

Conseil Scientifique de l'Institut national des sciences de l'Univers

Présidente du CSI

PIERRE Catherine

Membres de la section

AGHANIM Nabila

ARNAUD Monique

CAMPILLO Michel

CHARENTREUIL Sylviane

DESBOEUFs Karine

FARRA Véronique

FORVEILLE Thierry

GREGOIRE Michel

GUILLAUME Christian

HAMMER François

JENATTON Liliane

JOBLIN Christine

LERICHE-KILLIJIAN Maud

LEYVAL Corinne

LIATI Anthi

MARI Céline

MASSON-DELMOTTE Valérie

METIVIER François

NERAUDEAU Didier

ROSE Jérôme

ROY Claude

STEHLE Chantal

TAMBURINI Christian

I- Le conseil scientifique de l'INSU

La dimension recherche: positionnement et spécificités de l'INSU

Les grandes questions abordées aujourd'hui au sein des Sciences de la Planète et de l'Univers (SPU) ont trait à la question des origines (de l'Univers, des systèmes solaires, des planètes, de la vie) en Astronomie et en Sciences de la Terre, au fonctionnement des enveloppes superficielles (celles qui supportent la vie) et en particulier à la réduction des incertitudes qui affectent les modèles climatiques pour les sciences de la surface (continent – océan - atmosphère) et aux couplages interne - externe et à la mesure du temps en sciences de la Terre. En raison de la taille et de la complexité des objets étudiés, ces questions demandent à la fois des coordinations internationales et des études fines, fédérant les compétences de plusieurs disciplines. Le CSI de l'INSU, en reprenant les conclusions du précédent Conseil Scientifique de Département Planète Univers, pose délibérément sa prospective à moyen terme autour de la question de l'interdisciplinarité, laquelle nous semble mériter plus de considération et de vrais outils au sein du CNRS que ce dont elle dispose aujourd'hui, que ce soit pour traiter des questions aux confins de la physique et de la matière ou en sciences de l'environnement. Ce choix s'appuie sur une autre spécificité des SPU qui organisent régulièrement des prospectives par champ disciplinaire, lesquelles prospectives (très « bottom up ») aident la direction de l'INSU à orienter ses choix stratégiques sur des échelles de 4 à 5 ans. Il est essentiel de rappeler que l'interdisciplinarité n'est pertinente que lorsqu'elle s'appuie sur des « noyaux disciplinaires » de haut niveau.

Les Sciences de la Planète et de l'Univers (SPU) ne sont pas organisées autour de disciplines au sens de la classification d'Auguste Comte, mais autour d'objets naturels et de milieu. L'étude de ces objets complexes nécessite de faire converger des savoirs et des savoir-faire issus de différentes disciplines (i.e. physique, chimie, biologie, géologie, mathématique, informatique, ingénierie). Les SPU sont donc naturellement pluridisciplinaires de par les objets étudiés, certains d'entre eux amenant naturellement à des études entre les domaines de l'INSU comme c'est le cas pour les exoplanètes mais aussi pour les études de l'évolution de la nébuleuse solaire primitive, de l'évolution climatique et de la météorologie spatiale (cf. encadrés). De plus, les questions posées en SPU peuvent amener à des recherches interdisciplinaires très riches tirant profit de l'univers au sens large comme laboratoire qu'il s'agisse de physique fondamentale (astroparticules, gravitation, relativité) ou de processus physiques et chimiques. Les conditions souvent extrêmes qu'offrent les ob-

jets (i.e. de la Terre profonde aux extrémités de l'Univers, en passant par les fonds océaniques et l'anthroposphère) garantissent à ces disciplines des domaines dans lesquels peuvent être testés et validés des concepts et processus les plus variés allant des fondements de la physique (en astrophysique) aux processus physiques, chimiques et biologiques émergents de la complexité, y compris les origines et évolution de la vie. En retour, une meilleure compréhension des objets et milieux naturellement complexes, de leur fonctionnement et de leur évolution nécessite bien souvent le développement de concepts et d'outils nouveaux, ainsi que de méthodes innovantes susceptibles de contribuer à faire évoluer les sciences connexes. Par exemple, nombre de théories modernes sur le chaos et la complexité ont pris corps pour expliquer la dynamique de phénomènes naturels comme les séismes, les cyclones ou les mouvements d'objets astronomiques.

Les Sciences de la Planète et de l'Univers sont des Sciences de l'Observation qui nécessitent la mise en œuvre d'une activité métrologique de type R&D qui pousse les technologies à leurs limites et pour laquelle le déve-

loppement et la réalisation des instruments s'étalent bien souvent sur plusieurs années. Cette activité essentielle mobilise des équipes diversifiées de spécialistes de différents métiers, induit des liens importants – et souvent peu formalisés – avec des industries petites et grandes proches des laboratoires et implique, de façon structurelle et fondamentale, le maintien d'un corps technique important.

Les Sciences de la Planète et de l'Univers sont basées sur des données dont l'acquisition est assurée soit par des très grands et grands équipements dont la pérennité doit être assurée (télescopes, avions, bateaux, réseaux de stations de mesure au sol), soit par d'autres voies (i.e. missions spatiales, campagnes coopératives, mésocosmes et microcosmes de laboratoire et/ou de terrain, imagerie haute résolution des milieux, outils analytiques, rayonnement synchrotron) et dont l'importance n'est pas moindre. De ce fait, la communauté des Sciences de la Planète et de l'Univers est amenée à gérer (et le sera de plus en plus) de très grandes quantités de flux et de stocks de données multiples et diverses impliquant la construction de Bases de Données et de Systèmes d'Informations (ainsi que leur

Premier exemple de nécessaire interdisciplinarité :

suivi de l'évolution du climat sur Terre par l'analyse des squelettes des organismes calcifiants

Une partie de la compréhension de l'évolution du climat de la Terre se base sur les interprétations paléoenvironnementales déduites des variations de composition chimique des organismes vivants qui fabriquent leur squelette avec du carbonate de calcium. Ainsi la calibration des rapports Mg/Ca, Sr/Ca et Ba/Ca en fonction de la température dans les coraux, les mollusques ou les foraminifères permet de remonter aux conditions de température dans lesquelles ces organismes marins se sont développés. De nombreuses spécialités doivent être mobilisées de concert pour étudier ce problème. On peut citer:

- l'observation minéralogique et la mesure géochimique: le développement de sondes analytiques (ICP-MS couplée à l'ablation laser, nano-SIMS, TEM-EDX, etc.) capables de doser les éléments en trace et les rapports isotopiques à des échelles spatiales de plus en plus fines fait apparaître une variabilité des rapports Cation/Ca dans les carbonates et mettent en évidence la structure complexe (imbrication minéral/matière organique) de ces matériaux.

- l'équilibre chimique et la croissance cristalline: les systèmes Solution Aqueuse-Solution Solide imposent de développer une formulation adéquate des conditions de stabilité des phases minérales substituées. Le développement de techniques telle que la microscopie à force atomique (AFM) permet de voir en direct la construction des phases minérales à l'échelle atomique.

