélisation à haute résolution spatiale et temporelle qui permet d'identifier les effets locaux des structures paysagères et d'intégrer des événements climatiques intenses.

Description 3-D, datation et simulation de l'évolution future des sols pour des scénarii contrastés

Le projet développe de nouvelles méthodes de description des sols au sein des paysages et de modélisation de leur évolution au cours du temps, en intégrant les propriétés intrinsèques des sols et la configuration du paysage. La mise en œuvre de méthodes de cartographie 3-D des épaisseurs des sols et des stocks de carbone à haute résolution spatiale (2 m), mais aussi sur des superficies importantes, permet d'analyser finement les interactions entre la géométrie actuelle des sols et les structures passée et actuelle des paysages. Le recours à des méthodes de datation (^{137}Cs et OSL- Luminescence Stimulée Optiquement) permet de comprendre les évolutions passées et de tester des modèles d'évolution des sols à l'échelle des paysages. Cette étape de quantification de l'état actuel des sols et de mise au point de modèles d'évolution constitue le fondement des simulations numériques (i.e. modèle RothC de Rothamsted) de l'évolution future des sols selon des scénarii de changement climatique et de modification des paysages.

Résultats majeurs

Les résultats montrent que les sols ont évolué de façon importante au cours des derniers siècles en fonction des changements d'usage et de la réorganisation des paysages, avec une accélération récente des processus. La comparaison des simulations d'évolution des sols selon des scénarii croisant changement climatique et configuration de paysages doit permettre d'identifier des situations qui accroissent la résilience des sols aux perturbations. Les résultats conceptuels et



La géométrie du parcellaire, la gestion des parcelles cultivées et les structures paysagères déterminent une configuration du paysage qui permet de moduler l'impact du changement climatique sur les sols (Photo INRA).

LANDSOIL « Landscape design for soil conservation under land use and climate change » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le Laboratoire SAS (Sol, Agro-hydrosystèmes, Spatialisation, AgroCampus-Ouest de l'INRA). Il associe l'ISTO (Institut des Sciences de la Terre d'Orléans), le LISAH (Laboratoire d'étude des Interactions Sol- Agrosystème-Hydrosystème) et l'Unité de Science du Sol de l'INRA Orléans. Le projet a débuté en janvier 2009 pour une durée de 48 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 435 k€ pour un coût global de 1,4 M€.

méthodologiques du projet peuvent ainsi contribuer à l'élaboration de stratégies de gestion des paysages permettant de préserver la qualité des sols. On notera également que LANDSOIL a établi des collaborations avec les projets ANR MESOEROS 21 (VMC 2006) et DIGISOL-HYMED (Blanc 2008), le projet européen DIGISOL ainsi qu'avec le projet CLIMASTER « Pour et Sur le Développement Régional (PSDR) » de l'INRA.

Production scientifique et brevets

Viaud V., Walter C., Angers D., 2010. Towards landscape scale modelling of soil organic matter dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 74:1847-1860.

Chartin C., Bourennane H., Salvador-Blanes S., Hinschberger F., Macaire J.J., 2011. Classification and mapping of anthropogenic landforms on cultivated hillslopes using DEMs and soil thickness data. *Geomorphology* 135 (1-2): 8-20.

Ciampalini R., Follain S., Le Bissonnais Y., 2012. Landsoil: a model for the analysis of erosion impact on agricultural landscape evolution. *Geomorphology* (accepted).

Programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés », édition 2006

MESOEROS 21

La vulnérabilité des sols à l'érosion en région méditerranéenne au 21^{ème} siècle

Evaluer l'impact des changements climatiques et d'occupation des sols attendus au cours du 21^{ème} siècle

L'objectif du projet MESOEROS 21 était d'une part, d'évaluer l'impact des changements climatiques et d'occupation des sols attendus au cours du 21^{ème} siècle sur l'érosion des sols dans le domaine méditerranéen et d'autre part, de développer des modèles et des indicateurs pour évaluer localement et régionalement leur vulnérabilité. Les travaux ont porté notamment sur la collecte de données multi-paramètres et le suivi expérimental hydro-érosif sur plusieurs bassins versants de référence au nord et au sud de la Méditerranée, la mise en place d'une base de données régionale, l'utilisation de données satellitaires, les simulations de scénarii de changements climatiques et d'occupation des sols et le développement d'une méthodologie d'évaluation régionale des risques d'érosion.

Une approche par modélisation et simulations pour cartographier l'aléa érosif et la vulnérabilité des sols selon différents scénarios

Le projet a analysé l'influence des paramètres de forçage de l'érosion des sols les plus affectés par le changement global, à savoir les caractéristiques des pluies et la couverture du sol. La sensibilité de différents modèles d'érosion à ces paramètres a été évaluée sur les petits bassins versants expérimentaux de l'ORE OMERE, puis sur les plus grands bassins englobant ces sites en France, en Tunisie et au Maroc. Les résultats de cette analyse et des simulations issues de ces modèles ont été utilisés pour élaborer différents indicateurs de vulnérabilité des sols pour l'érosion et ses conséquences. Une méthode de régionalisation de ces indicateurs a été mise au point et appliquée aux régions tests du projet. Enfin, un modèle de cartographie de l'aléa érosif et de son évolution à l'échelle de l'ensemble du bassin méditerranéen a été proposé.

Résultats majeurs

Le projet a permis le développement et l'adaptation de modèles d'érosion des sols à différentes échelles pour le contexte méditerranéen et une méthodologie pour l'analyse de sensibilité et l'incertitude de ces modèles a été développée. La construction d'une base de données exhaustive des facteurs de l'érosion a conduit à cartographier l'aléa érosion et la vulnérabilité des sols pour l'ensemble de la région méditerranéenne. Des simulations de l'impact de changements climatiques et d'occupation des sols à échéance de 2050 et 2100 ont été réalisées. Les résultats mettent en évidence l'influence prédominante de l'occupation des sols (dépendant en partie elle-même des contraintes climatiques) sur l'évolution de l'aléa érosion et la vulnérabilité des sols. La gestion d'une couverture végétale la plus continue possible dans le temps et l'espace apparaît ainsi comme le principal levier d'une protection des sols contre leur dégradation irréversible. Ces résultats, ainsi que les méthodes mises au point dans le projet ont été diffusés au travers de plusieurs partenariats en Tunisie et au Maroc et lors d'un colloque international sur l'érosion



Erosion irréversible des sols jusqu'à la roche mère dans une parcelle cultivée du nord de la Tunisie.

MESOEROS 21 « Mediterranean Soils Erosion and vulnerability to global change during the 21st century » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LISAH (Laboratoire des Interactions Sol-Agrosystème-Hydrosystème, SupAgro-Montpellier). Il associe le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), le CESBIO (Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère), le CLIFA (CLimat et Fonctionnement des Agro-écosystèmes) et l'INRA Science du Sol-Orléans. Le projet a débuté en mars 2007 pour une durée de 39 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 314 k€ pour un coût global de 2,275 M€.

des sols au Maghreb qui s'est tenu à Rabat en octobre 2011. Deux projets ANR (DIGISOL- HYMED, Blanc 2008 et LANDSOIL, VMCS 2008) prolongent également les travaux réalisés dans le cadre de MESOEROS21. Enfin, le projet a conduit à la mise en place d'un réseau international de bassins versants méditerranéens pour l'étude de l'érosion (projet R-OSMed) dans le cadre du programme MIS-TRALS-SICMED (8 pays sont actuellement impliqués).

