

Prospective 2006-2011

De nouveaux enjeux scientifiques

Lors du dernier colloque de prospective de Lille (21-23 novembre 2005), les réflexions ont notamment porté sur la définition des priorités et orientations scientifiques à privilégier, de manière à répondre au mieux à la demande sociétale : cinq enjeux scientifiques majeurs, trois objectifs intégrateurs et trois zones atelier sur lesquelles la communauté devra se concentrer dans les dix prochaines années ont été identifiés.

I. La demande sociétale

La communauté scientifique est de plus en plus sollicitée par les différents acteurs de la société (institutions, industriels et citoyens) pour répondre à leurs interrogations concernant les impacts environnementaux des activités humaines : évaluation de l'intensité du réchauffement climatique, prévision des pics estivaux d'ozone dans et autour des grandes agglomérations, éventuelle recrudescence des événements cataclysmiques eutrophisation des eaux côtières...

Lorsqu'on les rapproche des problèmes scientifiques qui les sous-tendent, ces questions peuvent être posées en des termes différents :

- dispose-t-on des outils opérationnels nécessaires à la surveillance ou à la prévision ?
- quels réseaux et quels types de mesures doit-on mettre en œuvre pour remplir ces tâches ?
- dispose-t-on de l'expertise suffisante pour fournir aux pouvoirs publics les éléments scientifiques permettant d'apprécier l'effet réel de telle ou telle mesure de régulation de la pollution ?
- quelle est la tendance à long terme de tel ou tel phénomène ?
- dispose-t-on d'outils technologiques permettant de limiter, voire d'éviter, les émissions éventuellement dangereuses ?
- quels sont les véritables risques selon les populations ?
- peut-on anticiper des risques futurs liés au développement technologique ?
- quelles sont, aux différentes échelles, les éventuelles conséquences socio-économiques des modifications de l'environnement ?

Ceci nécessite donc la maîtrise d'un ensemble cohérent de trois éléments en interaction :

- une recherche et un développement technologique de pointe ;
- la création de normes et de règles de droit ;
- des systèmes de détection, de surveillance et de contrôle.

Par ailleurs, il est indispensable de disposer d'agents de médiation pour transcrire ces demandes sociétales en questionnements scientifiques perceptibles par la communauté. Un bon exemple de ce type de relais est celui joué par l'Ademe dans de nombreux domaines concernant l'environnement.

La communauté scientifique n'est pas toujours prête à répondre à ces défis, car soit des travaux complémentaires de recherche fondamentale qui n'avaient pas été identifiés sont nécessaires, soit au contraire ces questions considérées comme déjà résolues nécessitent un transfert vers une mise en œuvre opérationnelle plutôt du ressort d'autres instances. Comment peut-elle s'organiser pour répondre à ces demandes ? Quelques pistes de réflexion peut-elle proposer suivant le type de demande et/ou le contexte national ou international, européen notamment ?

Elle doit s'avérer capable de percevoir ces demandes, de les analyser et d'identifier celles pour lesquelles un réel besoin de recherche s'avère nécessaire. Sa mission consiste alors à mener les études amont requises et/ou à élaborer les « prototypes » qui permettront de démontrer la capacité des outils développés à satisfaire la demande, mais également à apporter un soutien en expertise lorsque celui-ci est sollicité par les institutions et à s'assurer que le public est correctement informé du résultat des recherches menées sur ces questions.

II. Cinq enjeux scientifiques majeurs

Depuis 2000, la communauté a mis en place des actions d'envergure qui ont contribué à apporter à ces questions des éléments de réponse qui sont détaillées dans la partie « Bilan ». Les enjeux ne sont pas remis en cause dans l'exercice de prospective actuel, mais sont examinés sous une perspective différente, afin de prendre en compte les interrogations des citoyens, notamment sur les risques naturels ou les impacts actuels et futurs des perturbations induites par les activités humaines. Cinq enjeux majeurs ont été identifiés pour consolider notre connaissance des enveloppes fluides (océan, atmosphère, glace...) et leur rôle au sein du Système Terre.