- les variations de la composition de l'eau de mer: le rapport Mg/Ca de l'eau de mer a varié au cours des temps géologiques, avec des conséquences majeures sur la stabilité des carbonates dans l'environnement marin. Ceci exige de développer le calcul des propriétés thermodynamiques de l'eau de mer en fonction de la composition et non pas seulement de la salinité). Rappelons enfin que la construction du diagramme de phase $\text{CaCO}_3\text{-MgCO}_3\text{-(Fe,Mn)CO}_3\text{-H}_2\text{O}$ est un problème majeur de la sédimentologie (et aussi vieux qu'elle).

- les effets vitaux: on désigne sous ce terme « 1) les processus biologiques liés à la croissance des squelettes qui brouillent le simple enregistrement dû à la croissance cristalline, 2) une désignation générique qui cache le fait qu'on ne les comprend pas » (W. Broecker). Ainsi il apparaît que les organismes vivants sont capables de construire leur squelette par un processus qui semble défavorable d'un point de vue énergétique global entre l'eau de mer et le minéral. Deux questions fondamentales se posent. Quel avantage ces organismes tirent-ils de ce processus, sachant que les lois de l'évolution ont tendance à faire disparaître les organismes peu adaptés? Quels avantages ont-ils pu en tirer lors de leur apparition sur la Terre, sachant qu'ils ont trouvé un moyen de survivre, à l'échelle des temps géologiques, à des changements de conditions environnementales qui leur sont devenues défavorables?

On voit donc que l'étude de la substitution cationique dans les squelettes carbonatés des organismes vivants est un exemple d'interdisciplinarité entre les sciences du vivant, la chimie (physique, minérale, analytique), la géologie, l'océanographie, etc., avec des implications importantes sur l'histoire climatique de la planète, au cœur des préoccupations scientifiques de l'INSU.

maintien et leur enrichissement) dont la maîtrise et l'utilisation constituent des « Observatoires Virtuels » nécessitant des personnels spécifiquement dédiés.

La programmation et la mise en œuvre des très grands équipements, la coordination de moyens d'observation multiples la plupart coûteux en ressources humaines, la taille et la complexité des objets d'étude, rendent impérative la définition d'une stratégie nationale et internationale, avec des exercices réguliers de prospective où la communauté scientifique définit les objectifs et identifie et met en priorité les moyens nécessaires. Ces prospectives s'interfacent de plus en plus avec des perspectives plus globales, par exemple la prospective européenne de l'astronomie menée par le programme européen Astronet en 2007-2008, ou celle des Alliances récemment constituées comme ANCRE ou ALLENVI. L'autre impact est la structuration nécessaire des Sciences de la Planète et de l'Univers, qui depuis longtemps se fédèrent autour de programmes nationaux et internationaux, dont les objectifs émanent de réflexions des communautés scientifiques.

L'articulation de la stratégie et de la structuration définies au niveau national et international avec le nouveau paysage de la recherche française (LRU, ANR, Grand Emprunt) est un défi capital pour l'avenir de ces sciences. Le système de recherche doit aussi être aménagé pour prendre en compte la longue durée de nombreux projets d'observation et du déploiement des services associés.

La nécessaire pérennité des Services d'Observation et des Systèmes d'Information, le développement d'actions en R&D, la mutualisation d'activités scientifiques et techniques et des moyens y afférant justifient une politique volontariste de structuration des laboratoires en Observatoires des Sciences de l'Univers (OSU) pour faire face à toutes leurs responsabilités.

L'immense spectre, tant spatial que temporel, des systèmes étudiés, la présence de multiples interactions et rétroactions entre leurs composantes ainsi que le caractère hautement non linéaire de leurs comportements engendrent la complexité. En outre, ces systèmes sont en perpétuelle évolution, de façon naturelle comme la tectonique des plaques ou la météorologie, ou anthropique comme le réchauffement actuel du climat. Leur modélisation exige des outils de simulation numérique dont la complexité (et la fiabilité) est (et sera) justifiée par le besoin de disposer d'outils opérationnels pour prévoir et anticiper les aléas, voire gérer les risques et crises. Cela nécessite de maintenir des capacités de calcul adaptées au plan national ainsi que l'adaptation des centres de calcul aux besoins spécifiques de la simulation.

Enfin, la spécificité des métiers et thèmes de recherches en Sciences de la Planète et de l'Univers requiert des formations spécifiques qui nécessitent l'intégration de solides connaissances des disciplines de base dans un cadre complexe et pluridisciplinaire. La création d'un vivier de jeunes chercheurs et personnels compétents au plus haut niveau pour faire progresser nos connaissances en Sciences de la Planète et de l'Univers doit être reconnue comme primordiale dans le dialogue entre CNRS et Universités.

Second exemple de nécessaire interdisciplinarité :

l'étude des exoplanètes

Les exoplanètes suscitent auprès des scientifiques comme du public un fort engouement. Elles permettent de replacer les questions de l'origine du système solaire et de l'origine de la vie sur Terre dans un plus vaste contexte. Depuis la première découverte des exoplanètes en 1995 à l'Observatoire de Haute Provence, près de 500 planètes extrasolaires ont été détectées par différentes méthodes : perturbations des vitesses radiales, transits, ou imagerie directe, microlentilles, etc. Ces détections apportent des résultats étonnants comme l'existence de planètes très massives (plus de dix fois la masse de Jupiter), le grand nombre de planètes très proches de leur étoile, ou encore l'existence d'exoplanètes dans des conditions extrêmes (restes de supernovae). Les systèmes comprenant plusieurs planètes ne sont pas rares. La sensibilité accrue des télescopes permet désormais de détecter des « super-Terre », planètes plus massives que la Terre mais supposées rocheuses.

D'une façon générale, les planètes extrasolaires se caractérisent par une extrême diversité dans leurs propriétés (orbites, masses, composition) et leurs conditions de formation. Cette diversité dépasse de loin celle de notre système solaire qui pourtant est déjà très riche. Étudiées par divers satellites dont COROT, et des instruments sur des télescopes au sol comme HARPS et NACO à l'ESO, SOPHIE à l'OHP, elles sont détectées principalement dans le domaine optique et essentiellement de manière indirecte. Cependant, la méthode de spectroscopie de transits des planètes a permis l'obtention des premiers spectres planétaires, et d'une étude physique de leur composition chimique (détections de CH₄, H₂O, CO₂) ; une grande variété est là aussi observée.

L'étude des exoplanètes inclut aussi celle de leur environnement, en particulier les propriétés de l'étoile hôte du système. Récemment un cycle d'activité magnétique analogue à celui du soleil a été découvert.

L'étude des exoplanètes fait appel à des domaines très variés des différentes disciplines de l'INSU, au delà du périmètre de l'astrophysique, et des autres Instituts, qui nourrissent le programme Interdisciplinaire « Environnements planétaires et Origines de la Vie » (EPOV), ceci inclut par exemple l'origine des matériaux organiques primitifs du système solaire et plus généralement des systèmes planétaires ou l'étude des processus atmosphériques et géologiques qui conditionnent les environnements planétaires primitifs (sur la Terre ou sur d'autres planètes).

