

SCIENCES DE L'UNIVERS

Dominique LE QUÉAU

Les Sciences de l'Univers ne sont pas organisées autour de disciplines abstraites mais autour d'objets concrets : les astres et systèmes d'astres (des systèmes planétaires aux grandes structures de l'Univers) et les milieux qui constituent notre environnement (océan, atmosphère, surfaces, terre solide) ou celui des astres (interplanétaire, interstellaire, intergalactique). L'objectif premier est de faire converger savoirs et savoir-faire issus de toutes les disciplines sur l'étude de ces objets. Dans la mise en œuvre de ces ambitions, les conditions – physiques, chimiques, biologiques, etc. – extrêmes rencontrées, du cœur de la Terre aux extrémités de l'Univers garantissent aux disciplines de vrais terrains d'aventures où peuvent être testés et validés, dans des régimes autrement inaccessibles, les concepts et processus physiques, chimiques, biologiques, les plus variés. La compréhension des objets naturellement complexes et de leur fonctionnement exige une grande créativité, et l'élaboration de concepts nouveaux – comme « chaos » ou « dimension fractale » –, des méthodes nouvelles – comme « assimilation de données » – qui contribuent à faire évoluer les autres sciences.

Les Sciences de l'Univers sont d'abord des sciences d'observation. Les mesures, nécessitent la mise en œuvre d'une intense activité instrumentale qui suppose recherche & développement, gestion de projets et maîtrise de moyens d'essais et gestions de projets

internationaux. Les temps de développement et de réalisation se comptent en années ; les projets mobilisent des équipes diversifiées de spécialistes, exigent un management rigoureux et nécessitent le maintien d'un important corps technique. Les Sciences de l'Univers manipulent des données, dont l'acquisition mobilise grands ou très grands équipements, pérennes (télescopes, avions, bateaux, stations de mesures, etc.) ou non (missions spatiales, campagnes de mesure, etc.). Afin de maîtriser toutes les échelles pertinentes des objets et milieux étudiés et d'en mesurer les évolutions, elles sont amenées à gérer de grands flux et de grands stocks de données. Cela implique la mise en œuvre de bases de données réparties et hétérogènes dont la maîtrise et l'utilisation croisée constituent de véritables « Observatoires Virtuels ». La gestion des moyens, la mutualisation partielle d'activités techniques, la mise en place d'action de R&D, la pérennité de services de bases de données, justifient l'organisation fédérale des laboratoires en observatoires, susceptibles d'aider ceux-ci à faire face à toutes leurs responsabilités.

La taille, le nombre de paramètres libres et la présence de multiples rétroactions engendre la complexité des systèmes étudiés, ainsi que le caractère hautement non linéaire de leurs comportements. Leur modélisation exige des outils de simulation numérique dont la complexité est aussi justifiée par le besoin de disposer d'outils opérationnels pour prévoir, anticiper et, si possible, gérer, risques, aléas et crises. Cela nécessite l'accès à de gros centres de calculs et l'adaptation de ceux-ci aux besoins spécifiques de la simulation. Du fait des capacités croissantes à prévoir les perturbations – du climat, du temps, de l'état de la mer, des mouvements du sol, des orages issus du Soleil et du milieu interplanétaire – et à prévenir les crises – inondations, pollution des eaux, des sols et de l'air, éruptions, incendies, etc. – les Sciences de l'Univers sont soumises à des demandes sociétales fortes. Des adaptations doivent corrélativement être trouvées pour repenser les critères d'évaluation, et créer des structures de transfert de savoir et de savoir-faire. Cela exige en effet, pour les

laboratoires du CNRS et de l'Université, de développer de l'expertise, de construire de nombreux partenariats avec des agences à vocation plus opérationnelle et de mener une communication de qualité vis-à-vis du public et de la sphère politique, toutes activités qui ne sont pas facilement prises en compte par les procédures d'évaluation en vigueur.

1 – LES DISCIPLINES, FACE AUX CONDITIONS EXTRÊMES

1.1 AUX CONFINS DU MONDE OBSERVABLE, LA PHYSIQUE EXTRÊME

À l'interface avec la physique théorique et la physique des particules, l'étude de l'Univers très lointain, et, donc, jeune, est le lieu privilégié de la cosmologie. Les reliques des phases primordiales de l'univers laissent des empreintes détectables dans l'anisotropie du rayonnement de corps noir. Le développement des grandes structures ainsi révélées, les conditions dans lesquelles l'univers est sorti de l'âge sombre et re-ionisé pour laisser ces empreintes, constituent des thèmes centraux de recherche. La matière noire, qui représenterait environ 30 % du contenu en énergie-matière de l'univers, est traquée par des expériences de détection directe, et révélée par des mesures de dynamique des amas de galaxies. L'énergie noire qui en représenterait 70 % serait responsable de la phase d'expansion accélérée de l'univers, est révélée par l'étude de la répartition des supernovae de type Ia à grand décalage vers le rouge. L'identité, la densité et la répartition de ces diverses composantes de l'univers sont responsables de sa structure, de ses taux d'expansion et d'accélération.

