

Éléments de prospective

One of the most predictable things about predictions is how often they're wrong. (...) We are not flying about with individual jet packs, we are not wearing disposable clothes or dining on concentrated nutrients in foil packs, and we have not eradicated malaria or cancer, all predicted years ago as likely. But we do have an internet that connects the entire world, and we do have a pill that provides erection on demand-neither of which will be found in any set of published predictions from 50 or even 25 years ago. As Enrico Fermi noted, predictions are a risky business, especially when they are about the future.

*Stuart Firestein, Ignorance, How it Drives Science,
Oxford University Press, 2012*



www.cnrs.fr

Sommaire

Principes généraux **4**

Quelques défis majeurs pour la connaissance **5**

- Lois fondamentales **5**
- Technologies, techniques et procédés **6**
- Observations, expérimentations, grands instruments **8**
- Données, simulations, imagerie **9**
- Humanités et culture numériques **11**
- Écosystèmes **12**
- Le Système Terre **13**
- Sociétés **16**
- L'étude fondamentale du vivant **18**

Sciences en Société **22**

Anticiper et accompagner les grands défis de l'avenir **23**

Principes généraux

La première mission du CNRS est d'identifier, d'effectuer ou de faire effectuer, seul ou avec ses partenaires, toutes recherches présentant un intérêt pour la science ainsi que pour le progrès économique, social et culturel du pays*. Le programme est vaste! Comme le souligne Stuart Firestein dans l'ouvrage cité en exergue, chaque découverte ouvre en général la voie à plusieurs nouvelles questions non résolues, de sorte que l'on pourrait en conclure de façon paradoxale (et légèrement provocatrice), que l'ignorance s'accroît au fur et à mesure que la science avance. Il s'agit évidemment ici de l'ignorance informée, savante, et pas de l'ignorante stupidité que l'on rencontre à tous les coins de rue. Victor Hugo avait formulé ce constat, en poète, de la manière suivante : « La science cherche le mouvement perpétuel. Elle l'a trouvé ; c'est elle-même »**.

Le moteur de la recherche aux frontières de la connaissance est la curiosité, le désir de savoir. Les exemples sont également nombreux qui montrent qu'à l'origine de beaucoup de technologies modernes devenues omniprésentes, se trouvent des découvertes inattendues venant de domaines éloignés : le laser, l'imagerie IRM, le graphène, le positionnement GPS, la cryptographie moderne, le modèle universel de la machine de Turing et les principes architecturaux de Von Neumann, le Web, l'intelligence artificielle, etc.

On observe aussi que le délai entre la découverte initiale et son application est très variable: de très rapide voire instantané (découverte des rayons X et de la radiographie par Röntgen en 1895) à beaucoup plus long (découverte du spin des particules en 1925, mais augmentation des capacités des disques durs en 1997, il fallait bien inventer entretemps les ordinateurs !). Une difficulté plusieurs fois constatée est que les applications d'une recherche fondamentale ne peuvent parfois pas être envisageables avec les connaissances à l'époque où cette recherche se fait. Les échelles de temps de la recherche aux frontières sont donc effectivement difficiles à prédire, et par suite à faire comprendre et approuver. Il se joue ici une partie d'importance majeure, qui repose sur une méthodologie d'encadrement et d'accompagnement de la recherche.

La relative imprédictibilité des avancées de rupture a des conséquences importantes : si le développement du socle des connaissances doit être assez large, la stratégie scientifique de long terme doit s'accompagner d'une méthodologie rigoureuse pour détecter les découvertes conceptuelles ou innovantes sans éparpiller les efforts (et nous insistons sur ce point trop souvent invoqué pour dévaloriser les recherches de base), d'autant que ce type de recherche est parfois lourd, rendant souvent essentiel un pilotage national.

Le point de comparaison doit être celui de la compétition internationale. Il s'agit là d'un positionnement intransigeant. Non seulement on ne peut pas tout faire, mais tout n'est pas équivalent. La stratégie dans ce domaine doit s'attacher à définir des éléments de méthode pour la sélection des bons objets de recherche (et tous ne sont pas bons) et la manière de les soutenir, plutôt que d'essayer d'en faire une liste a priori qui risquerait de définir soit des cibles trop restrictives, soit des grandes thématiques trop larges. Tout aussi libre qu'elle doive être, la recherche est menée par des équipes qui établissent ou s'insèrent dans des programmes, dans le cadre d'une stratégie globale discutée, validée et accompagnée par la direction du ou des Instituts compétents du CNRS.

Dans ces étapes, la méthodologie passe par la prise en compte d'un certain nombre d'éléments relevant d'un principe de réalisme : la pertinence des sujets de recherche, la prise de risque, le positionnement international, les réseaux et la construction de nouvelles communautés de recherche, la contribution à la formation et l'interface avec le milieu socio-économique.

* décret n° 2015-1151 du 16 septembre 2015, modifiant le décret 82-993 du 24 novembre 1982

** Victor Hugo, *L'art et la Science*, Actes Sud, 1993 ; extrait de William Shakespeare, Paris, 1848

Quelques défis majeurs pour la connaissance

En nous appuyant sur les principes généraux exposés ci-dessus, et munis de la prudence nécessaire vis-à-vis de tout exercice de prospective, nous exposons ci-dessous le fruit des réflexions croisées du Collège de direction du CNRS et de son Conseil scientifique, sur quelques grandes thématiques (plutôt qu'un grand

catalogue) qui constituent autant de défis majeurs pour la connaissance. On ne cherche évidemment pas l'exhaustivité, mais plutôt à mettre en évidence quelques lignes de force qui illustrent le caractère transverse des grandes questions qui nous animent.

Lois fondamentales

De grandes interrogations subsistent dans la compréhension des lois fondamentales qui régissent le monde dans lequel nous évoluons. Elles traversent l'ensemble du champ des connaissances. Il revient au CNRS de les aborder et de mettre en place des stratégies innovantes afin de contribuer à résoudre ces questions ouvertes qu'elles concernent les mathématiques, la physique, le vivant ou l'humain. En guise d'illustration, nous en présentons ici un échantillonnage réduit par nature non exhaustif.

Nous avons par exemple devant nous l'étude des grandes conjectures des mathématiques et des sciences de l'information comme l'hypothèse de Riemann, les conjectures de Hodge, de Birch et Swinnerton-Dyer ou la conjecture $P=NP$, ainsi que la réalisation de grands projets comme celui le programme de Langlands, l'analyse des propriétés des solutions des équations de Navier-Stokes ou de Yang-Mills ou encore l'établissement des lois de représentation de l'information : échantillonnage, parcimonie.

Les cent dernières années ont vu l'avènement des grandes révolutions de la mécanique quantique et de la relativité générale. Déclinées sous toutes leurs formes, ces théories rendent compte de la plupart des phénomènes observés aujourd'hui. Mais la théorie quantique de la gravitation, qui doit unifier les interactions fondamentales connues et la force gravitationnelle, reste encore à construire. Cette « grande unification » passe par l'établissement d'une théorie quantique des champs cohérente, la compréhension profonde de l'origine des masses, de la matière et de l'énergie noires, des ondes gravitationnelles et doit donner, in fine, une description cohérente de l'évolution de l'univers physique.

Il reste aussi à décrire et à utiliser les propriétés remarquables des systèmes mésoscopiques, à l'intersection des mondes quantiques et classiques : l'intrication des états quantiques, la décohérence, les systèmes fortement corrélés. La modélisation des propriétés statistiques des systèmes globalement connectés (ou de taille finie) et celle de la dynamique des systèmes hors équilibre, particulièrement en présence d'effets dissipatifs, sont deux défis importants avec des implications dans de nombreuses disciplines.

La représentation de l'objet vivant comme une machine complexe dont les propriétés découlent de celles de ses composants (purements physico-chimiques) rendrait la question des lois du vivant sans objet. Cependant chaque objet vivant est biologiquement unique, en ce sens que contrairement aux atomes et molécules dont il est constitué et qui semblent présenter les mêmes propriétés, quels que soient le lieu et le temps, chaque individu d'une espèce est différent des autres, en raison de contraintes et de la part d'histoire considérable qui y est à l'œuvre. Définir les lois du vivant ne se limite pas à recenser les lois de la physique et de la chimie concernées, mais impose de déchiffrer les grandes lois biologiques (lois de la génétique, de l'évolution, code neural aujourd'hui inconnu...) et à comprendre les règles de genèse de la formidable diversité des formes du vivant d'une part, et de l'unicité de chaque individu d'autre part, un défi majeur dû à la composante d'histoire difficile à formaliser.

Une autre question pressante est l'établissement des lois fondamentales du fonctionnement des anthropo-écosystèmes pour comprendre et prédire l'impact des activités humaines sur le devenir du système Terre (biotique – abiotique). Toute

avancée dans cette direction est une étape cruciale pour mettre en place des stratégies (conservation et remédiation) et des politiques publiques.

Il est aussi urgent de progresser dans le domaine de l'humain et notamment à partir des théories cognitivistes, vers la

proposition d'universaux (linguistiques, cognitifs, éthiques, culturels...), et d'avancer dans la clarification d'oppositions universelles dont les frontières sont modulées localement et varient selon les cultures : nature/culture, morale universelle (grands principes partagés, constantes anthropologiques)/normes locales (politique, religieux), humain/non humain...