- Améliorer les connaissances fondamentales sur certains processus clés encore mal quantifiés :
 - le rôle des nuages dans le système atmosphérique
 - la contribution de l'océan à la variabilité climatique
 - l'impact des petites et moyennes échelles sur la dynamique des fluides et le transport des traceurs
 - les fonctions biologiques des communautés auto- et hétérotrophes
 - les flux de transformation de la matière par des mécanismes biologiques et chimiques, dans l'atmosphère, l'océan et sur les surfaces continentales
- Développer les études aux interfaces, en se focalisant sur les processus d'échange et/ou de couplage (interfaces troposphère-stratosphère, biosphère-hydrosphère, biosphère-atmosphère, océan-atmosphère, océan-sédiment, océan côtier-océan hauturier)
- Décrire la variabilité du Système Terre, entre autres aux basses fréquences, à l'aide des données satellitaires et des Services d'observation, afin notamment de mieux séparer le signal naturel du signal transitoire anthropique
- Progresser dans la prévisibilité, que ce soit par l'intermédiaire d'études théoriques sur le comportement du système ou par des techniques pertinentes d'assimilation de données
- Aller vers une meilleure représentation des impacts locaux des perturbations humaines (pollution régionale, écosystèmes côtiers) et vers une prévision réaliste du climat et de l'environnement à l'échelle globale et régionale, un passage privilégié et nécessaire vers la prévision opérationnelle et la demande sociale

III. Trois objectifs intégrateurs

Afin d'assurer l'intégration des connaissances issues des enjeux scientifiques précédents, trois objectifs intégrateurs ont été définis. Résolument pluri- et transdisciplinaires, ils sont indispensables pour une connaissance intégrée du Système Terre et de son évolution.

III.1. Réduire les incertitudes sur la modélisation du Système Terre

La réduction des incertitudes sur la modélisation du Système Terre est l'objectif d'une large communauté de climatologues, météorologues, glaciologues et océanographes. Pour atteindre un degré de réalisme de plus en plus exigeant, les modèles ont été enrichis en termes de processus et de couplage entre sous-systèmes, sur une gamme d'échelle de plus en plus large. Cependant, si cette sophistication prend en compte la mise en évidence de nouveaux cycles ou de nouvelles interactions entre systèmes et de ce fait améliore la représentation du Système Terre, elle ne conduit pas à la réduction des incertitudes. Quant à l'incertitude elle-même, elle s'exprime relativement à un objet d'étude dans un contexte spatio-temporel défini : les différentes méthodes de quantification (voire de modélisation) des incertitudes et de leur évolution doivent donc être adaptées à chaque objet et explorées simultanément.

Cette question scientifique sera donc abordée sous trois angles différents et complémentaires :

- Améliorer et consolider la représentation des processus
- Contraindre le système par un cadre intégrateur et une approche multi-échelles
- Quantifier les incertitudes

Cinq recommandations et moyens à mettre en œuvre

- Soutenir les activités de développement des outils de modélisation en mettant en place le soutien nécessaire (financement et personnels) au développement des codes et des capacités de calcul ; de même, soutenir les efforts nationaux en phase avec les orientations prises au niveau international en ce qui concerne notamment la standardisation des méthodes de couplage et le développement de systèmes d'assimilation adaptés aux couplages
- Renforcer la démarche « expérimentation → modélisation explicite → paramétrisation → transfert d'échelles → tests » dans les modèles de grande échelle, démarche qui passe par l'implication des modélisateurs dans la définition des grandes campagnes de terrain et des missions spatiales
- Pérenniser les observations (via par exemple les Services d'observation de l'INSU), enrichir les bases de données, améliorer les couvertures spatiale et temporelle des périodes clés des climats passés, travailler à la reconstitution des forçages climatiques et enfin structurer la communauté nationale pour l'aider à formaliser ses besoins supplémentaires en ré-analyses, par exemple pour les événements extrêmes
- Favoriser les études de détection et d'attribution pour développer un cadre intégrateur et une approche multi-échelles et les étendre à de nouvelles échelles de temps et d'espace, à de nouveaux paramètres et à des périodes clés du passé
- Mettre en place des systèmes d'observation « modèles-observations-opérateurs » ouverts et modulaires pour la recherche et l'opérationnel, assurer les formations sur les outils techniques correspondants, et développer la possibilité de couplage et d'échange entre modélisateurs et observateurs grâce à des normes communes