En fin de vie des astres qui peuplent l'univers, les objets compacts – étoiles à neutrons,

pulsars, trous noirs, hypernovae génératrices de sursauts gamma, noyaux actifs de galaxie – permettent de mettre à l'épreuve la relativité générale dans des champs de gravité intenses, en étudiant les photons émis à l'horizon des trous noirs et les ondes gravitationnelles dues à la coalescence de ces derniers. Ces sites de phénomènes cosmiques de haute énergie sont des accélérateurs de particules. Ils émettent des messagers variés – photons X et gamma, neutrinos de haute énergie, rayons cosmiques de haute énergie, ondes gravitationnelles – qui sont la signature d'accrétion de plasmas chauds accompagnée d'éjections relativistes, parfois explosives. Avec les défauts topologiques et les reliquats des transitions de phase primordiales, ces processus constituent des explications possibles à l'énigme des rayons cosmiques d'ultra haute énergie.

1.2 L'ÉMERGENCE DE LA COMPLEXITÉ CHIMIQUE

Il s'agit de l'histoire de la complexité moléculaire de la matière, du dihydrogène primordial aux édifices organiques de très grands poids atomiques, comme les poly aromatiques hydrogénés et les nano-particules. L'évolution physico-chimique de la matière lors des phases proto-stellaires et dans les disques proto-planétaires constitue un enjeu majeur, avec l'objectif de faire le lien avec l'étude de la matière primitive dans le système solaire, et la recherche de molécules organiques complexes, pré-biotiques. L'analyse in situ des météorites et des micro-météorites, de leurs composants minéraux, à l'échelle des processus élémentaires d'évolution de ces objets, complète ces moyens d'investigation en fournissant à la télédétection de ces milieux une incontestable « vérité terrain ».

Parallèlement, l'étude de la matière interstellaire extragalactique, jusqu'à la détection de H_2 issu du gaz primordial va contribuer à l'étude de l'évolution des galaxies, en particulier des phases d'intense formation stellaire.

La structuration du milieu interstellaire est un paramètre important, qui fait jouer un rôle complexe à la dynamique chimique du milieu, au champ magnétique. Se pose également le rôle de la turbulence sur la régulation du taux de formation d'étoiles et sur les conditions hors équilibre – dissipation intermittente de l'énergie turbulente – de la chimie interstellaire. Celle-ci conduit à la présence de phases variées incluant outre le gaz, des poussières de tailles et de structures très variables, des grains, des nano-particules. Très faiblement collisionnel, ce « réacteur » particulier ouvre aux chimistes un banc d'essai pour comprendre les processus de synthèse en milieu très raréfié.

Cette thématique progresse grâce aux collaborations des astro- et géo-chimistes, avec physiciens, chimistes et spectroscopistes. Elle va bénéficier de l'ouverture de nombreux grands instruments astronomiques, dans l'infrarouge et le (sub)millimétrique, permettant, avec une sensibilité et une résolution angulaire accrues, l'observation des poussières et de la composante dense et froide du gaz interstellaire où se forment molécules et étoiles. L'atmosphère étant opaque dans les longueurs d'ondes nécessaires à ces études, ces instruments seront opérés dans des environnements particuliers : espace, haute montagne, Antarctique. L'amélioration des mesures micro- et nano- géochimiques de la matière extraterrestre collectée au sol et dans l'espace sera également essentielle.

1.3 L'HYDRODYNAMIQUE EXTRÊME DES PLANÈTES TELLURIQUES

La planète Terre et les autres planètes telluriques se comportent à l'échelle géologique comme des fluides dont la dynamique explique l'évolution, ainsi que les crises : éruptions, explosions de gaz, nuées ardentes, tremblements de terre, glissements de terrain. Se déroulant dans des conditions exceptionnelles de température et surtout de pression, l'écoulement de ces fluides est hautement complexe. Il

fait appel à des processus polyphasés avec des couplages (thermo)dynamiques entre toutes les phases.

Les fluides constitutifs du manteau, sont mis en mouvement par les sources de chaleur résultant de la décroissance d'éléments radioactifs. Le manteau chaud remonte sous la lithosphère et a tendance à fondre, pendant que le magma migrant dans le manteau, en augmente la ductilité. Il s'organise en poches kilométriques ressemblant aux chambres magmatiques. En approchant la sub-surface elles refroidissent, cristallisent, formant une bouillie dont sont exsolvés des fluides riches en CO₂ et H₂O. Les éruptions volcaniques résultent des différents régimes liés à la séparation dynamique des trois phases du fluide – solide, magma, gaz – avec des lois rhéologiques différentes pour les différentes suspensions : gaz-poussière, gaz-liquide magmatique, liquide magmatique-cristal. Le mouvement entre phases couplées conduit au développement catastrophique d'agrégats qui sont à l'origine d'explosions et de nuées ardentes. L'échauffement du magma induit des circulations hydrothermales qui peuvent conduire à des explosions, en cas d'ébullition.

La géodynamique doit donc allier la modélisation des écoulements de fluides polyphasés, l'étude expérimentale des équations d'état décrivant l'interaction physique et chimique des phases entre elles – ce qui exige de générer au laboratoire les conditions extrêmes de pression permises par les enclumes à diamant – et les observations géologiques et géochimiques de terrain, à toutes les échelles spatiales et temporelles. Pour ces mesures, la sismologie a développé des modèles tomographiques du manteau avec une résolution spatiale impressionnante, qui permet d'identifier les plaques lithosphériques plongeantes dans le manteau inférieur, les panaches mantelliques et les « super-panaches ». La tomographie de la lithosphère continentale révèle une structure complexe où les effets de variations thermiques et chimiques se combinent. La sismologie et ses méthodes, ont fortement bénéficié des interactions entre géophysique, acoustique, optique et mathématiques appliquées.