Technologies, techniques et procédés

« *Progress in science depends on new techniques, new discoveries, and new ideas, probably in that order.* »
Sydney Brenner, Nobel Prize 2002, Physiology or Medicine.

On a pris l'habitude de décrire le paysage de la recherche sous une forme linéaire allant de la recherche fondamentale ou recherche de base jusqu'aux applications finalisées [les fameux TRLs] dans lesquelles la technologie, la technicité ou les procédés ne viennent que permettre la mise en œuvre. Cette image idéalisée masque trop aisément la « complexité » ou « l'intrication » des différents aspects des activités de la recherche qu'il faut voir dans leur globalité. À l'image de la structure linéaire des protéines dont l'efficacité ou les propriétés sont liées aux repliements et à la dynamique de leurs structures en interaction avec leur écosystème ou leur environnement, recherche de base, développements technologiques et applications se nourrissent les uns les autres.

Les nouvelles technologies, techniques ou procédés génèrent ainsi ou permettent d'aborder de nouvelles questions scientifiques, mais sont aussi un objet de recherches en soi, à visée applicative, souvent en lien avec des enjeux de société majeurs, dans les domaines de la santé, de l'énergie, de la communication...

Le CNRS y joue un rôle majeur, en particulier lorsque les sujets ne sont pas ou peu enseignés, son implication en recherche s'avérant alors déterminante, mais aussi par la mise en réseau et en cohérence des plateformes techniques (RENATECH pour les grandes centrales de nanotechnologies, ou les autres infrastructures de recherche IR et TGIR)
Ce qui suit n'en constitue que quelques exemples.

• **Cryptographie** : elle doit mélanger de plus en plus habilement problèmes faciles et problèmes difficiles, et doit concevoir, pour la mise en place de systèmes comme la monnaie ou le vote électroniques, des systèmes mixtes qui utilisent des problèmes très difficiles, mais qui sont très proches de problèmes ultra-faciles, solubles très rapidement dans un tout petit espace (c'est l'algorithmique

à bas coût, indispensable dans le cadre des cartes à puces, ou plus généralement du calcul embarqué). Le calcul formel, l'algorithmique parallèle, l'analyse de la performance des algorithmes, leur vérification, sont d'autres sujets à fort impact, au cœur des recherches actuelles.

• **Gestion des incertitudes** : les démarches de conception futures ne peuvent plus être exclusivement déterministes, mais doivent prendre en compte de façon rationnelle la gestion de l'incertain, voire de l'inconnu. Les couplages entre les systèmes d'équations déterministes et ces incertitudes sont des champs ouverts qui nécessitent de maîtriser des approches multi-échelles, les transitions d'échelles, les réductions de modèles, la dynamique des systèmes infinis, et demandent des avancées conceptuelles autres que des prises en compte statistiques ou probabilistes : il faut élaborer de nouveaux outils ou concevoir de nouveaux angles d'attaque qui permettront de poser ou re-poser les problèmes pour les résoudre. Pour aller dans cette voie, il est important de noter que beaucoup de progrès sont liés à des croisements et enrichissements mutuels de méthodes.

• **Sky computing** : né de l'interconnexion entre de multiples clouds, il repose sur la capacité à déployer des infrastructures distribuées à très grande échelle, où interviennent des traitements très lourds, en calcul ou en stockage, comme dans les applications en calcul scientifique, par exemple. Les questions de fond sont multiples : hétérogénéité des plateformes, gestion des ressources, interconnexion, passage à l'échelle, équilibrage de la charge, tolérance aux pannes.

• **Calcul neuromorphique et architectures bioinspirées** : les limites à la miniaturisation des transistors et à la dissipation de l'énergie produite par ces circuits posent des limites nouvelles à l'augmentation de puissance des ordinateurs. De nouveaux paradigmes doivent être envisagés, s'inspirant du cerveau et des systèmes biologiques en général, capables d'effectuer des calculs haute performance avec une efficacité bien supérieure à celle de nos ordinateurs les plus puissants, et ce très rapidement et avec une très faible consommation énergétique. Basée sur de nouvelles

méthodes de calcul, de nouvelles architectures de traitement de l'information et des composants émergents requis pour leur implémentation, cette recherche à la croisée entre neurosciences, informatique, mathématiques, nanosciences et nanotechnologies donnerait lieu à des applications en forte rupture dans de très nombreux domaines.

- **Droit et usages du droit** : ces recherches sont fortement sollicitées par les innovations des techniques (nanotechnologies, biotechnologies). La recherche en sciences humaines prend les réflexions des acteurs comme objets de recherche, et contribue directement à la recherche de solutions juridiques originales.

- **Intégration des robots dans la vie quotidienne des humains** : elle pose des questions nouvelles sur l'interaction humain-machine, dans de nombreux contextes, le travail, l'industrie, les activités humaines en général.

- **Développement de matériaux émergents** : les méta-matériaux, les isolants topologiques, les oxydes complexes, les thermo ou ferroélectriques, les supraconducteurs, les fluides complexes, les milieux granulaires, les matériaux dits « intelligents », auto-réparant ou à indices négatifs (optique, thermique...) en sont autant d'exemples. Leur développement constitue un défi permanent et enrichissant de tous les secteurs économiques. Pour partie, ces développements s'appuient sur les nanotechnologies mises au point dans le réseau RENATECH, qui permettent non seulement d'élaborer de nouveaux composants électroniques ou photoniques, mais qui ont généré également de nouveaux questionnements scientifiques (physique mésoscopique, polaritons de cavité...)

- **Ingénierie quantique** : les développements basés sur les lois de mécanique quantique, sont aujourd'hui prêts à être utilisés comme une ressource dans des technologies d'une grande portée, pour des réseaux de communication sécurisés, des capteurs sensibles pour l'image biomédicale, la navigation, le dépistage de transactions financières et de nouveaux paradigmes de calcul. Les technologies quantiques ouvrent aussi de nouvelles voies de simulation pour la synthèse de matériaux et également pour l'optimisation d'horloges et de capteurs avec une précision ou une sensibilité sans précédent.

- **Nouvelles technologies de l'énergie, et plus particulièrement les énergies renouvelables** : les défis concernent l'amélioration des rendements de conversion, avec l'apport essentiel de grandes disciplines comme la mécanique des fluides (énergies marines et éoliennes), les procédés de transformation (biocarburants) ou la photonique (photovoltaïque), mais aussi le développement de techniques de stockage de l'énergie sous toutes ses formes (électricité, chaleur, hydrogène...) plus efficaces et plus respectueuses de

l'environnement (prise en compte des principes de l'économie circulaire, du cycle de vie des matériaux) et enfin de nouveaux réseaux de distribution, en particulier d'électricité, avec des développements dans le domaine du génie électrique, des sciences de la communication et de l'électronique de puissance. Ce domaine bénéficie de plus en plus des apports de nouvelles communautés pour faire face aux nombreux enjeux interdisciplinaires sous-jacents, par exemple la disponibilité des ressources minérales pour les énergies renouvelables ou encore les aspects éthiques, juridiques, économiques.

- **Combustion économe et moins polluante** : on retrouve dans cette thématique le développement de nouveaux carburants (biomasse, bio-hydrogène, biergol pour la propulsion spatiale...) et de nouveaux modes de combustion, la prise en compte de l'interface avec les matériaux et les effets de vieillissement induits, une meilleure description des écoulements multiphasiques, le contrôle des écoulements et des instabilités, les simulations prenant en compte le couplage entre tous les mécanismes impliqués (cinétique chimique, phénomènes de transport, écoulement, modes acoustiques, interfaces).

- **Catalyse, catalyse assistée, organo-catalyse, catalyse enzymatique, photochimie, contrôle de l'activation et de la stimulation** : ce sont là autant d'outils permettant l'avènement de changements de paradigme transformant des déchets d'aujourd'hui en ressources de demain dans une démarche qui considère les écosystèmes dans leur globalité : valorisation du dioxyde de carbone, valorisation des flux de chaleur, optimisation des ressources et de l'énergie, l'avènement de procédés éco compatibles, la valorisation des déchets dans des procédés prenant en compte l'ensemble du cycle de vie.

Observations, expérimentations, grands instruments

Dans de nombreux domaines, le questionnement scientifique est issu de l'observation de phénomènes particuliers et peut à son tour susciter de l'expérimentation spécifique pour mieux comprendre les principes de comportement ou vérifier les lois qui sont à l'œuvre.

L'appréhension du fonctionnement des milieux naturels, la Terre, l'Univers, ainsi que la biosphère ou les sociétés, s'appuie sur une démarche d'observation qui permet d'acquérir les données nécessaires à la compréhension des lois de comportement. La notion d'observatoire a accompagné le développement des sciences astronomiques ; elle se développe maintenant pour comprendre l'évolution en cours des milieux terrestres et marins ; elle s'impose également pour détecter la complexité des interactions entre une société et son environnement à une échelle plus locale. Nombre d'observatoires s'inscrivent dans des réseaux nationaux ou internationaux qui permettent de coordonner le suivi de variables essentielles, à l'échelle spatiale pertinente pour en comprendre le fonctionnement : il s'agit par exemple de quantifier les concentrations de gaz à effet de serre à échelle globale pour déterminer leur impact sur le climat, mais aussi d'identifier et localiser leur source pour agir sur les remédiations possibles. Le défi des prochaines années est de mettre en place dans la durée les réseaux d'observation sur l'atmosphère, les océans, les sols, l'hydrologie et la biosphère pour disposer des informations nécessaires permettant de diagnostiquer l'état de la planète et l'efficacité des mesures.