La dimension sociétale et culturelle

Les recherches en Sciences de l'Univers nourrissent abondamment la culture et la curiosité scientifiques de nos concitoyens. L'évolution des contenus des manuels scolaires ou des ouvrages de vulgarisation en astronomie, géologie, planétologie ou océanographie au cours des 30 dernières années et leur succès montrent bien l'impact culturel et social des connaissances acquises par la communauté SPU. Les différents domaines traités par l'INSU attirent les jeunes, soucieux de comprendre l'univers et son avenir. Le questionnement sur les origines et la place de l'homme sur Terre, ainsi que sur son devenir, comporte une dimension philosophique qui a de tout temps profondément influé sur la structuration de la pensée humaine. À une époque de désaffection pour les sciences et la technologie en général, il est important de profiter de cet atout des SPU pour contribuer à (re) développer le goût des sciences pour les générations futures de chercheurs.

La taille et la complexité des objets étudiés font que les fonctionnements de la planète Terre et de l'Univers lointain sont encore mal connus. Or leur rôle fondamental dans l'apparition de la vie, la distribution des ressources et des besoins fondamentaux de l'humanité (eau, nourriture, énergie, matières premières) donnent à l'étude de ces objets une importance primordiale en ce début de 3ème millénaire, en regard à l'augmentation de la pression sociétale (croissance démographique, développement économique, urbanisation galopante), à l'impact sur les ressources naturelles non renouvelables et à la modification de l'équilibre climatique. Cette pression sociétale nécessite une mobilisation des talents et des ressources scientifiques pour pouvoir associer la satisfaction des besoins toujours croissants à un respect de l'environnement, et permettre un développement durable, clé de voûte de l'équilibre du monde de demain.

Parce qu'elle témoigne d'une capacité croissante à prévoir et évaluer l'impact des perturbations et crises (i.e., crues, inondations, étiages et sécheresses, pollutions des eaux, des sols et de l'air, éruptions volcaniques, tremblements de terre), la communauté SPU est (et sera) également soumise à des demandes « sociétales » multiformes de plus en plus prégnantes. Ces demandes donnent aux organismes de recherche en général, et au CNRS en particulier, une responsabilité particulière pour développer des éléments de connaissance fondamentale sur ces phénomènes, et pour acquérir un niveau d'expertise fiable sur les questions de société qui en découlent. Au-delà de la compréhension du monde qui nous entoure, il faut pouvoir l'analyser et prédire ses évolutions possibles, et avoir la capacité de l'expliquer avec des arguments fiables à un public sans l'acceptation duquel il n'est pas possible d'entreprendre les actions nécessaires pour préserver son avenir.

Dans ce contexte, la production de documents pédagogiques sur les méthodologies et l'état de nos connaissances sur des questions comme le climat, la « relation soleil-climat », la montée du niveau marin, les risques naturels ou l'épuisement des ressources est une nécessité incontournable. Pour les laboratoires, cela exige de développer de l'expertise, de renforcer les partenariats avec les agences à vocation plus opérationnelle, les décideurs politiques et les acteurs industriels ainsi que de mener une communication de qualité.

La dimension économique

Les milieux étudiés par SPU sont du domaine du public et touchent à l'environnement direct de l'humanité, qui n'a pas de marché économique au sens étymologique du terme mais le besoin croissant en énergie et matières premières et son impact sur l'environnement ont une dimension « économique » primordiale. L'histoire récente montre que la communauté scientifique ne peut répondre aux questions de la société et participer au progrès économique que parce que ces réponses se fondent sur les avancées de la connaissance, que seule autorise une recherche fondamentale soutenue et dont le rythme est respecté. Par exemple, l'effort de recherche dans le domaine de la métallurgie ne doit pas être conditionné au prix des métaux : ce fut pourtant le cas depuis une vingtaine d'années avec pour conséquence une perte collective de compétence. La remontée des cours et la perspective de l'épuisement des réserves connues ont relancé les programmes d'exploration du sous-sol, induisant une demande significative de cette compétence perdue. Cet exemple souligne la responsabilité des organismes de recherche dans le maintien des compétences de fond.

En ce qui concerne le changement global et le développement durable, trois thèmes cruciaux pour le devenir de la planète Terre permettent d'illustrer des orientations que l'INSU pourrait prendre pour conjuguer les aspects Recherche/Société/ Industrie : les Gaz à Effet de Serre (GES), la gestion de l'eau, et les ressources naturelles minérales et énergétiques.

1/ Le déploiement de solutions intégrées pour la réduction des GES et la protection de l'environnement représente un enjeu majeur aussi bien pour les industriels que pour les gouvernements. Une activité de recherche sérieuse doit donc être menée parallèlement sur la modélisation des impacts de l'activité humaine et sur les comportements sociétaux des diverses communautés cherchant à se développer. Du côté de l'industrie, réduire l'impact écologique de cette croissance nécessitera un très gros effort en R&D, pour lequel un rapprochement industrie - monde académique doit être d'autant plus encouragé que, comme le rapport Stern le souligne, l'ensemble de la société y trouverait son compte, ou comment transformer ce risque en opportunité de rechercher de nouvelles sources d'énergie propre.

2/ De façon similaire, les efforts d'investissement tant en recherche que du point de vue industriel sont nécessaires pour faire face à la contrainte sur la ressource en eau, (quantité, qualité et coût), tant dans les processus de traitement que sur les conséquences des événements hydro-climatiques extrêmes (sécheresse, inondations, vagues de chaleur, tempêtes). Une vision stratégique à 2030 a été élaborée par les différents acteurs et les solutions technologiques innovantes à mettre en œuvre couvrent également un vaste champ allant des sciences de la nature, de l'ingénierie de haute technologie, de la gouvernance, aux sciences sociales, économiques, légales et politiques. Là encore, la conjugaison des efforts industrie - monde académique permettra de mettre cette vision en action.

3/ À long terme, il est clair que notre dépendance aux énergies fossiles et à des ressources minérales limitées n'est pas tenable, tant écologiquement qu'économi-

quement. Un exemple en est l'envolée récente des prix du pétrole qui a attiré l'attention sur les risques de notre dépendance au plan de la sécurité énergétique. La prise de conscience du fait que le monde commence à épuiser ses réserves (de carburant bon marché, d'uranium, de métaux stratégiques) nous oblige à travailler sur une mutation vers des technologies plus sûres et plus propres. Les ressources naturelles minérales et énergétiques nécessitent, pour leur développement, des liens étroits avec les partenaires industriels (ex : Total, GDF-Suez, AREVA, Eramety, Eurogia, Schlumberger) mais aussi avec les autres EPST (IRD), les EPIC (BRGM, IFREMER, ANDRA, IFP, CEA). Un effort important de structuration est en cours et doit être soutenu afin d'étoffer et pérenniser ces liens, mais également d'améliorer la lisibilité de la communauté académique concernée pour que ces partenaires puissent établir des collaborations de recherche bilatérales ou coordonner des actions plus structurées (Actions INSU, programmes, consortiums, appels d'offre ANR) sur ces thèmes. Les questions de recherche concernent principalement les systèmes pétroliers, la dynamique des réservoirs, l'aval des cycles énergétiques et industriels (stockages profonds et CO₂, recyclage), l'hydrogène naturel, les modèles métallogéniques, l'exploration (gisements cachés), le recyclage matière et énergétique de déchets et l'utilisation de matière première secondaire, et la géothermie.