Production scientifique et brevets

Citons notamment :

- Raclot D., Le Bissonnais Y., Louchart X., Andrieux P., Moussa R., Voltz M., 2009. Soil tillage and scale effects on erosion from fields to catchment in a mediterranean vineyard area. *Agric., Ecosyst. and Environ.*, 134, 3-4 : 201-210.
- Paroissien J.B., Lagacherie P., Le Bissonnais Y., 2010. A regional-scale study of multi-decennial erosion of vineyard fields using vine-stock unearthing-burying measurements. *Catena* 82 :159-168.
- Cheviron B., Le Bissonnais Y., Desprats J.F., Couturier A., Gumiere S.J., Cerdan O., Darboux F., Raclot D., 2011. Comparative sensitivity analysis of four distributed erosion models. *Water Resour. Res.*, 47, W01510, doi:10.1029/2010WR009158.
- Desprats J.F., Raclot D., Rousseau M., Cerdan O., Garcin M., Le Bissonnais Y., Ben Slimane A., Fouche J., Monfort-Clement D., 2012. Satellite imagery mapping of linear erosion features. *Land Degradation and Development*, doi: 10.1002/ldr.1094 (in press).

Programme « Blanc », édition 2008

DIGISOL-HYMED

Vers une cartographie numérique des sols méditerranéens

Cartographie numérique des sols par imagerie hyperspectrale pour la modélisation environnementale en région méditerranéenne

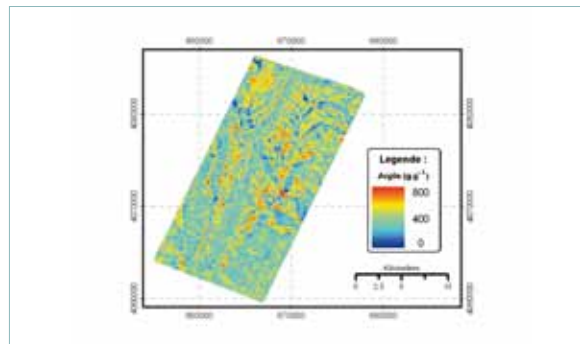
Les bases de données pédologiques existantes dans le monde ne sont ni suffisamment exhaustives, ni suffisamment précises pour assister les décisions en matière d'agriculture et d'aménagement du territoire. Une initiative a été récemment lancée à l'échelle mondiale (programme GlobalSoilMap.net) pour surmonter cette difficulté, projetant la réalisation de cartes numériques mondiales des propriétés des sols à haute résolution. Le projet DIGISOL-HYMED s'inscrit dans ce contexte et a pour but de conduire un test en vraie grandeur sur deux terrains d'étude méditerranéens (24,6 km² au Sud de la France et 338 km² au Nord de la Tunisie). L'aspect innovant de cette contribution est le recours à l'imagerie hyperspectrale Visible-Proche Infrarouge qui est supposée fournir une estimation directe des propriétés des sols de surface et dont l'offre devrait croître significativement dans un futur proche, grâce au lancement de nouveaux satellites. Au delà de la production de cartes numériques de sol, le projet vise également à estimer la valeur ajoutée de ces cartes pour la modélisation spatialisée de l'érosion et du bilan hydrique des cultures, deux préoccupations majeures dans les milieux méditerranéens.

Une approche associant traitement du signal de télédétection, géostatistique et modélisation environnementale

Une première étape du projet consiste à produire des estimations des propriétés des sols par imagerie hyperspectrale Visible-Proche Infrarouge sur des surfaces de sol nu en utilisant des modèles de régressions multi-variées (PLSR). En complément, des techniques de séparation de source en aveugle et des inversions de modèles de transfert radiatif sont testés pour étendre ces estimations sur des surfaces couvertes par un mélange de sol et de végétation. Nous étudions ensuite comment cette nouvelle information peut permettre d'inférer un ensemble exhaustif d'estimations des propriétés du sol incluant les couches demeurées inaccessibles à la télédétection hyperspectrale (masquées par la végétation ou les couches profondes). Ceci est réalisé grâce à l'utilisation de modèles géostatistiques tenant compte des spécificités des données hyperspectrales, en volume et localisation. Une dernière étape consiste à utiliser les cartes numériques des propriétés du sol ainsi produites pour alimenter des modèles spatialisés d'érosion (STREAM) ou de bilan hydrique des cultures (AQUACROP). Pour déterminer la valeur ajoutée de cette nouvelle approche, les résultats sont comparés avec ceux de précédents projets ayant utilisé ces mêmes modèles avec les données pédologiques existantes.