Certains grands questionnements ne peuvent s'aborder sans la contribution de très grands instruments ou infrastructures de recherche (TGIR et IR) ; c'est le cas des domaines de l'infiniment petit (les composants ultimes de la matière et leurs interactions), ou de l'infiniment grand (la composition et la structure de l'Univers). C'est aussi le cas dans les sciences humaines et sociales. La TGIR Progedo, par exemple, permet l'accès des chercheurs à la statistique publique et aux grandes enquêtes ainsi qu'à des données individuelles rendues anonymes. La TGIR Huma-Num coordonne la production collective de corpus de sources quantitatives et surtout qualitatives en diffusant des bonnes pratiques et en mettant à disposition un dispositif technologique inédit pour le traitement, la conservation, l'accès et l'interopérabilité des données.

Ces questionnements se définissent alors le plus souvent à l'échelle internationale, et la présence des équipes françaises est très significative et indispensable au maintien de notre

compétitivité. La France, à travers le CNRS, a acquis une place importante dans la construction, la mise en œuvre et l'exploitation de ces grands instruments. Le CNRS coordonne l'implication des équipes nationales dans les grands projets. Il organise la prospective nationale dans les domaines concernés et participe à l'élaboration de la feuille de route nationale des infrastructures de recherche. Il est l'interlocuteur des organismes et agences européennes et internationales et ses chercheurs sont moteurs dans la définition et la mise en pratique des priorités scientifiques nationales et internationales.

Les grands instruments sont au croisement de différentes communautés scientifiques qui, travaillant ensemble, accroissent la performance de leurs analyses et créent de nouveaux questionnements. Les outils expérimentaux (instruments, plateformes technologiques, moyens de calcul) sont essentiels aux recherches de pointe. Rarement présents « sur étagère », ils sont développés par les chercheurs et ingénieurs qui les inventent et deviennent eux-mêmes des vecteurs de recherche conduisant à des avancées sensibles. L'interdisciplinarité est en effet au cœur des grands instruments, qu'il s'agisse de la caractérisation de la matière inerte ou vivante (rayons X, neutrons, RMN, ...), de l'auscultation par télédétection de l'Univers ou de la Terre, de la gestion et de l'exploitation des données expérimentales (par exemple en physique des particules, en environnement ou bio-santé) et des données d'observation (en astrophysique, en observation de la Terre, en SHS, ...), de la reproduction des conditions extrêmes de la nature (particules élémentaires, conditions de pression, température, champ magnétique), etc. Des plateformes d'analyse, des réseaux instrumentaux, des Très grands instruments de recherche (TGIR) sont mis en place pour répondre aux besoins de la recherche. De nouveaux sujets de recherche requièrent de nouveaux instruments, comme on le voit avec la mise en place récente des écotrons et des stations d'écologie expérimentales, la mise au point des sources lasers de très haute intensité avec des impulsions ultracourtes ou encore le développement de laboratoires sous-marins pour la détection des neutrinos cosmiques : le positionnement de la recherche française est dépendant de sa capacité à développer l'instrumentation nécessaire pour rester sur les fronts avancés de la recherche.

Il convient aussi de souligner que ces instruments sont toujours à la limite de l'état de l'art de la technologie au moment où ils sont décidés. Leur réalisation est en soi un ensemble d'actions de recherches et de développements

technologiques, dont l'objectif est de fait très focalisé, mais qui sont souvent porteuses d'avancées significatives : dans les années 60, les besoins des expériences de physique des particules ont conduit à des progrès importants en électronique, de même aujourd'hui pour la micro-électronique intégrée aux systèmes de détections (électronique-détecteurs 3D), ainsi que les besoins de forts champs magnétiques qui demandent de nouveaux matériaux supraconducteurs ; le besoin de détection par caméra ultra-rapide pour traiter les informations en provenance des grands télescopes a également stimulé des retombées industrielles. La très récente détection, par l'interféromètre LIGO, des ondes gravitationnelles est un autre exemple de recherche nécessitant le développement d'installations à la frontière de nos savoirs. Elle est le résultat de plus de 20 années d'efforts expérimentaux, technologiques et théoriques. Les cavités dans lesquelles se propagent les lasers de l'interféromètre VIRGO sont les plus grands volumes à ultra vide en Europe et le délicat dépôt de couches minces sur les miroirs de VIRGO et LIGO a été effectué dans le Laboratoire des matériaux avancés du CNRS.

Ces développements et avancées ont des retombées importantes vers d'autres disciplines, et sont souvent l'occasion de partenariats forts entre le monde académique et les acteurs industriels. D'autres développements, tel le Web, inventé pour faciliter la communication entre les chercheurs des grandes collaborations de physique des particules, sont aujourd'hui à la base de milliers d'applications quotidiennement utilisées par tout un chacun.

La construction et l'exploitation de ces grands instruments se conçoivent dans la durée. Il aura, par exemple, fallu plus de 20 ans de développement et de construction pour les

expériences au LHC (Large Hadron Collider) au CERN, entre les premières R&D et la mise en service des détecteurs et des premiers faisceaux. Les prises de données vont se dérouler sur une échelle de temps similaire. Si ce cas est extrême, une durée de 10-20 ans est caractéristique d'une grande partie des projets nécessitant la construction de grands instruments et la durée de vie des instruments eux-mêmes dépasse souvent les trente ou quarante années. C'est le cas également de l'investissement dans la participation aux missions spatiales. L'ampleur des investissements consentis et la taille des équipes engagées nécessitent, par ailleurs, le développement d'outils et méthodes adaptés à la gestion de grandes infrastructures de recherche et plateformes. D'autres outils doivent être aussi développés pour accompagner l'implication des équipes dans les grandes expériences (système d'information projet, organisation de prospectives scientifiques et techniques, revues de projets, outils de collaboration, etc.). La puissance du CNRS permet aux équipes françaises de rivaliser et collaborer avec les grands acteurs internationaux du domaine. La position éminente de la France dans le domaine des humanités numériques, par exemple, a été reconnue en Europe, car elle s'est vu confier la direction du consortium européen de l'infrastructure de recherche DARIAH (Digital Research Infrastructure for the Arts and Humanities).

Les plus grandes avancées scientifiques sont souvent le fruit d'efforts importants consentis sur des durées longues par les meilleures équipes. Les très grands instruments sont au cœur de la démarche de recherche elle-même. Ils permettent de mettre les outils d'investigation les plus performants à disposition des meilleures équipes internationales travaillant aux frontières de la connaissance.

Données, simulations, imagerie

Aujourd'hui, la science vit une révolution qui conduit à un nouveau paradigme selon lequel la science est dans les données. On pourrait y voir un retour au naturalisme combinant observation et collection comme source idéalement objective de connaissances, mais force est de constater l'intrication des processus qui conduisent à la génération de ces données. Ainsi la notion même de données brutes ou objectives est en soi un challenge pour leur consolidation, leur qualification et leur contextualisation. La production massive de données par des expériences scientifiques – les spectroscopies, le séquençage de génomes et des protéomes, l'imagerie, la simulation numérique, l'observation à grande échelle (satellites, radars, réseaux de capteurs

mobiles ou fixes) – et par des populations – organisées en réseaux sociaux (notamment via Internet) ou munies d'objets connectés (smartphones, caméras, capteurs corporels) – offre un espace numérique d'investigation scientifique jamais égalé. On dispose ainsi de plus en plus de données caractérisant des objets très complexes, impossibles à comprendre et à modéliser de façon « classique ». En variant (c'est l'idée de diversité) les conditions expérimentales, les types de capteurs, en empilant des tranches temporelles, etc., on obtient un ensemble de n expériences relatives au même objet, ensemble que l'on peut représenter par un « hypercube » (tenseur) de données à n dimensions. Dans tous les domaines scientifiques, en sciences du vivant (génomique,

imagerie, etc.), physique des particules, sciences de l'univers, chimie quantique, études de populations (réseaux sociaux, données géographiques, etc.), les travaux scientifiques engendrent désormais des volumes considérables de données hétérogènes et multidimensionnelles nécessitant le développement de nouvelles méthodes et de nouveaux outils pour leur analyse, leur stockage, leur manipulation et leur visualisation. Le traitement et l'analyse de grandes masses de données sont ainsi en passe de devenir le quatrième pilier de la science liant la théorie, l'expérimentation et la simulation. Les outils mathématiques, notamment ceux relevant de la statistique, de l'algèbre ou de la topologie, sont traditionnellement très présents dans l'analyse de données, mais de nouveaux concepts et outils mathématiques, algorithmiques, logiciels et instrumentaux (grilles) sont nécessaires pour aborder le traitement de données massives. En particulier les avancées technologiques sur le stockage et l'indexation des données, l'accès à des sources de données hétérogènes et massivement distribuées, l'optimisation de ces accès à l'aide d'architectures parallèles, l'algorithmique des très grands graphes ainsi que les réseaux haut débit sont autant de facteurs indispensables pour la fouille et l'analyse de données dans des échelles de temps acceptables. L'extraction de connaissances, l'apprentissage (statistique, « profond », supervisé ou non), l'agrégation de données, la visualisation et la navigation dans de grands espaces de données sont autant d'instruments qui permettent d'observer et de découvrir des phénomènes, de valider des hypothèses et d'élaborer de nouveaux modèles. Cette démarche est particulièrement intégrante et transversale, concernant tous les champs disciplinaires et articulant des développements les plus fondamentaux aux plus appliqués. Le CNRS s'est déjà largement impliqué dans cette nouvelle dimension de la recherche, en particulier depuis 2012 à travers le « Défi MASTODONS », mais aussi plus récemment avec la création d'un groupement de recherche « MaDICS » pluridisciplinaire dont la vocation est de structurer et d'animer une nouvelle communauté en émergence.