Les études volcaniques et géochimiques ont mis en évidence des périodes pendant lesquelles la lithosphère continentale était plus chaude, les éruptions volcaniques plus intenses, la fusion partielle du manteau plus prononcée, la tectonique des plaques plus ou moins active. Les modèles de convection développés devraient permettre de rendre compte de ces évolutions et de répondre à quelques questions fondamentales sur les différentes étapes de l'histoire thermique et des séparations de phases qui ont marqué la différenciation de la Terre et des planètes telluriques, sur le devenir de notre planète, à l'échelle de l'âge de l'univers, et sur l'anticipation des catastrophes naturelles liées au volcanisme et à la tectonique.

1.4 LES CONDITIONS EXTRÊMES DE LA VIE

Les conditions d'émergence de la matière vivante dans les environnements primitifs – Mars ou Terre primitive – posent des questions fondamentales aux spécialistes de l'Archéen et aux planétologues. L'existence probable d'un océan martien primitif – suggéré par la mise en évidence de glace d'eau sous les calottes polaires et par la géomorphologie – et, dans celui-ci, des conditions requises pour une activité biologique, implique de comprendre quel a été le climat passé de Mars, de connaître l'historique des composants volatils de la planète, et d'anticiper la forme que prendraient des marqueurs d'éventuelles traces de vie fossile. Les recherches impliquent le développement de nouvelles missions spatiales, de nouveaux instruments de mesures par télédétection et in situ, et de nouvelles expériences de laboratoire modélisant les évolutions de l'atmosphère et du sol de la planète. L'exobiologie touche également à l'exploration de certains satellites des planètes géantes – Europe et Titan dont l'atmosphère présente des similitudes avec celle de la terre primitive – et des comètes, à l'évolution

chimique dans le milieu interstellaire et à la recherche de systèmes planétaires extrasolaires, de leurs planètes telluriques et de leurs zones d'habitabilité.

Sur Terre, l'étude de certains biotopes, où règnent des conditions de température, de pression, de potentiel redox, d'hypersalinité, et/ou des conditions éco-toxicologiques réputées hostiles à la vie, offrent des perspectives fascinantes pour mieux comprendre les limites d'existence des systèmes vivants. Les systèmes hydrothermaux des dorsales océaniques, par exemple, constituent des écosystèmes qui existent et fonctionnent dans des conditions inimaginables avant leur découverte. Leur découverte renouvelle le questionnement sur les origines de la vie et les réflexions sur l'exobiologie. De nombreux micro-organismes, bactériens pour l'essentiel, y ont été découverts, isolés, mis en culture pour étudier leur résistance et leur adaptation aux conditions extrêmes de pression, de température, de nutriments. L'approche physiologique permet de contraindre les mécanismes développés par les organismes vivants pour s'adapter aux conditions de température, salinité (pression osmotique), pression d'oxygène, pH et luminosité des différents environnements terrestre. L'utilisation de la biologie moléculaire a permis de positionner les nouvelles espèces découvertes dans les processus évolutifs et de réaliser des travaux de génie biologique, qui ont conduit à isoler, extraire et produire de nouvelles enzymes thermostables.

2 – L'APPROCHE SYSTÉMIQUE

À coté des processus individuels, la compréhension du fonctionnement des objets complexes dont se préoccupent les Sciences de l'Univers exigent la prise en compte simultanée de nombreux processus couplés agissant de conserve, sur un domaine de temps

et d'espace extrêmement large. À côté d'une conceptualisation originale des échanges et interactions entre les diverses échelles, cela implique une « approche systémique » où celles-ci sont traitées de façon hétérogène – les modèles numériques existant étant incapables de couvrir un domaine aussi étendu en des temps compatibles avec l'expérimentation numérique –. Des inférences diverses, tirées de l'observation – assimilation de données – ou de modèles « sous-maille » – éventuellement empiriques – sont utilisées pour compléter les niveaux dynamiques manquants et régulariser le fonctionnement des modèles.

2.1 STRUCTURE, DYNAMIQUE ET ÉVOLUTION DU NOYAU TERRESTRE

Le noyau liquide, magnétisé, de la terre – et des planètes magnétisées – constitue un « système couplé » complexe, *a priori* décrit par des équations classiques, mais hautement non-linéaires. Les premiers modèles numériques 3D de dynamos convectives et le développement de modèles analogiques expérimentaux ont récemment marqué un tournant dans l'étude du noyau et de l'origine du champ magnétique terrestre. Si on sait reproduire jusqu'à des phénomènes paléomagnétiques comme l'inversion du champ magnétique, force est cependant de constater que les paramètres des modèles sont très éloignés de la réalité et donc que ceux-ci ne fonctionnent pas dans le même régime dynamique que le noyau.

Aussi les développements numériques et expérimentaux actuels visent à explorer les régimes dynamiques pertinents grâce à l'étude et la paramétrisation des phénomènes sous-maille. Les implications sont nombreuses : ré-évaluation du couplage noyau-manteau, avec d'importantes conséquences sur la dynamique du système solaire ; contraintes sur les bilans énergétiques, liens avec la circulation profonde dans les planètes géantes, et un fort potentiel de collaborations entre géophysiciens, physiciens, mécaniciens et astrophysiciens. Du côté

des observations, le défi est désormais une meilleure séparation des effets magnétiques internes et externes, qui nécessitera une collaboration active entre spécialistes. Les données gravimétriques et géodésiques apportent également des contraintes sur la dynamique du noyau. La précision des données continue à s'améliorer, en particulier grâce à une meilleure prise en compte des effets dus à l'atmosphère et aux océans.