III.2. Analyser les processus et flux aux interfaces

Les systèmes dynamiques ouverts de notre environnement (atmosphère, océan, cryosphère, biosphère, fonds océaniques...) évoluent en réponse d'une part aux transformations et transports internes à chaque milieu, et d'autre part aux sources et puits, parmi lesquels on distingue les flux aux interfaces. Les interfaces sont définies comme étant les lieux caractérisés par de forts gradients, voire des discontinuités, de matière ou d'énergie, entre les compartiments du Système Terre ou au sein de ces compartiments.



Interface glace-mer-continent, campagne ANTIX XIII 3 / Drake à bord du Polarstern organisée par AWI. © LOCEAN/CNRS

Les interfaces sont des lieux d'échange et ces échanges jouent un rôle majeur dans les bilans d'énergie (thermodynamique, cinétique) et de masse (eau, constituants chimiques ou biologiques) : leur intensité, leur sens et leur évolution dans le temps et l'espace conditionnent en grande partie la variabilité des compartiments, avec des incidences notamment sur l'évolution temporelle des systèmes et donc du climat. Le lien indissociable entre flux, bilans et processus doit être étudié de façon coordonnée, en tenant compte des différentes échelles spatio-temporelles. Les interfaces sont aussi des lieux d'interaction entre les processus physiques, les processus chimiques et les organismes vivants. Ces interactions peuvent affecter l'interface elle-même et modifier en retour les flux échangés. Enfin, les interfaces sont souvent des lieux de transformation chimique. Les

deux processus (échange et transformation) doivent être étudiés en parallèle. Seules des recherches pluridisciplinaires permettront de comprendre et modéliser les échanges associés aux interfaces.

Dans les années à venir, les problèmes scientifiques et les questions prioritaires concerneront essentiellement trois thématiques :

- L'hydrodynamique des interfaces et son impact sur les bilans d'énergie et de masse et, dans l'océan, sur la biologie (le long des marges océaniques en régions côtières, au niveau de la couche limite au fond des océans, à l'interface eau/atmosphère, à la limite glaces/océan, etc.)
- Les particules et leurs interactions avec le milieu environnant
- Les processus aux interfaces et leur modélisation

Quatre recommandations et moyens à mettre en œuvre

- Développer des méthodes (observations, modélisations, outils statistiques) permettant de caractériser et prendre en compte la variabilité des processus aux différentes échelles temporelles (du jour à l'année)
- Documenter des zones critiques souvent sensibles aux événements extrêmes, ce qui implique des mesures régulières et adaptées, et le renforcement de l'automatisation des capteurs (dans l'océan, l'utilisation de vecteurs automatisés déployables rapidement, comme les gliders ou les AUV, est très prometteuse) ; de même, faire évoluer la gestion actuelle des avions et navires côtiers pour favoriser une meilleure réactivité et un couplage avec les systèmes d'alerte
- Favoriser une approche expérimentale *in situ* (campagnes ou sites ateliers) multi-paramètres et multi-disciplines en ciblant sur des zones clés identifiées, comme la région méditerranéenne, ce qui aidera au rapprochement entre expérimentateurs et modélisateurs et pourra aussi induire le développement de systèmes, plates-formes ou vecteurs multifonctions, d'appareils embarquables de mesures chimiques et biologiques à haute résolution et d'instrumentations dédiées à l'observation de l'interface elle-même
- Renforcer la télédétection spatiale qui permet de suivre de façon répétitive les conditions thermodynamiques ou biologiques de surface à moyenne ou grande échelle, complétant ainsi les mesures *in situ* et à cet égard, encourager les projets relatifs aux observations aéroportées visant à améliorer la connaissance de la théorie de la mesure