En s'appuyant sur ces données, la compréhension, la description et la prédiction du comportement de systèmes dits complexes nécessitent le développement de modèles mathématiques innovants capables de prendre en compte leur complexité et leur réalité. Ces modèles reposent sur des concepts et outils génériques et transverses qui permettent d'étudier leurs propriétés qualitatives (effets d'échelle, stabilité et instabilité, non-linéarité, paramètres significatifs) et quantitatives. Pour expliquer les données et découvrir les variables latentes, on peut s'intéresser à des factorisations tensorielles, couplées entre plusieurs jeux de données, avec des contraintes pour en garantir la pertinence : rang faible, propriétés désirables des facteurs (par exemple la positivité pour une concentration). Pour expliquer les liens complexes entre les données, on utilise des représentations par graphes (connectivité du cerveau, réseaux sociaux, ontologies), pour

lesquels des méthodes nouvelles d'analyse doivent être inventées. Pour rechercher une information particulière noyée dans les données, on doit développer des représentations adaptées (dictionnaires) et concevoir de nouvelles approches de data mining. L'étude de ces modèles repose aussi sur des simulations numériques faisant appel aux concepts et algorithmes les plus avancés (espace discrétisé, calcul en réseau) et aux moyens les plus puissants de calcul intensif (HPC) ou distribué (Cloud computing, grilles), qu'il convient de co-construire entre les différents acteurs de la modélisation, toutes disciplines confondues. Pour renforcer les synergies entre ses différents instituts sur des sujets associant ainsi étroitement problématiques de traitement de grandes masses de données et moyens de calculs intensifs, le CNRS a récemment mis en place une Mission Calcul et Données (Micado). Le rôle de cette mission « Micado » dépasse largement le seul cadre du CNRS et vise également à structurer sur tous les grands sites universitaires des pôles régionaux « Calcul et Données », les premiers exemples étant CALMIP à Toulouse et GRICAD à Grenoble.

Cette approche, fondée sur les données, aborde ainsi l'étude multi-échelle de systèmes dans l'espace (de l'Angström au macroscopique) comme dans le temps (dynamique de l'atoseconde aux années-lumière) en intégrant leurs complexités et leurs spécificités (non-linéarité, non-idéalité). Les systèmes abordés couvrent : de la molécule à la cellule et à l'organisme pour le vivant (biologie systémique), de la particule à l'atome à l'objet et au dispositif ou au procédé (spintronique, photonique, catalyse, effets quantiques mésoscopiques), de l'individu aux groupes et à la société (génétique et dynamique des populations, systèmes urbains) ou à l'écosystème (environnement, climat, dynamique des populations). Les études *in silico* deviennent ainsi des moyens d'étude complémentaire des expériences *in vitro*, *in vivo*, *in nature* ou *operando* permettant de sélectionner, de discriminer et de faire évoluer les modèles qui deviennent de plus en plus réalistes et prédictifs. Insistons enfin sur le fait que le modèle (physique, numérique, expérimental, voir modèle réduit) est un élément de compréhension du réel, de correction également et que bien souvent, le réel conduit à des recherches propres sur les modèles mathématiques eux-mêmes, sur les algorithmes.

Les données sont fréquemment acquises selon des principes physiques différents, générant des données multimodales hétérogènes. Par exemple, l'activité cérébrale peut être observée par différentes modalités : IRM, EEG, MEG, etc. Outre des questions techniques liées à la nature hétérogène des données (par exemple, mesures faites à des fréquences différentes, données manquantes), de nombreuses questions théoriques difficiles liées à l'analyse de telles données sont ouvertes et doivent être abordées : à quelles conditions plusieurs modalités apportent-elles plus de connaissances qu'une seule ? Quand on dispose de n modalités, sur quels

critères peut-on déterminer les modalités utiles ? Comment combiner les données de ces modalités ? Peut-on calculer les « gains » en performance que l'on peut en attendre ? Dans la diversité, le temps joue un rôle particulier dans l'analyse de systèmes dynamiques ou simplement évoluant dans le temps. Les données contiennent des informations sur la dynamique ou l'évolution de ces systèmes : comment détecter des variations rapides ou lentes dans les modèles, des phénomènes nouveaux brefs, déterminer des relations de causalité entre les données ? Autant de questions ouvertes et difficiles qui sont des défis actuels.

L'imagerie, ou la capacité à donner à montrer à travers un support visuel, est devenue un objet commun et important dans la recherche scientifique comme dans la société, aussi bien pour l'observation de phénomènes, que pour la représentation de résultats, leur discussion, leur transfert et leur valorisation. Ceci est dû à l'importance de la perception visuelle. Cependant, l'imagerie doit, d'une part, tenir compte des caractéristiques du système visuel humain qui est un maillon implicite de la chaîne de traitement, d'autre part, des spécificités des capteurs utilisés

(et le cas échéant des traitements embarqués réalisés au niveau même des capteurs) et, enfin, ne pas perdre de vue qu'elle est une représentation partielle voire simpliste de la diversité des données. L'image constitue à la fois un outil puissant d'analyse et de support à la compréhension et un vecteur indispensable de communication et d'échange d'informations, tant scientifique que vers la société. Les applications sociétales directes (média, loisirs, santé ...) sont un moteur puissant de développement des concepts, des méthodes (mathématiques, algorithmiques) et des supports (hardware) caractérisés par une évolution très rapide (comme l'utilisation des processeurs GPU). Ces techniques d'analyse sont ainsi présentes dans tous les traitements d'image, qu'ils concernent l'imagerie médicale, sismique ou autre, l'exploration multi-échelle et multi-composants de systèmes complexes, l'imagerie synchrotron, la micro-tomographie. L'évolution constante des technologies d'imagerie contribue à renouveler les questionnements scientifiques. Pour catalyser les recherches pluridisciplinaires sur ces sujets, le CNRS a lancé en 2015 un « Défi Imag'In ». L'image, son utilisation, son partage interviendront de plus en plus dans le quotidien de toutes les recherches scientifiques.

Humanités et culture numériques

Les humanités numériques se sont imposées comme un nouvel horizon des chercheur-e-s dans l'ensemble des disciplines et particulièrement en sciences humaines et sociales et à leurs interfaces. Elles transforment aussi bien l'accès aux données de la recherche que les pratiques professionnelles des chercheurs et des ingénieurs ou bien encore que la diffusion des résultats de la recherche vers des publics beaucoup plus diversifiés qu'auparavant.

Les humanités numériques bouleversent la relation entre les chercheurs et les données sur lesquelles ils s'appuient. Les sciences historiques et les sciences de l'érudition sont, par exemple, entrées avec elles dans un nouvel âge du texte bien exprimé dans les activités des bibliothèques numériques, comme Biblissima, donnant accès de façon simple et coordonnée à une documentation massive et enrichie sur les manuscrits et les imprimés anciens. L'élaboration des modèles et d'outils de simulation en architecture, en particulier pour les bâtiments patrimoniaux anciens et contemporains, est, quant à lui, un autre aspect emblématique des possibilités nouvelles qui s'ouvrent dans le domaine de l'art, mais aussi de la création et du design. Il s'agit aussi de renforcer la capacité, en particulier en sociologie, en linguistique, ou encore en économie, à produire des données, ainsi qu'à gérer et à utiliser des données quantitatives produites de manière

exponentielle par nos sociétés mondialisées. Elles inscrivent ces champs de recherche au cœur de l'utilisation du calcul intensif dans le domaine de la finance ou de l'environnement, des grandes données ou encore de la fouille de données par exemple dans l'analyse des nouvelles formes de communication et usages des réseaux sociaux numériques. Le Centre de Données Socio-Politiques met ainsi à disposition des méthodes numériques pour le passage d'enquêtes sur panel à l'ensemble des communautés scientifiques intéressées, et développe des programmes d'ouverture et de réutilisation des données tant qualitatives que quantitatives. Le CNRS continuera à s'employer à donner à la communauté scientifique les moyens et les services aux meilleurs standards internationaux pour la production et l'utilisation de données numériques tout en les inscrivant dans les dynamiques nationales et Européennes dans ce domaine.

Mais l'essor exponentiel de la culture numérique a des effets qui vont bien au-delà de la transformation de la relation entre les chercheurs et la documentation ou les outils qu'ils utilisent. Dans certains domaines, par exemple l'art, la littérature ou l'anthropologie, on trouve ainsi un formidable lieu d'expérimentations qui brouillent les lignes entre la création, la recherche et la consommation d'objets sociaux et culturels. La musicologie est un excellent exemple de ces processus, car

les technologies numériques y sont utilisées non seulement pour la numérisation, mais aussi pour la modélisation de la composition musicale, la reconstitution de partitions disparues ou des sonorités instrumentales du passé, et la reconstitution totale des spectacles disparus (opéra, théâtre...). Les thématiques ou les communautés concernées par ces nouveaux objets se situent le plus souvent aux interfaces avec les autres sciences de l'information ou de l'ingénieur. Les nouvelles formes de socialisation académique en ligne ou encore l'adoption de méthodes innovantes de réseaux pour la recherche et la diffusion du savoir modifient également en profondeur les pratiques ordinaires de la recherche. L'outil Hypothèses.org, développé par le CNRS, accompagne ces nouvelles habitudes communautaires. Les TGIR Progedo et Huma-Num constituent des dispositifs fondamentaux pour accompagner, stimuler et structurer ces nouvelles démarches de recherche.