2.2 LE SYSTÈME TERRE

Il est maintenant acquis que la compréhension de l'évolution des couches superficielles de la Terre, où réside la biosphère, exige une approche globale intégrant les interactions mutuelles entre l'atmosphère, l'océan, la cryosphère, les sols, les populations animales et végétales, la lithosphère plus profonde, etc. Ces interactions résultent d'une intrication extrêmement complexe entre processus physiques, chimiques et biologiques. L'interface entre Sciences de la Terre d'une part, biologie et écologie de l'autre, est aujourd'hui reconnue comme un des principaux challenges des années à venir.

Cela est naturellement vrai pour l'études des surfaces continentales, dont le fonctionnement, qui joue un rôle sociétal éminent, fait appel à de nombreux processus bio-géochimique, agissant sur une grande étendue d'échelles. Le couplage entre le fonctionnement des sols, des écosystèmes qu'ils accueillent, parmi lesquelles de nombreuses populations de micro-organismes offrent un exemple d'approche systémique. Les sols sont des milieux complexes où interagissent matières minérales, matières organiques, solutions aqueuses, gaz et organismes vivants. Leur fonctionnement, hautement non-linéaire, intègre différentes échelles d'organisation depuis le niveau moléculaire jusqu'à l'échelle du profil ou du bassin versant. Ils participent de façon importante, par la végétation, dont l'effet dépend de la diversité fonctionnelle du couvert et par l'activité de

ces populations microbiennes – elles mêmes fortement dépendantes de l'activité de la faune et de la flore à toutes échelles – aux rétroactions qui doivent être prises en compte dans la modélisation climatique, en particulier au niveau régional. L'évolution des caractéristiques morphologiques et fonctionnelles des sols, sous différentes contraintes – climat, anthropisation, etc. – nécessite d'intégrer dans un modèle les différents processus de transferts d'eau et de matières (particules, gaz, polluants), connus en principe, mais dont les constantes de temps restent méconnues : à l'interface avec l'atmosphère, dans l'écoulement superficiel, du fait du système racinaire, etc. Le fonctionnement des sols est ainsi étroitement couplé au cycle de l'eau qui traduit les échanges entre océan, atmosphère, continents et calottes polaires en réponse aux variations de flux d'énergie : précipitations, évapotranspiration et ruissellement.

Le climat affecte le cycle de l'eau et le contenu en eau des sols en modifiant les précipitations et l'évapotranspiration, le manteau neigeux, les débits des fleuves et l'étendue des zones d'inondation. La variabilité spatio-temporelle de l'humidité des sols et du manteau neigeux agit en retour sur le climat. L'enjeu est de quantifier les flux entre les différents milieux, les transports et le stockage de l'eau. Cela exige des campagnes d'observation internationales utilisant tous les vecteurs disponibles – télédétection spatiale, mesures in situ aéroportées, mesures de terrains – pour étudier sur l'ensemble des échelles spatio-temporelles pertinentes, les réserves en eau, les précipitations, l'impact du et sur le couvert végétal, de l'anthropisation, etc. Sur le plan de la modélisation, des progrès sont attendus du couplage entre modèles atmosphériques et modèles de surface continentale (hydrologie + végétation + action des micro faunes et flores), et de l'assimilation de mesures de télédétection (précipitations, humidité de surface, caractéristiques de la végétation).

Les évolutions climatiques, qu'elles soient naturelles ou forcées par la perturbation anthropique des gaz radiativement actifs (p.e. CO_2 , CH_4), constituent un champ privilégié de l'approche systémique. La prévision et

la quantification des changements, de leurs conséquences régionales et de leurs impacts sociétaux – et donc très localisés – sont aujourd'hui des points critiques. D'ores et déjà, le couplage de modèles d'atmosphère, d'océan, de glace de mer, de cycles biogéochimiques, de surface continentale (hydrologie et cycles) ont permis d'effectuer des simulations « initiées en 1850 », prenant en compte d'une manière interactive le cycle du carbone (biosphère continentale et océan), montrant un certain degré de réalisme pour l'évolution du *xx^e* siècle, et mettant en évidence la complexité des rétroactions. On constate, par exemple par le biais de l'émission et/ou du stockage des gaz à effet de serre, la forte sensibilité du climat aux rétroactions avec la végétation, d'une part, et avec l'érosion et l'altération des roches, d'autre part. En milieu marin, l'interaction des cycles biologiques et géochimiques et le rôles des différents organismes – plancton, micro-plancton, bactéries – dans les cycles élémentaires, permettent d'expliquer certaines corrélations entre le climat et les épisodes de l'histoire de la Terre où ces processus ont été activés, par exemple du fait de la dérive continentale.

Les données paléo-environnementales sont particulièrement riches pour contraindre et décrire la variabilité du climat à des échelles difficilement observables autrement, comme les variations rapides observées dans les carottes de glace durant la dernière période glaciaire. La mesure de ces effets qui utilise des (bio- & géo-) marqueurs variés, exige aujourd'hui une meilleure définition des échelles temporelles afin de quantifier précisément les déphasages entre les différents océans et continents. Elles impliquent également des mesures astronomiques extrêmement fines – flux photoniques solaires, dans diverses gammes de longueurs d'ondes, pour maîtriser les évolutions de la constante solaire – et des modélisations sophistiquées des perturbations dynamiques du Système Solaire – orbite et obliquité des planètes.