Résultats majeurs

La première partie du projet montre que la cartographie numérique par imagerie hyperspectrale permet de prédire sur de grandes étendues spatiales et à des résolutions très fines, certaines des propriétés usuelles des sols (granulométrie, pH, CEC, fer, CaCO₃). Les motifs d'organisation de la couverture pédologique peuvent être ainsi perçus à des finesses inégalées. Sur un plan finalisé, les gains



Estimation spatiale des taux d'argiles de surface sur la région du Cap Bon, Tunisie (extrait) par co-krigeage de mesures au sol et d'une image hyperspectrale aéroportée disponible sur 338 km².

DIGISOL-HYMED « Cartographie numérique des sols par imagerie hyperspectrale pour la modélisation environnementale en région méditerranéenne » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LISAH (Laboratoire d'étude des Interactions Sols-Agrosystèmes-Hydrosystèmes). Il associe les Unités EMMAH (Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes) et BioSP (Biométrie et Processus Spatiaux) de l'INRA, l'ENIT (Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis), le CNCT (Centre National de Cartographie et de Télédétection de Tunis), l'INAT (Institut National Agronomique de Tunisie), la DG-ACTA (Ministère de l'Agriculture Tunisien) ainsi que l'ACPA (Australian Centre for Precision Agriculture). Le projet a débuté en janvier 2009 pour une durée de 48 mois. Il bénéficie d'un financement de l'ANR de 478 k€ pour un coût global de 1,46 M€.

de précision obtenus pour les diagnostics et pronostics en matière d'érosion et de production agricole sont en cours d'évaluation. Sur le plan scientifique, ces résultats ouvrent une perspective nouvelle de compréhension des processus de mise en place des sols dans ces milieux. On notera également la collaboration établie avec le projet ANR LANDSOIL (VMCS 2008).

Production scientifique et brevets

surveys to map soil properties over a region. Eur. J. of Soil Sci., 63: 110-119.

Querghemmi W., Gomez C., Nacer S., Lagacherie P., 2011.

Applying blind source separation on hyperspectral data for clay content estimation over partially vegetated surface. Geoderma 163 (3-4): 227-237.

Gomez C., Coulouma G., Lagacherie P., 2012. Regional predictions of eight common soil properties and their spatial structures from hyperspectral VIS-NIR data. Geoderma (accepted).

Gomez C., Lagacherie P., 2012. Impact of the spatial resolution on soil properties prediction by PLSR and hyperspectral airborne data. Int. J. of Appl. Earth Obs. and Geoinf. (submitted).

Programme « Blanc », édition 2005

HYDROGEOBAT

L'espace sous la ville :
de nouveaux défis pour le « *design with Nature* »**Ecoulements souterrains en contexte de plaine alluviale urbanisée, leurs impacts géotechniques sur les ouvrages enterrés et le bâti**