Écosystèmes

Les écosystèmes sont ici abordés sous l'angle de leur complexité. Les termes complexité et écosystèmes sous-tendent tout à la fois des concepts disciplinaires avec des définitions précises en mathématiques ou en écologie par exemple et le constat très interdisciplinaire que la plupart de nos démarches ont à considérer la globalité des problèmes abordés ; ceci nous oblige à prendre en compte l'étendue de ce qu'il reste à découvrir et constitue ainsi l'objet de la recherche dans une démarche qui associe recherche de base, développements technologiques et applications se nourrissant les uns les autres. La réaction chimique ne prend son sens que dans son contexte : biologie ou procédé industriel et plus largement les processus idéalisés, compris, modélisés, simulés sont parties prenantes de systèmes (écosystèmes ?) complexes pris dans leur globalité.

De plus en plus souvent, la pertinence des analyses repose sur une vision globale : des phénomènes, de la multiplicité des facteurs et de leurs interactions. La vision écosystémique, qui est celle qui pose d'emblée comme démarche l'existant d'un ensemble compris comme un tout, gagne tous les domaines. Le constat est que la compréhension de l'ensemble ne se limite pas à la connaissance des briques qui le composent, ni même aux interactions deux à deux, mais qu'il y a bien un effet d'ensemble. Cette complexité peut se traduire de différentes manières.

La convergence des différentes évolutions technologiques autorise désormais pour les biens, les personnes et surtout

Le troisième impact de l'essor de la culture numérique concerne la diffusion des résultats mêmes de la recherche. Les archives ouvertes, l'édition électronique des revues ou des livres, comme OpenEdition.org, développé par le CNRS, ou encore la multiplication des carnets de recherche et des blogs scientifiques met à la disposition de publics de plus en plus variés des connaissances autrefois enfermées dans des ouvrages souvent peu accessibles. La culture numérique porte donc les connaissances scientifiques au cœur de la société et il appartient au CNRS de mesurer ce mouvement, d'en comprendre les conséquences, et de développer les « pôles » de culture numérique des grands sites de recherche.

les informations, des mobilités massives et peu discriminantes (transport par conteneurs), ultra-rapides (avion), parfois quasi-instantanées (Internet, TV mondiale). Ces éléments recouvrent toute la Planète d'un réseau englobant, l'Anthroposphère, qui s'impose désormais dans ses organisations et les fonctionnements globaux partout et à tous au même titre que la Géosphère ou la Biosphère.

Quelles sont les conséquences de cette (hyper)complexité ? Ce qui était vrai pour les écosystèmes et pour les socio-écosystèmes l'est encore plus pour les écosystèmes très anthropisés qui se retrouvent aujourd'hui sur toute la planète.

On qualifie ces systèmes de complexes, car les différents éléments qui les composent interagissent entre eux et tout particulièrement rétroagissent, inversant ainsi le sens de la causalité qui n'est plus évident (un effet peut devenir cause de sa propre cause). De plus, ces interactions, qui ne sont visibles que très partiellement (boîte noire), engendrent des phénomènes d'émergence imprévisibles qui font que le résultat de nombre de combinaisons ne peut pas être anticipé, car les propriétés qui le caractérisent ne peuvent être déduites des caractéristiques des éléments qui l'ont constitué.

Pour comprendre un système, il faut en connaître les dynamiques ; rétroactions et émergences font que cette connaissance ne peut être acquise par l'analyse, par la simplification (décomposition en éléments et simplification cassent les dynamiques et font disparaître l'objet même de la recherche). Par ailleurs, les niveaux de complexité

sont tels qu'il n'existe aucune mathématique et aucune informatique aujourd'hui capable d'en rendre pleinement compte. Un système complexe ne pourra donc être compris que par l'observation de ses fonctionnements, la formulation d'hypothèses possibles au sein desquelles on tentera de sélectionner au mieux les probables par problématisation, description, comparaisons, expérimentation, répétées autant de fois que nécessaire.

Étudier les systèmes (hyper)complexes, qui sont nos objets de recherche, suppose une démarche scientifique très particulière, qui résulte directement de ces contraintes. Elle doit d'abord être multidisciplinaire : aucune discipline, quelle qu'elle soit, ne peut rendre compte du fonctionnement global d'un écosystème, à cause des interactions. La compréhension ne peut provenir que d'éclairages croisés. L'interdisciplinarité est inhérente à la compréhension. Cet abord croisé par les différentes sciences de l'environnement est appelé « écologie globale ».

Ainsi, on ne peut plus ignorer les composantes sociales, économiques ou politiques des technologies nouvelles. L'étude de n'importe quel milieu demande de connaître le

passé, d'éclairer le présent et de scénariser l'avenir dans un contexte de changement global et repose sur un croisement entre biologie évolutionniste, archéosciences, disciplines paléoenvironnementales, écologie, chimie, etc.

Une autre problématique est l'étude et l'optimisation d'un ensemble d'interactions entre sous-systèmes connectés sur une large gamme d'échelles spatiales, temporelles. Au-delà des réductions statistiques des interactions d'échelle, les comportements globaux peuvent présenter des caractéristiques souvent fort éloignées d'une moyenne, l'apparition de comportements fortement non linéaires, des instabilités, des effets de seuil, des comportements critiques. Les enjeux sont liés aux risques engendrés par la non-prise en compte de ces phénomènes ou, à l'inverse, liés à l'utilisation et au contrôle d'un de ces phénomènes par nature couplés pour agir sur les autres. Ces problématiques sont maintenant centrales en économie, santé, météorologie, pour les grands réseaux (qu'il s'agisse de ceux matériels liés à la distribution d'énergie, de ceux liés à la distribution d'informations comme Internet ou encore ceux, humains, mis en jeu lors d'une pandémie), les processus intégrés en génie des procédés où sont développés des matériaux multiplement fonctionnalisés, et autres.

Le Système Terre

La combinaison exceptionnelle de la géochimie et de la géophysique a créé les conditions nécessaires à l'émergence de la croûte terrestre et des océans, milieux contrastés et riches où la vie a pu se développer. La hiérarchie complexe du vivant s'est construite en interaction avec son environnement, se nourrissant de ressources qui paraissaient inépuisables. La prise de conscience récente des limites de notre planète a mis en relief la profonde dépendance entre les sociétés

humaines et leur environnement, entre le vivant et le milieu, et la nécessité de prendre en considération cette dynamique dans une perspective temporelle élargie.

Pour faire face à ces nouveaux défis, il est nécessaire d'appréhender la complexité du système Terre, d'avancer dans sa compréhension, de développer de nouvelles techniques d'investigation, d'analyse et de modélisation.

Un système complexe au fonctionnement global

Le système Terre est un système complexe dont la modélisation implique la prise en compte des échanges entre milieux et avec l'extérieur, des interactions internes entre processus et ce, à différentes échelles.

En effet, dans le contexte du changement global, il est fondamental de comprendre les différentes interactions entre les grands éléments physiques du système Terre (atmosphère, hydrosphère, cryosphère, lithosphère, continents) et le Vivant

(populations, espèces, des gènes aux écosystèmes). Un socle de connaissances fondamentales reste à constituer sur les processus physico-chimiques et écologiques dans leur évolution et leurs interactions avec les systèmes socio-économiques.

La compréhension des facteurs, qu'ils soient naturels ou anthropiques, qui régissent ces processus est essentielle : interactions entre les grands fluides (océan, atmosphère,

lithosphère) et les grands cycles géochimiques, climat et biodiversité, capacité adaptative et évolutive des organismes et des populations, circulation générale de l'océan et interface océan-atmosphère, mécanismes d'auto organisation des systèmes, stockage du carbone et des gaz à effet de serre, rôle des sols... Les besoins de recherche demeurent sur les mécanismes de base – du vivant (caractérisation, capacité de s'acclimater ou d'évoluer, dynamique des populations), modalités de sa structuration spatiale à petite versus grande échelle, comme du climat (variabilité naturelle annuelle à décennale, paléoclimat, liens avec l'océan et les surfaces continentales) – afin de pouvoir développer des méthodes d'anticipation, voire de prévision aux échéances temporelles et spatiales pertinentes pour répondre aux enjeux de durabilité.