2.3 LES RELATIONS SOLEIL-TERRE

Les relations Soleil-Terre sont également conditionnées par le couplage dynamique de nombreux éléments en interaction. Leur étude est d'un intérêt croissant. Dans ce cas, à côté de la compréhension des mécanismes complexes de physique des plasmas qui sous tendent ces interactions – reconnection magnétique, turbulence, transferts d'échelle, transports de matière, de quantité de mouvement et d'énergie en milieu non collisionnel –, l'approche « système » vise à développer la météorologie spatiale, avec ses diverses facettes :

- (i) connaissance du système (« l'expertise ») ;
- (ii) la modélisation empirique, par exemple via des indices ;
- (iii) les tests de ces indicateurs, et en bout de chaîne ;
- (iv) la prévision.

Les trois premiers volets ne peuvent être conduits que par des scientifiques, le quatrième relevant plutôt de services opérationnels.

Les divers éléments du système – réservoirs de plasma, couches frontières de nature magnétohydrodynamique, perturbations matérielles induites dans l'espace interplanétaire par l'activité du Soleil, connexion dynamique entre les champs magnétiques terrestre et solaire, processus dynamiques de transport, d'accélération et de chauffage – sont aujourd'hui mieux maîtrisés grâce aux missions spatiales multi-satellites permettant de séparer les effets spatiaux des effets temporels, dans les perturbations de sous-systèmes dont la détection à distance est difficile, voire impossible aux échelles de temps nécessaires. À l'avenir des missions spatiales à proximité du soleil sont indispensables pour mieux comprendre les conditions d'origine des perturbations qui naissent dans la couronne solaire. Pour construire un système de météorologie spatiale, l'enjeu est d'appréhender et de structurer

l'ensemble des informations sur ces sous systèmes afin de construire un modèle semi-empirique de la chaîne de processus qui va du Soleil à l'atmosphère des planètes.

2.4 LES SYSTÈMES SOLAIRES

Les progrès instrumentaux ont récemment permis d'ouvrir un nouveau chapitre de notre connaissance de l'Univers, avec la détection – une centaine en 6 ans – d'exoplanètes géantes autour d'étoiles proches de la séquence principale, pour la plupart situées à proximité immédiate de leur étoile, au contraire de la situation qui prévaut dans notre propre système solaire. Même si cela résulte d'un biais instrumental, l'étude de ces objets, dont le mécanisme de formation est encore inconnu, enrichit notre réflexion sur la formation des systèmes planétaires, avec le Système Solaire comme objet de référence, et ces systèmes exoplanétaires comme champ d'étude. Dans le proche avenir l'exploration rapprochée de Mercure permettra d'étendre nos connaissances aux planètes situées à proximité de leur étoile. Cela, comme l'étude systématique des exoplanètes, stimule les travaux de modélisation – sur les processus de collapsus gravitationnel, sur les conditions d'accrétion et de condensation des planétésimaux à différentes distances de l'étoile centrale, sur l'histoire dynamique des systèmes planétaires et sur la structure interne et de l'atmosphère des exoplanètes géantes. Les dernières années ont également vu se développer l'étude des rapports élémentaires et isotopiques dans le système solaire primitif – planètes géantes, comètes et météorites – avec pour conséquence une meilleure maîtrise des processus galactiques qui sont à l'origine ou du moins sont concomitants de sa formation.

3 – PERTURBATIONS ET CRISES

Les Sciences de l'Univers sont aux premières loges pour aider les sociétés à faire face aux incidents de parcours, et aux perturbations qui affectent les systèmes qui gouvernent le fonctionnement de l'environnement, et peuvent conduire à des problèmes de santé, des difficultés économiques ou des crises majeures.

3.1 PERTURBATIONS ENVIRONNEMENTALES : IMPACTS ÉCONOMIQUES ET SOCIAUX

À des échelles de temps commensurables avec celles de l'activité humaine et, en tous cas, avec celles des systèmes sociaux, certaines perturbations naturelles ou anthropiques, constituent des champs de contraintes dans lesquels doivent s'exercer les choix politiques fondamentaux : évolution et gestion des ressources, des déchets et, plus généralement des conditions de vie.

L'accès à de nouveaux vecteurs énergétiques, comme les ressources géothermiques ou les gisements d'hydrates de méthane, font partie des efforts à réaliser dans la perspective du développement durable. La caractérisation des sites – aquifères profonds, d'une part, et marges continentales ou pergélisol profond des zones polaires, d'autre part – nécessitent instrumentation, campagnes de terrain – mesure des flux de chaleur, sondage sismique et off-shore – et recherches expérimentales pour comprendre leur genèse – altération, dissolution et précipitation de minéraux ou thermodynamique des hydrates de gaz. De façon générale la séquestration profonde des gaz – à effet de serre : méthane, CO₂ – constitue un programme de recherche important pour maîtriser le cycle global du carbone, avec ses

implications énergétiques et ses incidences sur l'évolution du climat.

Chaque année, en France, 94 Mt de déchets banaux, 9 Mt de déchets spéciaux, 375 Mt de déchets agricoles, 0.15 Mt de déchets hospitaliers, 130 Mt de déchets du BTP sont traités entraînant la gestion de 3 000 sites pollués et une dépense de 1.8 % du PIB. La diversité des déchets et des pollutions nécessite une approche inter/pluri disciplinaire incluant les sciences sociales et économiques. La spéciation des éléments toxiques est un processus essentiel pour mieux définir les charges critiques en polluants dans les milieux récepteurs et d'établir des normes de concentration ; cela exige le développement de nouveaux capteurs in situ, fonctionnant en réseau et un effort de modélisation focalisé sur le couplage entre l'hydrodynamique et la bio-physico-chimie. Le stockage des déchets nucléaire de haute activité en formation géologique profonde, nécessite des efforts de recherche en matière de conditionnement – lixiviation des matrices de fixation –, de fragilisation et de fracturation du sol – études pétrophysiques, géophysique en champ proche (endoscopie), géochimiques (spectrométrie du ^{81}Kr , des isotopes de gaz rares, Sr, O, H), géo-mécaniques –.