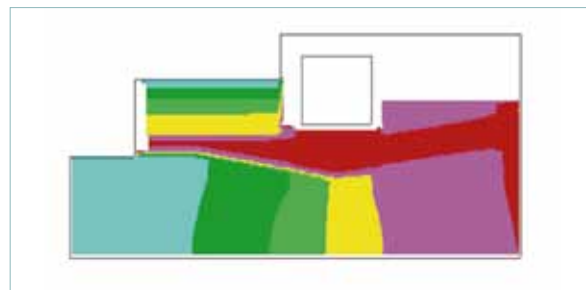
« L'espace sous la ville » concerne urbanistes, ingénieurs, géotechniciens, hydrogéologues, économistes, sociologues. De nombreux défis scientifiques existent, relatifs à une gestion globale de cet espace souterrain, prenant en compte des aspects risques et des aspects ressources. Le projet HYDROGEOBAT s'est placé dans un contexte de plaine alluviale, propre à de nombreuses agglomérations, se focalisant sur la ville de Paris et la problématique d'une crue majeure de type 1910. Dans un environnement urbain, les conditions d'occupation du sous-sol (parkings souterrains, galeries diverses...) constituent des obstacles qui modifient considérablement l'hydrodynamique des nappes alluviales et des nappes phréatiques connectées. Or, les écoulements souterrains jouent un rôle important dans la propagation d'une crue et ont des impacts géotechniques sur les constructions (fondations de bâtiments et ouvrages souterrains). Le projet a analysé et modélisé ces impacts dans la perspective d'apporter de nouveaux éclairages aux documents tels que les Plans de Prévention du Risque Inondation qui considèrent essentiellement l'inondation comme résultant du seul débordement du fleuve, sans par ailleurs analyser les risques induits sur le plan géotechnique.

Observations naturalistes, simulations numériques et techniques satellitaires : une panoplie de méthodes complémentaires

Le projet, de nature transdisciplinaire, a mis en œuvre un ensemble de méthodes : i) analyses naturalistes d'un contexte géologique anthropisé, ii) modélisations numériques de l'hydrogéologie de Paris et des relations entre nappes et rivières, iii) simulations numériques du rôle d'obstacles représentés par des ouvrages linéaires, iv) simulations numériques de plusieurs scénarii de crue de la Seine et mise en évidence des conséquences du point de vue de l'hydraulique souterraine et de la géomécanique (soulèvement ou affaissement des terrains) et v) analyse des performances de deux méthodes interférométriques satellitaires pour suivre, sur des séries chronologiques, les faibles déplacements au sol et identifier les causes possibles, plus particulièrement celles correspondant aux fluctuations de niveaux piézométriques. Les retours d'expérience issus des archives de la crue de 1910, les contrôles terrain, les échanges avec plusieurs Institutions concernées par le risque inondation à Paris (Ville de Paris, SNCF, RATP, etc.) ont constitué un fil conducteur du projet.

Résultats majeurs

Le projet HYDROGEOBAT a mis en évidence les multiples impacts des mouvements de nappes phréatiques sur le bâti et les ouvrages souterrains, précisant les apports et les limites des modélisations hydrogéologiques et géomécaniques. Le champ d'application des techniques interférométriques pour les mesures des faibles déplacements au sol a été cerné. Le projet a mis en lumière des actions techniques et scientifiques nécessaires à conduire, à savoir : i) le



Modèle hydro-géomécanique au droit d'un tunnel SNCF (RER C), en bordure de Seine, le sous-sol de l'ouvrage étant renforcé par des colonnes de « jet-grouting ». Simulation des charges hydrauliques en situation de crue de Seine à la cote 32 m, représentées par des courbes d'iso-valeurs, avec le code Flac d'Itasca. Puis, analyse de l'écoulement au travers des alluvions anciennes et par submersion du terrain naturel, analyse numérique des déplacements des terrains et suivi par interférométrie radar (non représenté).

HYDROGEOBAT « Impacts géologiques et géotechniques des mouvements de nappes phréatiques sur le bâti : analyse, mesure, simulation, prévention » est un projet de recherche fondamentale à vocation finalisée coordonné par ARMINES (Centre de Géosciences). Il associe l'Université Paris- Est Marne-la-Vallée (Equipe Observation de la Terre et Informations Géographiques). Le projet a débuté en décembre 2005 pour une durée de 36 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR de 400 k€ pour un coût global de 845 k€.

développement du réseau piézométrique à Paris et en banlieue, ii) la réalisation d'une base de données sous SIG, relative aux éléments naturels et artificiels constituant le sous-sol parisien, iii) la développement d'un modèle hydrogéologique, plus complet, de Paris et sa banlieue et iv) la mise en œuvre des données apportées par les derniers satellites mis en orbite pour améliorer la mesure des faibles déplacements au sol.