Une meilleure compréhension du fonctionnement de la planète s'appuie non seulement sur le développement des études de processus chimiques, physiques, biologiques qui s'y expriment, mais surtout dans leur réintégration dans une vision systémique et évolutive, prenant en compte les notions de cycle à travers les milieux et les échelles de temps et d'espace, ce qui nécessite une modélisation multi-échelle à laquelle le CNRS consacre des efforts importants à travers les actions incitatives LEFE (Les enveloppes fluides et l'environnement) et EC2CO (Écosphère continentale et côtière). Certaines ressources que possède la Terre se sont formées sous des conditions de pression et de température très spécifiques, il y a quelques millions voire milliards d'années, d'autres sont en formation ; il s'agit de mieux comprendre comment sont créées les ressources pour en tirer une exploitation raisonnée et de meilleurs services dans la

durée. Les ressources minérales de la terre profonde ou les ressources « fossiles » comme les charbons et fuels formés il y a plusieurs centaines de millions d'années, révèlent le fonctionnement de la Terre primitive et leur exploration donne lieu à des partenariats entre CNRS et grands industriels ; les aquifères profonds se renouvellent en dizaine de milliers d'années, la ventilation globale de l'océan se compte en milliers d'années, de nombreux phénomènes évoluent ainsi très lentement au regard d'une existence humaine, mais ils sont prégnants dans la détermination des conditions du développement des milieux terrestres. À échelle de dizaines d'années, les sols et les paysages se modifient et entraînent l'évolution des écosystèmes, ou leur disparition. Longtemps considérés comme immuables par les sociétés humaines, les environnements changent sous nos yeux sous l'influence des modes de vie des sociétés. L'imbrication des milieux et des échelles impose de replacer chaque processus étudié dans une approche intégrée pour en comprendre le rôle dans un environnement global. Le CNRS s'est ainsi engagé à participer aux travaux de synthèse du GIEC (Intergovernmental Panel on Climate Change- IPCC), en y apportant les compétences de ses chercheurs dans les 3 domaines : physique du climat, vulnérabilité des systèmes socio-économiques et naturels et adaptation, et atténuation. Il a soutenu le développement de la modélisation permettant de construire les projections climatiques, ainsi que le développement de modélisation intégrée Climat/Carbone/Économie. De la même façon, ses chercheurs participent activement aux travaux de l'IPBES (Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services).

Un système complexe en observation

Les travaux de recherche sur le système Terre s'appuient sur des démarches d'observation, d'expérimentation et de modélisation.

• **Planétologie comparée et exoplanètes** : Ce n'est qu'en 2008 que la première observation directe d'exoplanète a été réalisée et les capacités grandissantes des télescopes ont très rapidement multiplié le nombre de planètes extrasolaires sans que l'on puisse encore vraiment détecter leur potentiel à faire émerger les conditions propices de la vie, qui reste un défi à relever et sur lequel le CNRS est très présent. Plus proche de nous, l'exploration des planètes du système solaire présente un terrain extrêmement fertile pour comprendre les phénomènes géologiques et chimiques qui permettent l'émergence des corps planétaires et de l'évolution permettant la création de croûte terrestre, d'océan et de sol comme l'a récemment montré le Rover Curiosity sur Mars.

• **Observation de la Terre** : L'observation sur l'atmosphère et l'océan s'organise progressivement dans le cadre des services d'observation et des pôles de données nationaux qui rassemblent données spatiales et in situ et contribuent au programme européen COPERNICUS (inscription dans la feuille de route nationale –et européenne- en infrastructure de recherche). Il s'agit d'organiser les observations sur les surfaces et interfaces continentales (Infrastructure en construction), en rassemblant notamment les travaux sur le sol, le sous-sol et l'eau, le littoral, les estuaires et les eaux de transition inclus, l'état et la dynamique de la biodiversité, avec notamment le développement de nouveaux instruments de mesure (par exemple des capteurs fiables et économiques). Rassembler et développer l'interopérabilité de ces observations permettra d'appréhender les cycles biogéochimiques dans leur globalité en couvrant l'ensemble des processus majeurs.

Le développement des techniques et des procédés et la miniaturisation des capteurs ont ouvert une ère sans précédent pour recueillir les observations depuis l'espace, sur la composition de l'atmosphère (satellites IASI, Calipso, Cloudsat et à venir Merlin, Microcarb), le niveau des océans (satellites TOPEX-POSEIDON, JASON), les écosystèmes marins et terrestres, les sols et l'eau en surface comme en profondeur (satellites GRACE, SWOT), le magnétisme et la géodésie... Les signaux spatiaux, combinés aux indispensables observations de terrain, informent en temps réel sur les conditions à la surface terrestre, météorologiques, hydrologiques, chimiques, agronomiques, ainsi que sur les risques. L'enjeu est de parvenir à une couverture globale des variables considérées comme essentielles, avec la résolution spatiale pertinente pour comprendre le fonctionnement des fluides turbulents que sont l'atmosphère et les océans, et des écosystèmes qu'ils abritent. Une nouvelle exigence provient des questions portant sur l'évolution des phénomènes qui impose un suivi dans la durée, que ce soit la modification des lignes de côtes, la fonte des calottes polaires, le devenir des aquifères, les migrations des écosystèmes, la surveillance des émissions des GES et des aérosols, et les risques telluriques, séismes et volcans. La météo de l'espace, qui observe les liens entre la Terre et le soleil et les conséquences des éruptions solaires, est également un axe en développement. Le développement des techniques (forages profonds, tomographie, géochimie) bénéficie aussi à l'exploration de la Terre profonde et des paléoenvironnements.

• **Techniques O-miques & nouvelles méthodes** : Le développement rapide de nouvelles méthodes et technologies analytiques a conduit ces dernières années au développement d'une grande diversité d'approches d'observation et de collection de données à l'échelle atomique ou moléculaire, regroupées sous le nom générique d'O-miques. Cette démarche, basée sur l'observation et la collection de données, présente des enjeux très interdisciplinaires, tant sur le plan de l'acquisition des données que sur le plan de leur consolidation et de leur traitement.

• **La modélisation** : La compréhension et l'interprétation des observations conduisent à la modélisation des éléments du système Terre ; elle vise à proposer des systèmes d'équations portant sur des variables bien choisies, dans l'objectif de rationaliser les comportements observés, qu'il s'agisse des fluides géophysiques comme océan ou atmosphère, des systèmes viscoélastiques comme la cryosphère ou les magmas, ou des techniques d'auscultation (nouvelles méthodes de traitement des propagations d'onde, tomographie du noyau terrestre...). L'analyse mathématique de ces équations, quelle soit théorique ou numérique, s'est imposée comme un mode d'investigation privilégié des systèmes complexes, ouvrant la voie à des méthodes prédictives (développement de l'océanographie opérationnelle avec la participation du CNRS au centre français d'analyses et de prévisions océaniques Mercator-Océan et de la prévision de la qualité de l'air, investigation de la prévision climatique décennale, et dans le domaine des risques telluriques avec les tsunamis, tremblements de terre, prévisions d'érosion). De nombreuses questions restent encore à investiguer sur les interfaces entre milieux et les couplages, sur les transferts d'échelle en temps comme en espace, et sur les non-linéarités intrinsèques de certains systèmes. L'exploitation numérique des observations, par méthodes inverses ou par assimilation variationnelle, s'appuie sur le développement de nouvelles méthodes adaptées aux systèmes de grande taille, nécessitant des approches mathématiques renouvelées en lien avec le calcul haute performance. Le CNRS a été pionnier dans ce domaine et a permis le développement de méthodes variationnelles avancées mises en œuvre dans les centres opérationnels (en météorologie par exemple). Les questions de traitement et de visualisation des données sont également des enjeux importants dans ces domaines.

Apprendre de la nature

La prise en considération, nouvelle, de l'environnement et de la dépendance entre milieu biotique et abiotique conduit à explorer de manière attentive les fonctionnements chimiques et biologiques à l'œuvre dans la nature que ce soit dans la biosphère terrestre, végétation ou sol, ou dans les milieux marins, conduisant à l'émergence de nouveaux procédés chimiques et des voies de synthèse propres

permettant d'éliminer l'utilisation de substances néfastes pour l'environnement, donnant lieu au développement d'une nouvelle chimie et des bio-technologies. L'étude du fonctionnement des écosystèmes encourage aussi la proposition de méthodes de remédiation (ingénierie écologique) nécessaires à la restauration des environnements dégradés.

De nouvelles valeurs pour construire la société de demain.

Un enjeu, et non des moindres, est de construire un avenir pour l'espèce humaine dans l'environnement terrestre, où seront valorisées à leur juste valeur les ressources environnementales et les services qu'elles rendent. Les recherches permettront d'appréhender l'évolution des écosystèmes, leur adaptation, leur résilience, et leur capacité à livrer une multiplicité de services écosystémiques. Elles aideront à concevoir ou re-concevoir les systèmes productifs reposant sur une meilleure connaissance de l'écologie fonctionnelle, afin d'améliorer leur durabilité. Les défis de demain concernent à la fois une meilleure résilience et une meilleure utilisation des ressources renouvelables, avec pour conséquence : une amélioration de la qualité de l'environnement (eau, sol, air), une renaturation de la

biodiversité, une gestion intégrée des systèmes (productifs) dans les paysages, les territoires, les zones côtières et hauturières.

Il s'agit par exemple de comprendre les interactions entre les usages compétitifs des sols, producteurs de textile, d'alimentation, de biomasse, d'espace récréatif ou industriel, et séquestreur de carbone, et le fonctionnement des transactions d'échelle locale à globale, et le marché mondial ; de même, il faut étudier les interactions entre les usages du littoral pour la pêche, l'aquaculture, les sites de récréation, la préservation des aires marines protégées, la production d'énergie marine, le commerce marin international, et les enjeux économiques.

Sociétés

Le domaine sous ce titre est infini. Mais le CNRS choisit de se focaliser sur certaines questions majeures aussi bien pour l'évolution des disciplines que pour celle de nos sociétés. Les quatre premières constituent des plus-values du CNRS déjà importantes dans le paysage de la recherche qu'il s'agit désormais de mieux enraciner. Les suivantes correspondent à des développements à peine entamés et qu'il convient de conduire de façon résolue au cours des dix prochaines années.