Les relations entre les Sciences de l'Univers et l'industrie spatiale sont essentielles. Grâce au CNES, la France a gardé en Europe son leadership historique et est le premier actionnaire d'Ariane Espace. Les laboratoires spatiaux ont, via les masters et les écoles doctorales, un rôle important dans la formation des ingénieurs du domaine. Le développement d'expériences spatiales a un effet structurant pour l'INSU, en raison des temps importants de développement des projets et de l'ouverture qu'ils permettent vers de nouveaux domaines scientifiques encore inexplorés. Les expériences d'accompagnement au sol ou les théories développées pour préparer ou interpréter ces expériences contribuent directement ou indirectement à l'essor de ce secteur. Les produits développés dans les laboratoires grâce à l'exploitation de données d'observation de la Terre représentent une niche importante – mais pas encore suffisamment valorisée – pour renforcer les liens et transferts entre les laboratoires et les industries. Un effort conséquent devra être fait pour développer cet axe de valorisation. Les relations avec le milieu industriel sont bien évidemment à double sens : intéressés par la prise de contrats pour réaliser les missions spatiales scientifiques, les industriels entretiennent avec les laboratoires de nombreux partenariats (financements de doctorants, actions de R&D, consultance) qui sont de fait des opérations de transfert de technologie.

La connexion avec la société ne sera rendue effective que par une étroite collaboration entre les différents acteurs du monde économique : scientifique, industriel et social. Cela doit passer par le renforcement du lien public - privé qui ne se réalisera que par le partenariat à long terme entre les différents acteurs de la chaîne de valeur scientifique. L'intérêt du renforcement des collaborations industrie – monde académique réside également dans la masse critique atteinte (agrégation scientifique et des ressources) qui permet la définition d'objectifs scientifiques plus ambitieux. Cette stratégie contribue directement à

la mise en place des politiques européennes, et ce, dans l'objectif de Lisbonne des 3% du PIB européen consacrés à la recherche par l'attraction de plus de capitaux privés et par une meilleure focalisation des capitaux publics. En pratique un Euro public bien utilisé, via les programmations nationales ou européennes, doit conduire à 2 Euros investis par le secteur privé, qui ne jouera le jeu que s'il mesure son retour sur investissement : brevets en commun avec les laboratoires, doctorants et post-doctorants en laboratoire industriel ou académique ou mixte, chaires industrielles, implication dans la définition des contenus pédagogiques, etc. Les outils financiers sont là, trop souvent mal utilisés pour engendrer l'intérêt et l'investissement industriel (en contrats ou en mise à disposition de données et de moyens très onéreux, voire inaccessibles pour les labos). Le tryptique scientifique (académie), technologique (recherche finalisée) et industrie (accès au marché) doit se révéler gagnant pour chacun du fait de la complémentarité des différents acteurs, s'il est correctement mis en place (i.e. si chacun mesure dès sa mise en place le gain qui va en résulter).

II- Méthodologie des recherches en Sciences de l'Univers : Une approche couplée

Observation

L'observation est le socle commun à toutes les disciplines de l'INSU. Elle peut avoir une dimension exploratoire (recueillir des informations aux frontières de la connaissance sur Terre et dans l'Univers), thématique (pour répondre à une question scientifique précise) ou encore temporelle (pour l'étude de l'évolution dynamique des systèmes naturels), et donc la nécessité d'observer sur le long terme d'où l'importance de la mise en place de services d'observations, dotés de moyens dont la pérennité dans le temps doit être garantie (télescope, satellites, plateformes de mesure). Les campagnes d'observation sont organisées pour répondre à une question scientifique et se déroulent sur ou à distance du « terrain ».

La très grande variété des objets étudiés et des questions posées en Sciences de l'Univers, ainsi que la taille de certains objets (univers, océan) nécessitent d'établir des priorités et de structurer la communauté autour d'objectifs. La structuration scientifique repose sur la mise en œuvre de programmes nationaux, qui souvent sont le relais de coordinations internationales. Toutefois la multiplicité et la diversité des milieux et des dynamiques des objets naturels étudiés nécessitent de maintenir un équilibre entre grands et petits chantiers ; les grandes questions n'ont pas forcément besoin de grands chantiers. Ainsi par exemple la compréhension d'un objet naturel tel qu'une météorite ou une roche mantellique ramenée en surface par les volcans nécessite de pouvoir replacer les observations physiques, chimiques, isotopiques dans des repères d'espaces et de temps, faisant appel à des techniques et méthodologies multiples.

Recommandation forte : Les programmes nationaux doivent être maintenus et refléter le fruit de réflexion collective des chercheurs, en harmonie avec leurs tutelles : en effet, seule la communauté scientifique est capable

d'identifier l'état des connaissances à une période donnée et les moyens à développer pour progresser. Celle-ci doit donc être impliquée à tous les niveaux de la réflexion prospective et de l'orientation programmatique, ce qui, dans le contexte actuel de la complexification du système de recherche, requiert de veiller à ce que la communication entre les différents niveaux de réflexion/décision soit fluide.

Expérimentation : les développements instrumentaux et l'expérimentation en laboratoire

Les progrès de la connaissance sur les objets des Sciences de l'Univers reposent donc sur l'acquisition de données par l'observation à distance ou in situ, par des collectes de terrain, et en laboratoire pour l'analyse des échantillons collectés ou en support à l'interprétation des observations. L'analyse de ces données permet de découvrir de nouveaux objets et de nouveaux processus, de remettre en question des concepts que l'on croyait acquis, de valider des modèles, de proposer de nouvelles pistes. Les détecteurs, capteurs, dispositifs d'expérimentation en laboratoire, évoluent pour permettre la construction de nouveaux instruments et l'amélioration des performances des instruments existants.

Enrichie par les progrès de la physique, de la chimie, de la biologie et de l'ingénierie, l'activité de Recherche et Développement sur ces instruments de plus en plus sophistiqués est extrêmement importante pour l'étude des objets étudiés en Sciences de l'Univers. Elle requiert un potentiel technique performant et innovant afin de pousser les technologies à leurs limites, avec pour produit des données de plus en plus fines, parlantes et permettant de quantifier des processus.

L'expérimentation en laboratoire, quant à elle, permet à la fois 1) d'interpréter et de valider des observations faites sur le milieu naturel (par exemple en permettant d'étudier plus finement un processus) 2) à l'inverse, de détecter des processus « depuis la paillasse » qui peuvent ensuite donner lieu à des observations dans le milieu afin d'en vérifier l'impact.

Recommandation forte : maintenir des moyens d'expérimentation et de R&D au meilleur niveau pour que les laboratoires de l'INSU restent compétitifs sur la scène internationale.

Modélisation et simulation

La compréhension des systèmes intégrés, macroscopiques et complexes nécessite de coupler observations et simulation numérique. L'intégration des nombreuses données collectées, les différences d'échelles spatiales et temporelles à intégrer pour modéliser ces systèmes complexes requièrent de nouveaux concepts mathématiques. Un des enjeux essentiels pour les années à venir est par exemple de réduire les incertitudes sur les modèles climatiques et de fonctionnement du système Terre.