III.3. Étudier les impacts des changements globaux

Par changements globaux, ou changement environnemental planétaire, il faut entendre l'ensemble des modifications de différentes natures (climat, composition de l'atmosphère, désertification, eutrophisation, pollution, érosion de la biodiversité et des habitats...) qui, en affectant les écosystèmes aquatiques et terrestres de notre planète, altèrent sa capacité à y soutenir la vie.

Le défi principal quant aux impacts des changements globaux actuels et futurs tient dans la capacité de la communauté à développer des recherches qui puissent simultanément identifier et mesurer pour un ensemble de régions distinctes :

- l'évolution des différents forçages environnementaux (T, UV, dépôts, pH...) liés à des perturbations anthropiques à distance (émissions gaz-aérosols...) ou d'origine plus régionale, voire locale (engrais, aménagements, utilisation-prédation des ressources...)
- les réponses des écosystèmes et de leurs composantes (physiques, chimiques et biologiques) à la conjugaison régionale de ces différents types de forçages.

Comprendre et modéliser ce système complexe (Earth System Science) implique un effort accru de structuration, coordination et intégration des actions de recherche à différents niveaux.

Pour ce faire, la nécessaire pluridisciplinarité, expérimentée dans de nombreux programmes de l'INSU, doit être confortée et évoluer vers l'interdisciplinarité. En effet, si la simple association des compétences disciplinaires est essentielle pour analyser et modéliser la diversité des forçages et des réponses des écosystèmes étudiés, l'interdisciplinarité est quant à elle indispensable pour notamment expliciter et modéliser les liens entre ces forçages et réponses et intégrer les échelles spatio-temporelles de leurs réalisations.

Recommandations et moyens à mettre en œuvre

Il est fondamental de mettre en place une stratégie d'interfaçage entre les études portant sur les causes des changements globaux et celles portant sur les systèmes impactés. La structure de programmation initialement mise en place suite à la prise de conscience, dans la dernière décennie, du changement climatique a abouti à des programmes qui n'ont pas suffisamment favorisé les échanges entre disciplines. Seul le programme GICC (Gestion et impacts du changement climatique) du MEDD a permis le développement d'un dialogue fécond entre des communautés variées. S'il est très orienté par la demande sociétale et ne développe de ce fait que des approches finalisées, il s'appuie néanmoins sur un corpus de connaissances plus fondamentales, que l'INSU se doit donc d'accroître dans un esprit d'interdisciplinarité.

La mise en œuvre d'actions concrètes impliquant une réelle interaction entre diverses communautés est donc indispensable. Une réflexion est en cours sur la mise en place, sous l'égide de l'INSU, d'un programme pluri- et interdisciplinaire sur la « Régionalisation du changement environnemental planétaire ». L'objectif est d'impulser une dynamique entre les disciplines « océan-atmosphère », « surfaces et interfaces continentales », « sciences du vivant » et « sciences humaines et sociales » autour des questions portant sur la dynamique des gaz à effet de serre, des ressources en eau et des ressources alimentaires, et

concernant la santé et la distribution des risques. Cette réflexion doit être approfondie dans le contexte du programme international ESSP (Earth system science partnership).

Par ailleurs, l'INSU doit continuer à assumer son rôle dans la modélisation du climat, en portant ses efforts sur l'observation et la modélisation des systèmes, ce qui est d'ailleurs l'un des objectifs européens de GMES auquel il participe activement, et poursuivre la mise à disposition des scénarios d'évolution climatique, analysés par les modélisateurs, auprès de l'ensemble des communautés s'intéressant aux impacts directs ou indirects du climat. Il doit également continuer à soutenir les moyens mis en place pour le suivi des observations (Services d'observation et ORE), en s'assurant du bon fonctionnement de ces services et de leur adéquation à l'étude des causes et conséquences des changements globaux et de leur régionalisation, et en suggérant éventuellement des regroupements.