La formalisation des systèmes sociaux, la modélisation et la simulation ont rencontré des succès importants notamment en économie, en linguistique et en géographie. Il s'agit aujourd'hui d'élargir et d'approfondir les méthodes, y compris lorsque l'on traite des grandes masses de données, et de poursuivre le recrutement d'ingénieur-e-s et de chercheur-e-s acteurs-trices de ces démarches nouvelles.

Les humanités numériques révolutionnent actuellement la recherche dans de nombreux secteurs des humanités. Le CNRS a été l'un des lieux majeurs de son développement

en France et en Europe. Il s'agit désormais de maintenir les investissements en ressources humaines afin que le basculement se poursuive et s'achève.

Les études aréales sont aujourd'hui d'une importance considérable tant la connaissance des réalités des autres régions du globe est indispensable aussi bien aux activités marchandes ou de services qu'à une vision géostratégique des évolutions du monde. Le CNRS dispose dans ce champ de forces importantes qu'il doit renforcer, en particulier par le recrutement de chercheurs spécialistes des différentes « aires culturelles ».

La prise en compte de la variable genre dans les recherches n'est plus un défi, mais une évidence. Mise en avant par les SHS, cette dimension concerne toutes les disciplines scientifiques, car l'expérience récente montre, par exemple, qu'en biologie la prise en compte du sexe change aussi les méthodes et les résultats de la recherche. Il s'agit désormais d'intégrer cette dimension dans toutes les recherches.

À développer de façon prioritaire au cours des dix prochaines années :

• La recherche dans les sciences du comportement

est très développée en Europe et aux États-Unis et connaît un essor remarquable en raison de son importance dans de nombreux programmes interdisciplinaires impliquant les neurosciences intégratives, la justice, la sécurité, l'économie. Or il s'agit d'une notion encore assez mal définie. Il importe de se la réapproprier dans un nouveau contexte de collaboration entre sciences cognitives, neurosciences affectives et sciences sociales, et d'émergence de nouveaux outils (data, traçabilité) qui permettent d'élargir de façon inédite les possibilités de connaissances sur les comportements humains.

• **L'éducation** est un thème de recherche, d'expérimentation sociale et de débat public majeur, dans un grand nombre de pays, en particulier ceux de l'OCDE. Mais la France est très en retrait par rapport à cette tendance alors que son système d'éducatif n'est pas au mieux. Il paraît urgent de soutenir des recherches interdisciplinaires qui associeront des unités et des disciplines variées (cognition, psychologie, langage, sciences et technologies de l'information, sociologie, systèmes complexes, histoire, littérature, philosophie) pour réfléchir aux formes de l'innovation en éducation/formation.

• **La sécurité humaine** émerge comme priorité de façon entièrement renouvelée. Elle était jusqu'au XXI^e siècle vue soit comme une question purement sociale (l'insécurité sociale, la vulnérabilité) relevant des formes de vie et pas de la préservation de la vie en tant que telle ; soit comme un principe de contrôle des existences et des sociétés humaines, de domination sous prétexte de protection. Les événements violents des dernières années ont suscité un renouvellement de la question de la sécurité et de recherches sur les différentes façons de protéger les citoyens, sur l'égalité de traitement et de protection des populations en contexte violent. Il s'agit désormais aussi d'impliquer la recherche dans la réflexion sur les différents ordres de sécurité plus spécifiques et pratiques (techniques de détection des risques, analyses comportementales nouvelles par l'usage des grandes masses de données, nouveaux indicateurs...) ; d'utiliser sa capacité critique pour maintenir l'exigence de défense des libertés dans un contexte de surveillance, sa capacité d'analyse pour éviter les amalgames dans les commentaires, et son aptitude à poursuivre une réflexion transversale entre des disciplines aussi différentes que les sciences sociales, les recherches en ingénierie sur la cybersécurité et les sciences de l'information.

• **La vulnérabilité et la sécurité** sont des questions qui dépassent nos frontières. Les approches globales, les questions de justice spatiale, l'étude des inégalités environnementales, l'exposition des populations aux situations

de crise, la cumulativité des vulnérabilités, les capacités des personnes et des groupes, constituent des objets de recherche importants depuis que des catastrophes ou désastres au long cours impactent durablement l'ensemble de la planète, les déplacements et évolutions des populations. La question des migrations internationales et la « crise des réfugiés » sont devenues un enjeu majeur, qui nécessite un engagement concerté de toutes les disciplines.

• **Les sciences sociales et humaines des religions.** Il s'agit ici de partir du constat de la diversité dans le temps et l'espace des références faites à une religion pour rendre compte d'une pratique, d'une action, d'une orientation normative... individuelle ou collective. Il faut en éclairer le sens, les aborder dans toute leur diversité sans négliger leurs interactions. Cela exige de promouvoir un décloisonnement systématique des approches disciplinaires dans leurs dimensions confessionnelles/culturelles des faits religieux, dans une perspective de confrontation, de reconnaissance et d'articulation des apports propres à chaque discipline. Il s'agit de travailler à partir de prismes complémentaires, en refusant la tendance à séparer les modes d'approches du religieux, très notable dans le champ des études à l'Islam, mais présent ailleurs aussi : histoire doctrinale, sociologie, étude des systèmes de sens, analyse des pratiques des acteurs.

• **L'innovation et la révolution numérique** transforment en profondeur la société. L'économie des marchés bifaces qui analyse les organisations qui s'adressent simultanément à deux types de clients ou utilisateurs permet de comprendre les effets industriels des plateformes technologiques et de définir de nouvelles politiques de concurrences adaptées à ces nouveaux acteurs. Parmi les défis sociétaux engendrés par la révolution technologique, l'utilisation et la protection des méga-bases de données personnelles engendrent une recherche associant chercheur-e-s en sciences sociales, en sciences de l'information et en sciences biologiques. Par ailleurs, les nouvelles formes d'emploi et de sociabilité nécessitent une approche dépassant les clivages disciplinaires entre économistes et sociologues.

• **La macroéconomie financière** analyse les interactions entre l'économie réelle et la sphère financière. Les travaux étudient les effets des systèmes bancaires et d'assurances et des marchés financiers sur la dynamique macro-économique. L'analyse de leurs défaillances et de leurs imperfections permet de repenser, dans un monde globalisé, une régulation optimale du secteur financier et des interventions adéquates des autorités monétaires. L'utilisation d'importantes bases de données financières, avec parfois une réelle dimension historique, couplée à des modélisations intégrées permet de renouveler la macroéconomie traditionnelle.

• **Souvent présenté comme une forme d'incarnation de la nation, le patrimoine** prend aussi de plus en plus souvent des dimensions l'éloignant de cette fonction politique très étudiée. Il se décline à des échelles infra et supranationales (locale à mondiale, avec la liste du Patrimoine mondial de l'UNESCO), et prend des formes de plus en plus diversifiées (patrimoine culturel matériel et immatériel, patrimoine naturel, patrimoine numérique, paysages...). L'étude des évolutions des usages matériels et symboliques du patrimoine, des débats sur son extension, sa conservation ou les interventions qu'il peut supporter, est nécessaire pour comprendre la diversité des enjeux sociaux, économiques, culturels et politiques associés dont il est l'objet pour de nombreux acteurs.

• **Les impacts des changements environnementaux :** la pratique de l'interdisciplinarité en permet une approche intégrée allant de l'étude sociétale du risque environnemental à la perte de biodiversité, en passant par les dimensions culturelles et économiques, qui permettent le développement de modèles prédictifs. La notion de justice spatiale, l'étude des inégalités environnementales, l'exposition des populations aux situations de crise, la cumulativité des vulnérabilités, les capacités des personnes et des groupes, constituent des objets de recherche importants pour demain.

L'étude fondamentale du vivant

Les sciences du vivant sont en évolution, voire en révolution, tant dans leurs pratiques, dans leurs découvertes que dans leurs implications dans et pour la société. L'ampleur des découvertes des deux dernières décennies remet en cause leurs dogmes et leurs concepts. La biologie s'est ouverte à des espaces insoupçonnés, tant dans le champ de ses observations et de ses analyses que dans ses approches. Si son but reste l'exploration du vivant, elle l'embrasse désormais dans toutes les échelles de temps, de dimensions et d'espace. Elle vise à le comprendre dans son intégralité et dans son histoire. La biologie devient nanométrique, mais aussi intégrative. Elle devient numérique, prédictive, synthétique. Elle décrypte les génomes, elle donne des images à leur expression. Pourquoi ce redimensionnement spectaculaire ? Essentiellement par le développement de nouvelles technologies et parce que les concepts utilisés en biologie se sont enrichis de ceux d'autres disciplines, les deux phénomènes bouleversant les approches du monde vivant : son étude est désormais traversée par les mathématiques, la physique, la chimie, la robotique, l'informatique, les sciences de l'environnement, les sciences cognitives, les sciences sociales. La recherche sur le vivant ne se fait plus comme il y a 20 ans, elle traverse un tournant majeur.

Il n'est pas question ici de viser à l'exhaustivité. Il ne s'agit pas non plus de modeler l'avenir des sciences du vivant sur la connaissance déjà acquise, un procédé stérilisant pour ces sciences. Il s'agit d'identifier quelques-uns des grands bassins d'exploration où la recherche mondiale s'inscrit dans le futur et où le CNRS a les atouts pour en être l'un des leaders.