La plupart des systèmes naturels sont complexes et les processus sont non linéaires. Certains sont caractérisés par d'énormes flux de données, d'autres au contraire par très peu d'informations. Dans ce contexte, il est im-

portant pour nos communautés de veiller aux développements de nouveaux outils mathématiques (probabilistes, assimilation, éléments finis). Un des défis est par exemple de réussir la représentation 4D des milieux complexes avec des sauts d'échelles (spatiale et temporelle) de plusieurs ordres de grandeur, et l'étude des couplages entre les différentes échelles. On note également le besoin d'outils statistiques performants (ondelettes, morphlettes), schémas neuronaux pour l'analyse de données, pour les modèles inverses, pour le contrôle et la validation des modèles, et pour la modélisation d'ensemble.

Un autre enjeu aujourd'hui est de réussir le portage des logiciels d'une plateforme à une autre – par exemple pour tirer le meilleur parti des machines petaflopiques - enjeu très technique qui nécessite du personnel spécialisé.

Recommandation forte : Pour mener à bien ces objectifs, la fusion de compétences entre mathématiques appliquées et Sciences de l'Univers est encouragée sur la base d'outils structurants communs dont le développement devrait reposer sur les questions /objet à simuler (rapprochement INSU-INSMI). A ce titre, il y a effectivement un besoin important en chercheurs numériques spécialisés, et en ingénieurs – programmeurs compétents en algorithmique.

III- Des outils/moyens spécifiques

TGE, plateformes nationales et internationales, développements instrumentaux

Les Très Grands Équipements et plateformes sont un support essentiel à la recherche. Les moyens spatiaux sont aussi utilisés en appui à tous les domaines de recherche soutenus par l'INSU

Ce sont des moyens à construire, développer, entretenir pour faire avancer nos recherches. Rentrent dans cette catégorie :

- les navires,
- les avions,
- les télescopes ,
- les instruments spatiaux,
- les spectromètres et sondes,
- les lignes de lumière sur rayonnement synchrotron,
- l'instrumentation géophysique.

La qualité des données acquises requiert **des compétences analytiques** à la pointe et des laboratoires équipés au plus haut niveau. Les développements instrumentaux requièrent le support de bureaux d'étude et des contacts avec les autres instituts du CNRS. L'ensemble repose sur des personnels qualifiés, au fait de l'évolution des techniques: les formations à ces métiers expérimentaux, exploratoires et spécialisés étant très longues, **la pérennité des postes accompagnée d'une formation permanente** idoine est une stratégie essentielle. En astronomie, les TGE sont pour la plupart réalisés et opérés par des sociétés (ou traités) internationales en collaboration avec d'autres pays : l'Espagne et l'Allemagne pour l'IRAM, le Canada et les États Unis pour le CFH, 14 nations européennes pour l'ESO. Le CNRS se trouve donc engagé à long terme dans la gestion des ces sociétés qui forment et

emploient des personnels hautement qualifiés. Il est crucial que le CNRS respecte ses engagements nationaux et internationaux malgré les aléas dus à la réforme de l'état (RGPP et LOLF) ou aux restrictions budgétaires. Il en va de la crédibilité de notre nation, et de notre potentiel à pouvoir engager les collaborations futures. L'océanographie souffre terriblement aujourd'hui de la très faible programmation des navires de la flotte hauturière dont le très haut niveau d'équipement n'a pourtant rien à envier aux meilleures nations marines. Les principales causes de cette faible programmation sont budgétaires et organisationnelles: il est urgent de les résoudre, au risque de voir la communauté nationale prendre un retard majeur dans ce secteur de recherche par rapport aux autres pays, y compris émergents (Inde et Chine construisent en ce moment des navires d'envergure exceptionnels).

Recommandation forte : Mener une politique dynamique sur les TGE/TGI et pôles d'instrumentation pour que la communauté nationale maintienne voire améliore sa reconnaissance internationale.

Services d'observation

Il est essentiel de comprendre les mécanismes fondamentaux des fonctionnements des systèmes naturels, et cela à toutes les échelles, afin de prévoir les évolutions possibles à différentes échéances. Les observations régulières sur de longues périodes sont donc un dispositif incontournable, à la fois pour la recherche fondamentale et en réponse à des engagements contractuels avec l'état ; la communauté des Sciences de la Planète et de l'Univers est investie d'une « mission de service » pour mener à bien ces observations systématiques des milieux naturels. Les séries de données à long terme (SLT) sur des paramètres ciblés permettent de mieux appréhender les systèmes complexes. Les systèmes étudiés sont pour la plupart planétaires, voire universels : la plupart des SLT nationales sont inscrites dans des dispositifs internationaux.

Les Services d'Observation sont labellisés par l'INSU, avec trois sections pour différentes sous-disciplines (Astronomie-Astrophysique, Sciences de la Terre, Surface et Interfaces Continent-Océan-Atmosphère), et leur liste est régulièrement remise à jour. Les services d'observation en Astronomie-Astrophysique sont définis pour l'essentiel par regroupements fonctionnels qui suivent le chemin d'acquisition et de distribution des données, de l'instrumentation aux centres de traitement et d'archivage, avec aussi des services spécifiques pour la météorologie de l'espace et du temps et pour la surveillance solaire et les relations de l'environnement Soleil-Terre. Pour les Sciences de la Terre, Surface et Interface Continentales et Océan-Atmosphère, la réorganisation en profondeur des services d'observations est motivée par un regroupement autour des objets observés (type de milieu ou objet scientifique). Cette réorganisation coïncide avec la définition et le contour des SOERE fixés par l'alliance ALLENVI.

Il faut noter que labellisation comme service implique que les données produites ou gérées par le service sont mises à la disposition de la communauté scientifique (éventuellement après une « période propriétaire » qui doit être définie pour chaque service).

Les personnels du corps des Astronomes et Physiciens (CNAP), personnels dont les missions, en symbiose

avec la mission de l'INSU, combinent recherche, enseignement et tâches de service dans les services labellisés, sont l'une des forces qui permettent aux OSU des Sciences de la Planète et de l'Univers de mener à bien les tâches d'observation systématique des milieux naturels : leurs compétences scientifiques assurent la pertinence des services, et une part de leur évaluation repose sur leur apport aux services.

Recommandation forte : Maintien des postes CNAP. Des évaluations régulières et des appels d'offre permettent de décider d'arrêter une Série à Long Terme ou d'en mettre de nouvelles en œuvre. Si l'évaluation scientifique des services doit être faite de façon récurrente par des comités ad hoc, leur gestion dépasse le cadre des plans quadriennaux des laboratoires et des financements sur programme et doit impérativement être suivie par les OSU et les tutelles (pour l'attribution des postes et des moyens pluriannuels qui permettent d'assumer la maintenance et la jouvence). Ils sont l'un des éléments essentiels des discussions entre le CNRS/INSU et les Universités.