IV. Trois zones atelier à privilégier

Afin de pouvoir se coordonner dans les recherches à venir, la communauté des scientifiques travaillant sur l'océan et l'atmosphère a choisi de se regrouper sur des « zones atelier ». Ces zones atelier sont des régions critiques du globe terrestre, sensibles aux événements extrêmes, auxquelles la communauté a décidé de particulièrement s'intéresser en raison de leurs singularités. Trois zones atelier ont été choisies : la Méditerranée, les régions polaires et les régions tropicales.

IV.1. La région méditerranéenne

La région méditerranéenne constitue un lieu privilégié pour l'étude des couplages océan-atmosphère-hydrologie-écosystèmes. Un bassin océanique quasi-fermé, une orographie marquée sur son pourtour, un climat très contrasté et une forte urbanisation sont des particularités géographiques qui donnent au domaine méditerranéen une complexité particulière et une sensibilité aux changements globaux. Les interactions et rétroactions des différents domaines de ce bassin jouent un rôle prépondérant sur les dynamiques géophysiques et biologiques de cette région. Elles sont aussi à l'origine d'événements extrêmes qui l'affectent particulièrement : pluies intenses et crues en automne, surcôtes, vents violents et fortes houles associées ou non aux cyclogénèses méditerranéennes, sécheresses avec feux de forêt en été.

Une des composantes de cette étude consistera à améliorer la compréhension du « cycle de l'eau sur le bassin Méditerranéen », en considérant les différents compartiments (océan, atmosphère, surfaces continentales) et leurs couplages. Le bilan hydrologique du bassin sera quant à lui examiné sous deux angles : celui des « événements extrêmes » et celui de la « régionalisation climatique » du changement global.

Une autre composante sera dédiée aux impacts des phénomènes climatiques et hydrodynamiques sur la production et la transformation des espèces chimiques et biologiques dans la zone d'interface entre le côtier et le large.

IV.2. Les régions polaires

Les régions polaires sont particulièrement vulnérables au changement climatique induit par les activités humaines. Celui-ci est déjà visible dans le Grand Nord et va très rapidement bouleverser ses écosystèmes fragiles. Quel est le devenir de la banquise arctique ? La circulation océanique est-elle en train de se modifier suite à la fonte des glaces ? Comment les calottes et les glaciers polaires vont-ils contribuer à la hausse du niveau des mers ? À quelle échéance la couche d'ozone va-t-elle se reconstituer ? Plus généralement, quel est l'impact de l'homme sur le changement climatique et la pollution en régions polaires ? Enfin, la déstabilisation des zones englacées est-elle susceptible d'entraîner l'irréversibilité de ce changement climatique ?

Ces grandes questions scientifiques et sociétales sont au cœur des objectifs de l'Année Polaire Internationale (API, 2007-2008) qui va permettre de mobiliser simultanément plusieurs milliers de scientifiques provenant de plus de 50 nations. La communauté française va se focaliser sur l'étude des océans, de l'atmosphère, des calottes polaires et des glaciers.

IV.3. Les régions tropicales

L'étude des phénomènes tropicaux présente un intérêt scientifique majeur en raison de la sensibilité du climat global à ces phénomènes, sensibilité liée à l'importance de ces régions en tant que source d'énergie pour l'océan et l'atmosphère et aux rétroactions qui s'y produisent. Ce type d'étude répond aussi à des motivations appliquées importantes. L'objectif est de mieux comprendre les processus mis en jeu et d'évaluer les impacts du changement global dans ces régions, en relation avec l'évolution déjà observable du cycle de l'eau. Les efforts devront porter sur plusieurs thèmes : la variabilité et la sensibilité climatiques, les variations du climat sur les dernières décennies, la prévisibilité climatique saisonnière, les interactions surfaces continentales-atmosphère, les interactions d'échelle, les processus fondamentaux, les paramétrisations et le domaine des impacts.