Un autre enjeu des Sciences de l'Univers concerne la pollution atmosphérique d'origine anthropique aux échelles locale et globale : augmentation des teneurs atmosphériques de gaz trace – dioxyde de carbone, méthane, oxydes d'azotes ou de soufre, composés organiques, métaux lourds – ainsi que des aérosols résultant de la condensation des gaz. À l'échelle locale, ces émissions induisent les pics de concentration d'ozone produit par la conjonction de facteurs chimiques, photo-chimiques et météorologiques. Ces polluants – dont une fraction est nocive – peuvent être transportés sur des distances importantes, subir des transformations physiques et chimiques dans les nuages ou du fait du lessivage par les précipitations. Ils sont susceptibles, même à grande distance, de perturber les écosystèmes (pluies acides), de dégrader les bâtiments ou les œuvres d'art et de poser des problèmes de santé publique. À l'échelle globale, elles se

traduisent par une augmentation des gaz à effet de serre. L'augmentation de la température qui en résulte semble, dans certaines régions, limitée par la présence de teneurs importante en particules d'aérosol qui augmentent la partie réfléchie du rayonnement incident et l'albédo des nuages et ont, sur le climat, un effet opposé à celui des gaz à effet de serre. Ces rétroactions positives ou négatives de la pollution illustrent la complexité du système climatique et des impacts des activités anthropiques.

L'océan hauturier constitue la plus vaste surface disponible sur notre Terre. Sur celle-ci, les conditions météorologiques, les états de mers, la force des courants, l'amplitude des « gyres », etc. constituent autant de paramètres dont la connaissance est fondamentale pour les pêcheries, les transporteurs, les services de sécurité, etc. La maîtrise actuelle des processus dynamiques affectant le système couplé océan/atmosphère permet de disposer aujourd'hui de systèmes opérationnels de prévision de ces paramètres qui sont amenés à jouer un rôle économique et stratégique majeur. Ce que l'on sait des interactions entre la dynamique hauturière et la production biologique va bientôt autoriser une exploitation plus rationnelle des ressources alimentaires de l'océan hauturier.

L'océan côtier représente 8 % de la surface océanique, 15 à 30 % de la production océanique totale et environ 80 % de l'enfouissement de la matière organique. Zone de contact entre le milieu terrestre et le milieu marin, le milieu littoral et côtier est un « éco-socio-système » soumis à des intérêts contradictoires et à des enjeux majeurs : ce système fragile accueille, à moins de 100 km des côtes, 40 % de la population mondiale et en accueillera 60 % d'ici 50 ans ! Les interfaces entre océan et continent présentent une très forte hétérogénéité spatio-temporelle à toutes les échelles de temps et d'espace et sont soumises à une forte variabilité environnementale, incluant évolutions climatiques et phénomènes anthropiques plus locaux. Réceptacle d'arrivée massive de matières organiques terrigènes, de sels nutritifs et de polluants associés, l'océan côtier a un rôle essentiel sur les cycles biogéochimiques, et bien sûr

sur les ressources nutritives accessibles. La maîtrise du fonctionnement et des évolutions de ces régions implique l'intégration de recherches en sciences de la terre, de la vie et en sciences humaines. Elles impliquent à la fois la dynamique océanique (rôle de la circulation générale et du forçage atmosphérique) et sédimentaire, la biogéochimie (flux de matières organiques et de contaminants), l'écologie fonctionnelle (structuration des écosystèmes, interactions physique/biologie). Un aspect particulier concerne les modifications du trait de côte (érosion, accumulation, ensablement) qui touchent les activités socio-économiques (aquaculture, ostréiculture, pêche, tourisme), et la pollution par les métaux ou les hydrocarbures, qu'ils viennent du continent ou des marées noires.

3.2 CRISES ENVIRONNEMENTALES : ALÉAS, RISQUES, SÉCURITÉ

La dynamique des systèmes naturels fait appel à des processus complexes d'interactions entre échelles. L'influence des petites échelles se traduit par des fluctuations dont l'occurrence est aléatoire, c'est à dire à l'extrême limite de la résolution des mesures et calculs prévisionnels. Celles-ci peuvent conduire à des instabilités, à des événements extrêmes et à des crises brutales : séismes, explosions volcaniques, crues, tempêtes, grands glissements gravitaires, etc. Un enjeu important des Sciences de l'Univers est d'essayer de réduire ces aléas, en améliorant modélisation et système d'observation, de leur assigner un degré de risques, tenant compte de la configuration du terrain, de son peuplement et des comportements humains en situation critique, de remédier aux dégâts les plus probables et finalement de proposer des pistes à la gestion de crise, afin d'améliorer la sécurité générale de la société. Dans cet effort, les concepts de susceptibilité et de vulnérabilité sont essentiels : ils essaient de quantifier les effets amplificateurs des situations locales et des comportements humains – défrichage,

endiguements, économie de l'habitat et du peuplement – sur les capacités destructrices des phénomènes naturels.