Production scientifique et brevets

Cojean R., and the HYDROGEOBAT team, 2006. Analysis of geotechnical impacts resulting from fluctuations of a ground watertable in the urban environment and the flooding context of an alluvial plain. Aquifer Systems Management. Int. Symp.. 150^{ème} anniversaire Darcy's law. Dijon.
Deveughèle M., et al., 2009. Analyse et caractérisation de l'interaction eau souterraine/ouvrage souterrain. Bull. of Engng Geol. and Environ. Vol., 68-N°3.
Defontaine B., et al., 2009. PSI and DINSAR interferometry useful tools for monitoring earth movement. EGU Vienne, Vol.11.
Cojean R., 2010. Impacts géologiques et géotechniques des mouvements de nappes phréatiques sur le bâti : analyse, mesure, simulation, prévention. Colloque franco-suisse sur « La gestion de l'espace sous la ville : des géosciences à l'urbanisme ».

Programme « Blanc », édition 2008

TRANSEK

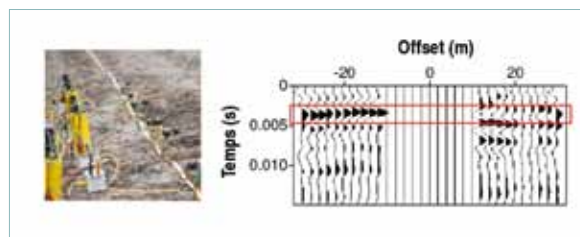
Détection des fluides par mesures électriques liées à la propagation des ondes sismiques

Comprendre et mesurer les conversions entre énergie mécanique et électrique pour la détection des fluides dans le sous-sol

L'objectif du projet est de mieux connaître les fluides et leur répartition dans la croûte terrestre. Cette connaissance est attendue dans les domaines de la gestion des réservoirs hydrauliques ou d'hydrocarbures, l'exploitation des réservoirs fracturés et géothermiques, la remédiation des aquifères contaminés, la faisabilité du stockage de CO₂ et la prospection des ressources dans les régions glacées. Il s'agit de rechercher une méthode non-invasive permettant de détecter à distance différents fluides (eau, glace, huile, gaz) avec une résolution spatiale suffisante pour caractériser non seulement leurs profondeurs mais aussi leurs géométries. Cette méthode doit permettre de détecter des interfaces entre couches de propriétés électriques différentes, reliées au contenu en fluides et à leur nature.

Les conversions sismo-électromagnétiques versus les méthodes sismiques

Les méthodes sismo-électriques combinent la sensibilité des méthodes électriques au contenu en fluide à la résolution des méthodes sismiques. Elles consistent à détecter les signaux électromagnétiques créés par les mouvements relatifs entre fluides et matrice rocheuse, dus à la propagation d'ondes sismiques. C'est parce qu'il existe des particules chargées dans l'eau que des signaux électromagnétiques peuvent être créés, lorsque l'eau est mise en mouvement lors du passage des ondes sismiques. Ces signaux étant de faibles amplitudes, le projet TRANSEK vise à des développements technologiques tels que des pré-amplificateurs adaptés, et à de nouvelles techniques de traitement du signal. Le projet s'attache aussi à mieux comprendre le processus physique à la base de ces conversions sismo-électromagnétiques, c'est à dire l'électrofiltration couplant les flux hydriques et électriques. Nous cherchons à quantifier l'influence de certains paramètres, en particulier la teneur en eau, à la fois sur l'électrofiltration et sur les conversions sismo-électriques. Ces études sont menées par des expériences aux échelles du laboratoire et du terrain et par des modélisations.