Bases de données et moyens de calcul

Les bases de données sont à la fois des archives de notre connaissance et des outils exploratoires. L'augmentation du volume et de la complexité du type de données, la nécessité de conserver ces données et de les mettre à disposition de la communauté et des autres acteurs (autres organismes, services publics, grand public), demande de développer des centres de gestion de bases de données. Le Centre de Données astronomiques de Strasbourg (CDS), créé en 1972 par l'INAG en collaboration avec l'INSU, en a été un précurseur. On peut également mentionner les centres de données organisés par pôles thématiques et développés en partenariat avec le CNES (i.e. ICARE, ETHER, POSTEL).

Outre leur rôle de collecte de données sur la durée, de « mémoire environnementale », les centres de gestion de base de données doivent répondre également aux besoins de traitement de ces données qui dépend de leur mode d'obtention. En effet, chaque système d'acquisition pose des problèmes spécifiques, selon les paramètres considérés, l'hétérogénéité spatiale et/ou temporelle du milieu considéré, la détection des données erronées et le traitement des données manquantes. Les recherches en Sciences de la Planète et de l'Univers sont de plus en plus interdisciplinaires et visent à étudier les interactions et les couplages entre des milieux très diversifiés. Elles tendent donc à faire collaborer des domaines scientifiques différents et conduisent donc à des difficultés supplémentaires, liées à l'augmentation de la variété des systèmes d'acquisition mis en œuvre. Ces questions se retrouvent dans la plupart des disciplines, où elles sont traitées généralement au cas par cas par des techniques ad hoc, mises au point souvent empiriquement en fonction des besoins, mais l'interdisciplinarité tend à les faire ressortir, voire à les exacerber, en raison de la multiplication des sources de données.

Ces différents aspects doivent inciter au développement de méthodes plus générales, voire génériques, pour traiter la complexité des Sciences de la Planète et de l'Univers et pour mutualiser les approches au sein de la communauté nationale, à l'instar ce qui est fait avec la

mise en place de l'Observatoire Virtuel.

L'évolution des moyens analytiques et d'observation in situ et depuis l'espace ainsi que l'augmentation de la puissance de calcul disponible pour la modélisation conduisent à l'accroissement des flux de données. Il est donc indispensable de pouvoir traiter au mieux l'information produite et d'intensifier le développement et l'application de méthodes permettant leur analyse systématique.

Recommandation forte : La mise en place de ces centres de gestion des bases de données est donc stratégique pour l'ensemble de la communauté nationale des Sciences de la Planète et de l'Univers. La visibilité internationale de ces centres de gestion doit être améliorée. Elle nécessite une réelle prise de conscience des besoins matériels (moyens de calculs ; espace de stockage et d'archivage ; outils logiciels) et surtout humains où la professionnalisation du métier doit être au cœur de la démarche afin de rendre attractif et pérenne cet investissement.

Éléments de gestion et d'organisation

Les métiers

La recherche c'est d'abord des femmes et des hommes, chercheurs et ITA. Il est essentiel ici d'intégrer la dimension de ressources humaines qui fait souvent défaut. Il faut convaincre les décideurs politiques, mais aussi le grand public, qu'une politique ambitieuse pour la recherche et l'innovation ne peut faire l'économie d'une action prolongée qui passe par un effort programmé et pluriannuel de recrutement afin d'éliminer les effets d'accordéon néfastes mais coutumiers et maintenir un potentiel humain technique fort, permanent et qualifié dans les laboratoires. La France a besoin que ses meilleurs étudiants se tournent vers les métiers de la connaissance, et doit donc leur proposer des carrières attractives. Il convient de trouver un juste milieu entre la circulation des jeunes chercheurs après leur thèse et des situations de précarité prolongée.

Recommandation forte : En ce qui concerne le recrutement des chercheurs, il est essentiel de ne pas réduire le vivier par des fléchages et de consulter le CSI et le séminaire élargi avant tout coloriage.

La situation des ITA est préoccupante, avec des besoins importants dans certains secteurs, et l'urgence d'une revalorisation des carrières pour mettre en adéquation compétences professionnelles et grades effectifs. La période à venir, avec de nombreux départs à la retraite, incite à des effets de biseaux à l'embauche dans certains secteurs, faute de quoi nous devrions payer à terme des pertes de connaissance et de savoir-faire.

Il y a nécessité de faire évoluer le répertoire des emplois types et la référence des métiers dans lesquels sont distribués les IT (exemple : les personnels travaillant sur le traitement des données et les bases de données ne se retrouvent pas vraiment dans les grilles existantes et sont à la marge entre plusieurs BAP).

Dans les années à venir, de nouveaux métiers peuvent émerger, qui restent peut-être à inventer du fait de la demande sociétale. Par exemple, la science est mal dé-

fendue au quotidien ; les médias intéressés uniquement par le sensationnel ne savent pas parler de la recherche en général. Il n'existe pas ou peu de vraies revues de vulgarisation scientifique; les journalistes scientifiques sont-ils trop peu nombreux ? On peut rêver d'une chaîne de télévision uniquement dédiée à la Science, animée par des scientifiques. Pour cela, des postes spécifiques sont peut-être à créer.

Recommandation forte : La science au CNRS dépend de façon vitale d'un noyau d'ITA aux compétences spécifiques, et couvrant l'ensemble des métiers techniques fondamentaux. Le CSI INSU et les unités qui en relèvent doivent réfléchir d'urgence aux métiers que l'on veut maintenant pérenniser, à la politique de recrutement qui doit être construite avec l'ensemble des partenaires (CNRS ou non, et notamment, mais pas que, l'Université), en particulier face à la croissance actuelle du nombre de CDD (25% des effectifs actuellement), qui va mener très vite à une perte critique de professionnalisme. Cette évolution peut conduire à une perte récurrente de savoir-faire si les projets sur lesquels sont embauchés les CDD ne s'articulent pas entre eux et avec un noyau dur de chercheurs et IT permanents. La création d'une population précaire de plus en plus nombreuse peut conduire à ne pas toujours recruter les plus compétents, dans un souci compréhensible de stabilisation.

La dynamique interne de l'INSU et les partenariats

Dynamique interne: le séminaire de direction élargi

En concertation avec la direction scientifique (DS), le CSD PU sortant avait mis en oeuvre un « séminaire de direction élargi bi-annuel » qui permette de fluidifier dialogue et communication au sein de l'INSU. Celui-ci était composé de façon informelle des représentants de la DS, du président du Conseil Scientifique, des présidents des Commissions spécialisées, des sections du CNAP et des sections du Comité National. Des représentants du ministère ou d'autres organismes pouvaient y être invités.

Recommandation forte : maintenir cet outil, qui a donné satisfaction aux participants des deux premières réunions.

Partenariats

Un autre élément important dans la stratégie est la nécessité de développer et/ou de maintenir pour nos recherches des partenariats forts (avec les régions, l'Europe, avec les autres organismes via ALLENI, ANCRE et avec le privé). Les prospectives récentes ont déploré l'absence de la communauté scientifique française et plus encore de leadership sur certains programmes européens. Quels sont les moyens à mettre en oeuvre pour améliorer l'interaction avec ces partenaires (parfois problèmes de gestion lourde ou de management)? L'association de l'INSU avec des partenaires multiples est une spécificité à défendre car elle répond à un besoin critique pour l'organisation de grandes campagnes coopératives ou pour le développement de nouveaux outils d'observations et de modélisation (travail en réseau tel que les avions EUFAR par exemple).