La compréhension de l'aléa sismique a bénéficié des travaux récents sur les mécanismes de rupture : l'observation que la redistribution des contraintes statiques provoquées par un tremblement de terre pouvait contrôler la localisation du déclenchement des séismes suivants a ouvert de nouvelles pistes où se combinent rôle des hétérogénéités et lois de friction. L'étude du risque sismique s'est également renforcée. L'enregistrement du bruit de fond sismique permet de cartographier les réponses du sous-sol et de prévoir ce que serait le mouvement du sol en tout point de la surface en cas d'un fort séisme. De fortes amplifications sont dues à la nature du sol des bassins sédimentaires où sont souvent bâties les villes, ainsi qu'à la structure et à l'organisation des bâtiments eux-mêmes. Si la prédiction des séismes reste un enjeu majeur, les succès les plus flagrants en matière de sécurité sismique résident ainsi dans une meilleure prise en compte du rôle des constructions. La détermination de l'aléa volcanique a bénéficié des travaux récents sur la thermodynamique et l'hydrodynamique des écoulements polyphasés et du développement de la tomographie sismique de subsurface. Les recherches sur les risques exigent, dans ce domaine, une approche pluridisciplinaire combinant observations de terrain et auscultation par de nouvelles méthodes : télédétection spatiale, analyses chimiques et physiques, imagerie à haute résolution, modélisation numérique et analogique. Le traitement du risque gravitaire (glissement de terrain sur les continents et leurs marges), nécessite à la fois d'identifier les zones potentielles de glissement (télédétection spatiale et aéroportée) et l'étude approfondie de zones susceptibles de déplacement rapide (ateliers instrumentés). Les facteurs déclenchant, de natures géométrique ou rhéologique nécessitent la convergence de compétences variées (mécanique des fluides et des solides).

La prévision météorologique a fait ces dernières décennies des progrès majeurs et est aujourd'hui pleinement rentrée dans l'ère opérationnelle, au moins en ce qui concerne les

phénomènes de grande et de moyenne échelle, sur les continents comme sur les océans, et cela même si des améliorations sont encore à rechercher pour la prévision des phénomènes hautement non-linéaires comme les situations de blocage. L'étude des aléas et des risques hydro-météorologiques relève encore d'une vaste conjonction d'efforts en vue de synthétiser toute l'information sur le cycle de l'eau aux différentes échelles pertinentes. À grande échelle (10^{4-5} km²), cela concerne l'observation – réseaux sol, télédétection et gravimétrie spatiale – et de la modélisation hydrologique – contenu en eau et dynamique – des grands bassins versants, couplant eaux superficielles et souterraines à l'atmosphère et en prenant en compte les activités anthropiques – usage du sol, irrigation, barrages –. C'est cependant à l'échelle du paysage (10^{0-4} km²) que les interactions atmosphère-biosphère-hydrosphère-lithosphère sont les plus étroites et influencées par la topographie, l'usage et la distribution des sols. De nouveaux outils d'observation – réseaux de radars – et de modélisation – météorologique, hydrologique, hydrodynamique, écologique – sont nécessaires pour développer une « climatologie hydrologique » seule en mesure de réduire l'aléa sur le comportement des crues et de permettre une politique d'aménagement et de prévention. Compte tenu de la complexité des processus hydro-météorologiques et de leur forte non-linéarité, des observatoires instrumentés – d'abord dans des régions à risques connus – sont nécessaires pour contraindre les paramètres les plus pertinents – intensité, localisation des pluies, états hydriques du sol, couverture végétale, niveau piézométrique –.

Un mot doit également être dit du « risque spatial », au-delà des catastrophes résultant de la collision de la Terre avec des astéroïdes géocroiseurs. L'environnement spatial de la Terre subit également pollution anthropique – les débris orbitaux résultant de l'exploitation de l'espace, qu'il convient d'identifier et de suivre avec des réseaux de radars et de télescopes automatiques – et des perturbations naturelles résultant des interactions Soleil-Terre. Les impacts économiques

– usure et pannes des systèmes satellitaires, pannes majeures des systèmes de distribution électrique et des réseaux de communications – et sociaux – irradiation accrue des personnels et des voyageurs embarqués sur des aéronefs, surtout durant les vols transpolaires – sont certes limités mais peuvent présenter des aspects stratégiques qui impliquent de se doter à terme d'un dispositif fiable de météorologie spatiale, susceptible d'anticiper les précipitations intenses de particules chargées à partir de l'état observé du Soleil et de modélisation adéquate.

De façon générale les travaux sur les risques naturels nécessitent un renforcement des liens du système de recherche avec les ministères régaliens concernés, en France, comme avec ceux de nos partenaires européens. Cela nécessiterait un grand programme, associant notamment Sciences de l'Univers et Sciences de l'Homme et de la Société, avec des actions ciblées sur les aléas, la vulnérabilité et la gestion des crises. À côté de la compréhension des processus conduisant à une augmentation de la vulnérabilité des sites, un effort doit être fait pour densifier les observations des phénomènes à risques avec l'instrumentation de territoires par des réseaux de capteurs, la mise en place d'observations plus ciblées sur des périodes longues et la réalisation de carte de vulnérabilités. La mise en place de cellules opérationnelles de décision, pour intervenir durant les crises, dont le déroulement doit être soumis à un processus critique, incluant des chercheurs. Sur le plus long terme, la remédiation du risque passe par la mise en place de dispositifs légaux adaptés et par le développement d'une véritable « pédagogie du risque » visant l'information et la formation du public.