Dispositif expérimental de terrain pour les mesures de conversions sismo-électriques (gauche) et traitement des mesures électriques avec mise en évidence d'une interface (en rouge) entre couches de propriétés physiques différentes (droite).

TRANSEK « TRANSient ElectroKinetics : Seismo-electromagnetic conversions in porous media » est un projet de recherche fondamentale coordonné par l'IPGS (Institut de Physique du Globe de Strasbourg). Il associe le LFCR (Laboratoire des Fluides Complexes et de leurs Réservoirs) et ISTerre (Institut des Sciences de la Terre). Le projet a débuté en avril 2009 pour une durée de 60 mois. Il bénéficie d'un financement de l'ANR de 446 k€ pour un coût global de 1,9 M€.

Résultats majeurs

Les pré-amplificateurs devraient permettre l'acquisition correcte des signaux électriques, pour déduire leur amplitude exacte, et ainsi mieux caractériser la nature des fluides. Nous avons déduit une loi d'électrofiltration en fonction de la teneur en eau qui pourra être utilisée dans les modèles pour les applications de terrain. Les résultats mettent également en évidence l'influence de la perméabilité sur ces signaux et une nouvelle technique de filtrage permettant d'extraire les signaux de très faibles amplitudes a été développée.

Production scientifique et brevets

Warden S., Garambois S., Sailhac P., Jouniaux L., Bano M., 2012. Curvelet-based seismoelectric data processing. *Geophys. J. Int.*, (submitted).
Sénéchal P., Bordes C., Barrière J., 2011. Spectral analysis of seismoelectric signal for water saturation monitoring. *Near Surface, the 17th European Meeting of Environ. and Engng Geophys.*, Leicester.
Allègre V., Jouniaux L., Lehmann F., Sailhac P., 2010. Streaming potential dependence on water-content in Fontainebleau sand. *Geophys. J. Int.*, 182 : 1248-1266.

glossaire

GLOSSAIRE DES PRINCIPAUX ACRONYMES

A

AIEnv :

Alliance nationale de recherche pour l'Environnement

AMMA :

Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine

ANR :

Agence Nationale de la Recherche

API :

Année Polaire Internationale

ARP :

Atelier de Réflexion Prospective de l'ANR

B

BRICS :

Brésil, Russie, Inde, Chine, Afrique du Sud

C

CEI :

Communauté des Etats Indépendants

CEPS :

Changements Environnementaux Planétaires et Sociétés (Programme de l'ANR)

CNES :

Centre National d'Etudes Spatiales

CNRS :

Centre National de la Recherche Scientifique

CSD :

Comité Scientifique Disciplinaire de l'ANR

D

DCE :

Directive Cadre sur l'Eau

DIVERSITAS :

International Programme of Biodiversity Science

E

ECCO :

Programme National ECosphère COntinentale

EGU :

European Geosciences Union

ENSO :

El Nino Southern Oscillation

ERC :

European Research Council

ESF :

European Science Foundation

ESSP :

Earth Science System Partnership

G

GCM :

Global Circulation Model

GES :

Gaz à Effet de Serre

GICC :

Gestion et Impacts du Changement Climatique (Programme du MEDDE)

GIEC :

Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat

GPS :

Global Positioning System

G8-HORCS :

Head Of Research Council of G8 Countries

I

IA :

Investissements d'Avenir

ICSU :

International Council for Science

IGFA :

International Group of Funding Agencies for Global Change

IHDP :

International Human Dimension Programme

INEE :

INstitut Ecologie et Environnement du CNRS

INSU :

Institut National des Sciences de l'Univers du CNRS

IPEV :

Institut Polaire Paul-Emile Victor

IPGP :

International Programme on Geosphere and Biosphere

IPICS :