Recommandation forte : Pour gérer au mieux les partenariats, force est de constater que le paysage actuel est assez complexe, en raison de l'empilement des structures coordinatrices. Il semble essentiel que les alliances Allenvi et Ancre se nourrissent des prospectives des CSI et des communautés (AA, OA, SIC, ST) pour leur prise en compte dans les appels d'offre de l'ANR. De la même manière, l'AERES s'est imposé dans le paysage de l'évaluation. Le CSI et le CN devront veiller à ce qu'une bonne harmonie soit respectée entre les unités évaluées et les personnels recrutés (évalués aussi) ce qui passe, là encore, par un effort de communication et de présence « croisées ». Il est essentiel que l'INSU (et le CNRS) s'investissent pour définir une méthodologie ad hoc pour évaluer les unités rattachées à plusieurs Instituts du CNRS.

Les interfaces entre l'INSU et les autres Instituts du CNRS

L'enracinement des Sciences de la Planète et de l'Univers dans les disciplines de base requiert un interfaçage efficace entre les chercheurs des différents Instituts du CNRS (ou d'autres organismes) intéressés par la question ou l'objet étudiés. A ce jour, certains projets interdisciplinaires ont réussi comme par exemple les programmes ECLIPSE (INSU-INSHS), EC2CO (INSU-INEE-INC-INP), ou encore l'étude des astroparticules ou de l'origine des planètes et de la vie.

Recommandation forte : En termes prospectifs, les questions suivantes soulignent 1) le besoin de renforcer les liens entre l'INSU et les mathématiques appliquées, la physique, la chimie et les sciences de l'ingénieur 2) l'urgence de développer une approche de l'étude des enveloppes de la vie (terre solide et surfaces – atmosphère - océan) en intégrant ses composantes physico-chimiques (domaine de l'INSU) et vivantes (domaine de l'INEE) de façon efficace, sans quoi des verrous scientifiques majeurs resteront non résolus.

Vers la physique, la chimie et les sciences de l'ingénieur...

- **Le domaine de la physique fondamentale, de la métrologie de l'espace et du temps, et des systèmes de référence** est en forte mutation, avec une convergence des communautés d'astronomie, physique et sciences de l'ingénieur pour de nouveaux projets dans l'espace et au laboratoire. Pour accompagner ce développement et faciliter la structuration de cette communauté en émergence, la création d'une structure INSU, l'Action Spécifique GRAM (GRAvitation, physique fondamentale, systèmes de référence, Métrologie du temps et de l'espace), ouverte à la participation des autres instituts concernés, a été recommandée par l'exercice de prospective AA et créée.

- **Le domaine des astroparticules et de la cosmologie** apparaît comme une interface majeure, où les astrophysiciens travaillent conjointement avec les physiciens des particules et les théoriciens. Les progrès majeurs accomplis dans la détection des photons de haute énergie en particulier laisse entrevoir l'avènement d'un nouveau champ pour l'astronomie : le principal enjeu de-

vient la mise en œuvre d'une astronomie multi-messagers. Si la communauté de cosmologie est structurée au sein du Programme National « Cosmologie et Galaxies », le besoin d'une structuration analogue pour l'astrophysique des hautes énergies est patent. La transformation du GDR « Phénomènes Cosmiques de Haute Énergie » (PCHE) en Programme permettra d'atteindre cet objectif, en conservant la tutelle des instituts concernés (INSU, INP, IN2P3) et un conseil scientifique interdisciplinaire.

- **L'étude des processus physiques, chimiques et biogéochimiques** est un autre domaine où des collaborations interdisciplinaires doivent encore se développer. Celles-ci exploitent la très grande diversité des phénomènes naturels. Elles concernent en particulier la physico-chimie atmosphérique et son impact sur le climat, l'érosion des surfaces continentales et les cycles d'éléments chimiques entre continent et océan. L'astrophysique de laboratoire est une discipline en émergence, qui vise à contribuer à la connaissance des milieux et objets astrophysiques par des études expérimentales et théoriques. Elle fait appel à des expériences dédiées et repose beaucoup sur des approches interdisciplinaires impliquant l'astrophysique avec d'autres domaines de la physique et de la chimie. De la même manière, l'étude des processus qui se déroulent dans la Terre profonde, et se traduisent en surface par les éruptions volcaniques, les mouvements des plaques et les séismes associés, représentent aussi un champ commun important avec la physique des matériaux en milieu extrême et leur rhéologie, les mécanismes de rupture et les processus de diffusion. L'ensemble de ces domaines d'interface avec la physique et la chimie font donc appel à des installations dédiées mais aussi aux grands instruments : sources de photons ou d'ions lourds (par exemple Synchrotron SOLEIL et ESRF, lasers de puissance, accélérateur du GANIL).

- **La réalisation des nouveaux instruments**, depuis les étapes de recherche et développement amont, à celles de la conception puis de la construction et du traitement des signaux, permet de nouer des collaborations fructueuses dans les domaines des Sciences de la Terre, de l'océan, de l'astrophysique et des sciences de l'ingénieur et du traitement du signal. Quatre grandes orientations se dégagent pour les travaux en traitement du signal, situées dans la problématique générale des problèmes inverses : la déconvolution d'images, l'analyse temps – fréquence ou analyse spectrale, la reconnaissance des formes, et le traitement des données hyper-spectrales. Les activités d'instrumentation font émerger le besoin de faciliter l'accès aux plates-formes technologiques pour les laboratoires de l'INSU, et de participer à la coordination du développement de ces plates-formes.

Vers la biologie, la physique et la chimie...

L'étude de la Terre vivante nécessite par essence une approche hautement interdisciplinaire regroupant les savoirs et savoir-faire des géologues, des biologistes ainsi que des chimistes et des physiciens. Le couplage entre caractérisation des échantillons géologiques et paléontologiques par des techniques modernes d'imagerie, de géophysique ou de géochimie (notamment isotopique) et l'approche moléculaire des biologistes (séquençage, phy-

logénie) doit ainsi être renforcé. Les développements de fortes et indispensables interfaces avec les autres Instituts du CNRS, notamment l'INEE, est indispensable pour la mise en place des futures actions.

Pour traiter les questions d'environnement avec réalisme et efficacité

Les pistes ci-dessous (encore une fois non exhaustives) affirment le besoin pour les communautés d'avoir la possibilité de travailler ensemble sans cloisonnement de structures en mêlant les compétences spécifiques de leur domaine de recherche. Un blocage important provient en effet de ce que les études menées sur les « enveloppes de la vie » de la planète, l'ont souvent été de manière disciplinaire ou en découplant les différents compartiments. Un objectif fondamental semble donc de réunir, sur un même site ou autour d'un objet commun, des compétences diverses permettant la pluridisciplinarité qu'impose la complexité des systèmes étudiés. Le couplage entre cycles hydrologiques, géochimiques et biologiques apparaît ainsi comme essentiel. Il est nécessaire d'intégrer la dynamique du vecteur de transfert des éléments et des contaminants, souvent considérés comme immobiles, pour modéliser leur devenir. Enfin, le passage des observations aux très petites échelles (nano ou micro, moléculaire ou individus pour le vivant) vers des échelles intermédiaires (mm ou cm, populations ou communautés pour le vivant) ou plus vastes (bassins versants, écosystèmes, zones estuariennes et côtières) reste une question ouverte.