4 – OUTILS, MÉTHODES ET INSTRUMENTS

La conception et la réalisation de nouveaux instruments, comme, en amont, les actions de Recherche et Développement (R&D) associées, constituent, pour les Sciences de l'Univers, des impératifs. Cette activité multi-forme doit être pilotée dans un souci permanent d'efficacité et de pertinence vis-à-vis des objectifs scientifiques visés, ce qui impose des plans de développement et de management rigoureux. Expériences de laboratoire, instruments de mesure et capteurs doivent être associés à des moyens de déploiements importants, mis en commun entre de nombreuses équipes : télescopes, accélérateurs, moyens d'analyse, véhicules terrestres ou marins, aéronefs, ballons, satellites, etc.

4.1 IMAGES ET CARTES

Dans le proche avenir, une importance particulière devra être accordée à l'imagerie analytique aux échelles micro & nanométriques, à l'amélioration de la précision spectrale et de la résolution spatiale : micro-ablation laser, micro sondes ionique, nucléaire et protonique, microscopes électroniques analytiques, rayonnement synchrotron focalisé. Les enjeux de ces nouveaux instruments concernent l'étude des phases synthétisées en conditions extrêmes et des échantillons extra-terrestres, les interactions minéral-vivant, les traceurs environnementaux, etc.

La télédétection des milieux naturels et des objets célestes a fait l'objet ces dernières années d'une progression très rapide de techniques d'imagerie, de spectrographie, de polarimétrie qui sont mises en œuvre dans une zone aujourd'hui très étendue du spectre électromagnétique à partir du sol et de l'espace. Les approches multi-longueurs d'onde ou hyperspectrales se généralisent et accompagnent un

développement important des détecteurs disponibles dans toutes les gammes de fréquences électromagnétiques, du rayonnement gamma aux fréquences radio. Corrélativement, les outils de diagnostic deviennent incomparablement puissants et complémentaires.

La mesure in situ des paramètres environnementaux – que ce soit sur Terre, dans l'espace ou sur d'autres planètes – privilégiera le développement de réseaux organisés de capteurs – fiables, de faibles dimensions et consommation –. Ceux ci constituent des instruments répartis d'imagerie, qui permettent d'effectuer, aux échelles pertinentes, des cartographies spécialisées du relief – bassins versant, paysages –, du milieu – mesures multipoints dans l'atmosphère ou la magnétosphère – ou encore de la dynamique – réseaux sismiques, mesures dynamiques par GPS, etc. –. Dans le domaine astronomique, cela concerne les instruments interférométriques au sol ou dans l'espace. Les mesures spatiales impliquent de plus la maîtrise opérationnelle de l'autonomie de vol de satellites en formation, ainsi que celle de la mesure précise et du contrôle de leurs positions et de leurs attitudes relatives.

4.2 ESPACE ET TEMPS

À coté de ces « imageries » – de l'environnement, de l'intérieur de la terre, de l'intérieur des enveloppes fluides, des objets et milieux célestes – et de ces « spectrométries » – des photons de toutes longueurs d'ondes, des éléments et de leurs isotopes, des particules, chargées ou non, qui constituent autant de messagers de l'Univers lointain – un secteur métrologique essentiel pour les Sciences de l'Univers est constitué par les mesures de temps et d'espace.

Pour le temps et les fréquences, l'avenir est à la mise en opération d'une première horloge spatiale à atomes froids, sur la station spatiale internationale, et à la réalisation d'étalons de fréquence de haute performance utilisant des sources d'atomes froids, des diodes laser et

de l'électronique hyperfréquence ultrastables. Ces développements sont utiles pour les futurs systèmes de navigation et positionnement par satellites et pour les systèmes de synchronisation des réseaux de télécommunication.

Les travaux les plus fins permis par les techniques de mesure au sol ou dans l'espace s'appuient également sur l'existence de repères de référence d'espace, célestes ou terrestres. Les systèmes de références sont indispensables pour toute mesure de précision effectuée à la surface terrestre : astrodynamique, mais également géodynamique, géodésie et leurs applications. L'approche statistique du traitement des observations fait l'objet depuis plusieurs années de transferts de savoir-faire avec des mathématiciens de l'analyse du signal et de l'estimation statistique.

4.3 INFORMATION ET CALCUL

Ces efforts instrumentaux conduisent à une croissance exponentielle de la quantité de données à acquérir, stocker, archiver, etc. et analyser ! Les outils prévus pour le traitement et l'archivage intelligent des données font maintenant pleinement partie des instruments proposés puis utilisés. La nécessité,

pour comprendre le fonctionnement des systèmes observés, de croiser des informations de toutes natures et d'origines variées, dont les supports physiques ne sont pas forcément stockés en un même endroit, et auxquelles il importe d'accéder avec des outils simples et performants, impliquent le développement de bases de données (certaines étant liées à des opérations d'instruments), hétérogènes et réparties, et d'orienter ces efforts vers la conception et la mise en œuvre « d'Observatoires Virtuels » spécialisés.

L'interprétation des données d'observation doit être soutenue par un effort important en matière de simulations numériques qui fait appel, comme la modélisation, à des moyens « lourds » de calcul. Ces travaux portent certes sur des objets très divers mais ont des bases physiques communes (problèmes à N corps, hydrodynamique, magnétohydrodynamique, physique atomique et moléculaire, chimie quantique, etc.). Ces « commonalités » de méthodes et d'outils justifient le développement de codes de simulations généralistes, en collaboration avec d'autres disciplines et l'accès privilégié des laboratoires qui sont en charge de leur développement à des moyens de calculs centralisés, en même temps qu'à des moyens autonomes (« grappes » et « fermes » de PC).