International Partnerships in Ice Core Sciences

ITCZ :

Inter Tropical Convergence Zone

J

JCJC :

Jeunes Chercheurs, Jeunes Chercheuses
(Programme non-thématique de l'ANR)

M

MDES :

Modèle de Descente d'Echelle Statistique

MEA :

Millenium Ecosystem Assessment

MEDDE :

Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et
de l'Energie

MESR :

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche

MISTRALS :

Mediterranean Integrated Studies at Regional And
Local Scales

MoU :

Memorandum of Understanding

N

NASA :

National Aeronautics and Space Agency

O

ONU :

Organisation des Nations Unies

P

PNACC :

Plan National d'Adaptation au Changement
Climatique.

PNRH :

Programme National de Recherche en Hydrologie

PPRI :

Plan de Prévention du Risque Inondation

S

SDAGE :

Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des
Eaux

SIMI6 :

Système Terre, environnement, risques (Programme
de l'ANR)

SO :

Service d'Observation

SOERE :

Système d'Observation et d'Expérimentation au long
terme pour la Recherche en Environnement

T

TAAF :

Terres Australes et Antarctiques Françaises

V

VMCS :

Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés (Programme
de l'ANR)

W

WCRP :

World Climate Research Programme

Z

ZA :

Zone Atelier du CNRS -INEE

Création : Sally Lewis
Réalisation : www.sbba.fr
Impression : Navis
Dépôt légal à parution
ISSN : 2258 9309



212 rue de Bercy - 75012 Paris
Tél. : +33(0)1 78 09 80 00
www.agence-national-recherche-fr

Environnement et Changements Globaux : des aléas à la vulnérabilité des sociétés

Observer, Détecter, Caractériser, Analyser, Modéliser,
Prévoir, Informer, Communiquer

Les changements à grandes échelles (dit globaux) de l'environnement sont devenus un enjeu majeur dépassant les frontières, avec à terme d'importantes conséquences sur les écosystèmes continentaux ou marins, les acteurs des cycles majeurs (énergie, eau, carbone), les producteurs de ressources, de biens et de services.

D'une région à l'autre, ces changements sont ressentis différemment en fonction des caractéristiques économiques, sociales, culturelles et politiques des populations touchées. On parle alors de « vulnérabilité » ou « de capacité d'adaptation » qui représentent respectivement les tendances d'un système à être affecté par un changement ou à pouvoir s'ajuster pour atténuer les dommages potentiels et tirer parti des opportunités.

L'ANR a encouragé un changement de paradigme en visant à lier les études des aléas aux approches plus novatrices et complexes de la vulnérabilité et de l'adaptation des milieux. Des programmes associant les sciences de la Terre et de la vie, les sciences humaines et sociales, et des acteurs de la société ont été mis en place pour appuyer l'effort de recherche, faire émerger et consolider un leadership français dans ce domaine stratégique et le diffuser au sein des organismes scientifiques internationaux dédiés aux programmes sur la co-évolution de l'environnement et du développement soutenable des sociétés humaines.

Ce Cahier dresse ainsi, sur la période de 2005 à 2009, le panorama des 110 projets financés par l'ANR, ainsi que des 8 projets abondés par le programme « Gestion et Impacts du Changement Climatique » du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie. Il a pour but de contribuer à éclairer les chercheurs, les décideurs et le public intéressé sur les avancées fondamentales ou finalisées dans ce vaste domaine. Il présente également les nouvelles impulsions depuis 2009 et les perspectives abordées dans le contexte international des enjeux « Science-Société ».



Au service de la science et de la technologie, l'ANR apporte sa pierre à l'édifice des connaissances et des innovations afin de répondre aux besoins de notre société.

Les Cahiers de l'ANR devraient permettre au plus grand nombre d'appréhender les actions de recherche soutenues par l'ANR sur des sujets essentiels pour notre futur.

www.agence-nationale-recherche.fr