Le CSI INSU encourage :

- 1) le maintien voire le développement de programmes de recherche communs entre l'INEE et l'INSU à l'instar de EC2CO, mais qui pourrait être élargi

- 2) Le recrutement à la frontière des disciplines grâce au double rattachement de la future section 30 à l'INEE et l'INSU.

- **Le climat** : l'étude du climat fait intervenir toutes les sphères du système climatique à toutes les échelles de temps et d'espace: atmosphère, biosphère (végétation mais aussi organismes vivants de la cellule aux animaux), hydrosphère (océan, rivières, zones humides), cryosphère (banquise, neige, calottes), lithosphère (hydro-géologie, volcanisme) et même astronomie (relation soleil-terre-climat). La place de l'homme est essentielle en tant qu'acteur du système mais aussi en tant que « victime » des changements à venir, ce qui donne un rôle très fort aux Sciences de l'Homme et de la Société (histoire, géographie, économie, sociologie) dans les études sur le climat, son impact et la remédiation.

L'enjeu pour l'INSU est d'accompagner la connaissance vers une meilleure quantification des modèles de climat et sur les effets, parfois extrêmes, à l'échelle régionale des scénarios du changement climatique. Les verrous à lever sont identifiés qui couvrent le passage d'échelle, du processus à sa paramétrisation, et le couplage des différents réservoirs du système Terre. Ce progrès devra pouvoir s'appuyer sur des équipes pluridisciplinaires, une meilleure articulation entre observation, théorie et modélisation, un maintien des dispositifs d'observation à long terme et une formation renforcée dès l'enseignement secondaire sur l'objet climatique.

- **Événements extrêmes** : si l'aléa climatique (précipitations intenses par exemple) est à l'origine de ces événements, les risques et leurs impacts sont liés directement à l'activité humaine. Toute politique sur la réduction des risques, la mitigation, l'adaptation et la mise en œuvre d'actions en cas d'événements extrêmes font intervenir toute la chaîne de décision du scientifique (météorologue, atmosphéricien) au politique.

- **Pollution** : l'étude de la pollution se rapproche dans un certain sens de celle des événements extrêmes. S'ajoute un lien fort avec le secteur médical pour déterminer l'impact sur la santé et la détermination des seuils de dangerosité. La ville est un domaine particulièrement sensible (forte concentration de populations) mais les zones agricoles ou océaniques (littoral et hauturier) sont aussi largement impactées. L'étude intégrée des systèmes côtiers ou continentaux nécessite d'incorporer une composante « vivant » et les thèmes de recherches en lien avec le changement global s'inscrivent de facto entre les Sciences de l'Univers et les Sciences de la Vie. Cette double appartenance est particulièrement cruciale dans les OSU « stations marines ». Les problèmes posés par le littoral en sont des exemples illustratifs de même que toutes les questions posées par l'épuisement des ressources halieutiques.

- **Contaminants** : le devenir des éléments et des contaminants est contrôlé par leurs interactions complexes et multiples avec les constituants fluides, minéraux, organiques et vivants de la surface de la planète. Sous le terme de « contaminants » sont inclus les composés chimiques d'origine anthropique ou naturelle, les nanoparticules, mais également les agents biologiques, pathogènes ou produisant des toxines. La compréhension du devenir des éléments « nutritifs » doit également être considérée. Dans le contexte écodynamique, le devenir des éléments et des contaminants recouvre leur distribution aussi bien spatiale que temporelle (transport réactif) et les modifications de leur forme chimique et structurale (spéciation). Cette distribution conditionne leurs effets sur le vivant ainsi que leurs conséquences sur le fonctionnement des écosystèmes. S'ajoutent des effets retour du vivant sur les contaminants comme les processus d'oxydo-réduction, complexation, méthylation, dégradation qui impactent leur spéciation. La compréhension de l'ensemble des mécanismes contrôlant la dynamique et l'impact des contaminants est donc un enjeu de la plus grande importance dans le contexte des services de type préservation, altération, évaluation des risques, remédiation. La compréhension de ces processus nécessite d'en appréhender les mécanismes à l'échelle la plus élémentaire. Ceci concerne aussi bien la chimie analytique, la physicochimie des interfaces, que la biogéochimie, et met en jeu un ensemble d'interactions avec et entre les systèmes biologiques. Les mécanismes moléculaires impliqués se répercutent en effet à tous les niveaux d'organisation biologiques jusqu'à la modification du fonctionnement des écosystèmes et de la biosphère. Une telle compréhension est nécessaire pour fonder la modélisation des systèmes complexes sur des bases mécanistes afin de minimiser la perte d'information lors des nécessaires changements d'échelles.

- **La main de l'homme** : le comportement humain est sans doute, et de très loin, le plus grand facteur d'incertitude dans le changement global. Par exemple, on prévoit d'ici 2025 une pénurie d'eau pour environ 2 milliards d'individus et une augmentation des besoins en eau de l'ordre de 20%. Les solutions doivent s'appuyer sur une gestion intégrée de l'écosphère continentale tenant compte des ressources et des demandes, et des interactions physiques, environnementales et sociétales à travers les différents flux associés d'eau, d'énergie et d'éléments chimiques. Cette gestion doit s'appuyer sur une compréhension des processus à différentes échelles spatiales et temporelles. Là encore, les enjeux sont critiques autour du littoral, lieu où se focalisent de nombreux conflits d'usage d'activité souvent antagonistes (développement industriel-portuaire, tourisme, agriculture, pêche et aquaculture). Les recherches sociales et économiques doivent contribuer à la compréhension des fonctionnements de ces écosystèmes fortement structurés par les activités humaines.

Dynamiser les interactions entre les chercheurs de l'INSU confrontés à ces questions multiparamétriques avec fort facteur humain et les chercheurs des SHS nécessite la mise en place d'outils structurants tels que des réseaux (GDR par exemple), des écoles d'été (un exemple est celle de eau – climat) des chantiers pluridisciplinaires (par exemple MISTRALS), des axes transverses au sein des OSU voire des laboratoires communs, tout en veillant à ne pas isoler un spécialiste de sa communauté. Les programmes de recherche communs peuvent aussi être mis en œuvre, avec par exemple deux appels d'offre pour un seul CSI.

Recommandation forte : Quelles que soient les connexions considérées, ces questions scientifiques interdisciplinaires ne réussiront que si les différentes disciplines de départ en retirent des bénéfices mutuels. Il faut identifier des problèmes communs, établir une série de questions à intérêt mutuel, co-construire. Il est essentiel aussi que chaque spécialiste mette en commun des compétences, mais reste en pointe dans son domaine : le cas contraire engendrerait un risque important lors des évaluations de carrière.

Post scriptum : Avec le développement du Crédit Impôt recherche, un mécénat scientifique est en train de se développer, de façon assez anarchique : il y a urgence à contacter les responsables de ces opérations et à trouver le moyen de les utiliser dans la plus grande concertation scientifique.