• **Qu'est-ce que le vivant ? Quelle est son histoire ?** La première rupture repose sur le constat que les biologistes ne sont pas certains d'avoir identifié toutes les formes du vivant sur la terre. L'inventaire déjà réalisé est basé sur une définition du vivant cadrée sur des connaissances acquises il y a plusieurs décennies. Mais on sait désormais qu'il existe une « matière noire » du vivant et que toute vie ne repose pas forcément sur les piliers métaboliques où les biologistes l'avaient cantonnée. C'est pourquoi il est fondamental de continuer l'exploration sur terre des formes que prend la vie. Non pour viser à l'exhaustivité par l'établissement d'un catalogue complet, mais pour identifier des formes de vie insoupçonnées dont le fonctionnement est en rupture avec notre cadre de pensée actuelle. Citons comme exemples de ce type d'investigation la découverte des mégavirus, échappant aux classifications virus/procaryotes/eucaryotes, la richesse insoupçonnée de la biodiversité planctonique révélée par l'expédition Tara, la présence d'organismes vivants (mais inaccessibles pour le moment) dans des lieux considérés comme incompatibles avec la vie (nuages, permafrost, fumeurs noirs, etc.), ou la découverte très récente d'organismes eucaryotes dépourvus de mitochondries, l'organite considéré jusqu'à présent comme essentiel à la vie eucaryote. La seconde rupture concerne les origines de la vie, incertaines tant sur le plan de leur(s) date(s), que sur leurs modalités et sur la nature des premières formes de vie, comme cela est illustré aujourd'hui par les débats sur l'existence d'organismes pluricellulaires il y a 2,1 milliards d'années (l'apparition du vivant complexe était jusque là estimée à 660 millions d'années) et sur l'impact de l'oxygène sur l'émergence de la vie, autant de questions liées aux succès futurs de l'exobiologie : comprendre l'origine du

vivant sur Terre est un élément essentiel pour trouver la vie ailleurs dans l'Univers. La troisième rupture concerne l'histoire du vivant. L'évolution est le résultat d'un processus historique et de ses contingences. Son étude pose la question fondamentale des mécanismes qui engendrent de la nouveauté, beaucoup moins bien connus que ceux qui procèdent par élimination. Les ruptures à venir concernent essentiellement le champ des grandes transitions évolutives (origine des eucaryotes, de la multicellularité, de la sexualité, question ouverte de la préexistence des gènes avant leur utilisation, émergence des sociétés et de la conscience, évolution des hominidés, etc.) et celui des mécanismes de l'évolution (duplication des génomes, importance sous-estimée des transferts horizontaux, concepts d'adaptation et de variabilité, nouvelles formes d'hérédité et épigénétique, influence de l'environnement...).

• **La complexité du vivant.** La prise de conscience relativement récente de la complexité extrême et insoupçonnée du vivant, quelles que soient les échelles (temps, dimensions) considérées, a conduit au constat que les approches réductionnistes qui formaient l'essentiel des méthodes d'investigation du vivant sont insuffisantes pour appréhender les niveaux de complexité en jeu. Il importe désormais de s'appuyer sur des approches intégratives et quantitatives, en parallèle des approches traditionnelles. En particulier, les processus du vivant doivent être analysés, quantifiés, modélisés : ce qui est complexe et apparaît « magique » est en fait déchiffrable, et les propriétés émergentes et les principes d'auto-organisation restent les mêmes aux différentes échelles. Les ruptures actuelles résident dans l'introduction d'approches multi-échelles (de la cellule unique à la quantification de la biodiversité), à l'émergence d'une biologie quantitative capable d'analyser la modularité et les combinatoires, à l'introduction de la mécanobiologie... La caractérisation des mécanismes du vivant et l'intégration de ces informations dans des modèles appropriés devraient non seulement permettre de rationaliser les résultats expérimentaux, mais également de prédire le fonctionnement et l'évolution des systèmes. Ces défis ont déjà déclenché le développement de la biologie des systèmes et des champs de la biologie synthétique consacrés à la modélisation de la vie et de l'ingénierie. Néanmoins, les verrous restent multiples : limite d'appréhension de l'échelle temps, insuffisance d'une formalisation unifiée des données brutes les rendant intelligibles par des machines et nécessité de passer à des descriptions probabilistes. En revanche, les enjeux sont énormes, impliquant le passage d'une description corrélative à une description causale et sur la compréhension des sauts d'échelle. À titre d'exemple, il s'agira de comprendre la nature de la complexité (juxtaposition en mosaïque de propriétés individuelles ? Émergence de propriétés nouvelles ?), de déchiffrer les lois

permettant l'émergence des propriétés au niveau moléculaire et leur intégration dans un système de complexité supérieure, de comprendre les comportements collectifs des cellules, les fonctionnements des réseaux de signalisation et les principes d'auto-organisation quelle que soit leur échelle...

• **Neurosciences et cognition.** Plus que tout autre domaine des sciences du vivant, Neurosciences et Cognition sont confrontées à la question de la complexité. Le défi est double, car il s'agit non seulement de comprendre (neurobiologie, neurophysiologie) comment fonctionne l'organe cerveau selon une démarche commune avec les autres domaines de la biologie (génomes et hérédité, métabolisme, compartimentation et dynamique cellulaire, interactions cellulaires, anatomie, physiologie, développement, vieillissement), mais aussi de comprendre comment l'« esprit » émerge du fonctionnement du cerveau. Ceci nécessite d'aborder des aspects de recherches très spécifiques au cerveau (code neural, multi-modalité sensorielle, mémoire, comportements, reconnaissance des objets et des actions) et à l'être humain dans sa dimension sociale (conscience du corps et de soi, pensée, langage, symboles, relations avec autrui...). Un large aspect des travaux sur la cognition est spécifique de l'humain, car notre cerveau est tout autant dans son fonctionnement le fruit de l'évolution qui a conduit à l'humanisation que le fruit de l'expérience, individuelle et sociale, qui façonne notre personnalité. Il importe d'amplifier les synergies entre neurosciences moléculaires, cellulaires, cognitives et computationnelles, et psychologie expérimentale et cognitive pour amplifier le renouveau qui s'amorce sur le plan conceptuel. À titre d'exemple, c'est un travail commun entre spécialistes de psychologie cognitive et de neurosciences sociales et affectives qui permettra d'actualiser, avec d'autres sciences sociales, le potentiel de la psychologie sociale expérimentale en matière d'éducation, de santé, mais aussi d'enjeux sociétaux (comportements des groupes, comportement de l'individu) en relation avec la lutte contre les discriminations et autres formes de sectarisme auxquelles notre pays est confronté.

Il est crucial d'accompagner le renouveau méthodologique de l'exploration du cerveau et de la cognition. Des outils sophistiqués (électrophysiologie intracérébrale réalisée à la faveur d'interventions neurochirurgicales, objets connectés, capture et analyse du mouvement, imageries fonctionnelles, réalité virtuelle...) ont fait leur apparition et se sont imposés comme autant de nouveaux moyens d'exploration du fonctionnement du cerveau et des mécanismes de la cognition. Ces approches génèrent un volume croissant de données numériques. L'avancée des neurosciences et cognition est donc conditionnée par le développement de nouvelles méthodes et de nouveaux outils permettant l'analyse de données de plus en plus massives, leur modélisation et la simulation numérique.

• **Vivant et environnement.** Le tournant vécu actuellement est la prise de conscience de l'importance déterminante d'intégrer l'environnement dans la compréhension des phénomènes biologiques : influence de l'environnement sur les êtres vivants, mais aussi appréhension de l'être vivant comme un écosystème en lui-même. Les ruptures actuelles reposent sur la perception de l'environnement (compris comme biotique, abiotique ou culturel) par les organismes et leur régulation en réponse aux changements environnementaux, sur la notion de niche et de co-construction entre organisme et environnement, sur les modifications de l'environnement par les organismes vivants (et particulièrement par l'homme), sur la variabilité individuelle due à la stochasticité et au bruit de l'environnement et enfin sur l'analyse du microbiote, impliqué dans des fonctions physiologiques fondamentales (nutrition, développement et croissance, immunité, cognition...). Cette vision, qui remet en question le « tout génétique », qui remet aussi en question ce qu'est un organisme (où se situe l'unité ? L'individu est-il un écosystème – holobionte ? Doit-on utiliser les concepts et théories de l'écologie pour mieux le comprendre ?), est récente et impose d'intégrer dans l'étude du vivant les démarches développées par les sciences de l'environnement.

• **Le vivant comme modèle d'étude de sciences non biologiques, la bio-inspiration.** Le domaine de la bio-inspiration, un paradigme qui se base sur les formes de la vie comme source d'inspiration pour le renouvellement des dogmes et avancées d'autres disciplines que la biologie, suit les avancées des sciences de la vie et bénéficie de ses ruptures : renouvellement de concepts de la chimie sur la base de molécules du vivant, calcul neuromorphique et informatique bio-inspirée, imagerie, intelligence artificielle et robotique, matériaux biomimétiques, nano-objets...

Relever de manière réaliste ces défis dépend de quelques conditions élémentaires :

• **Mener des explorations.** Nous ne connaissons qu'une petite fraction des formes de vie de la planète. Sans viser à l'exhaustif, l'identification de formes de vie nouvelles ou passées permettra de comprendre les origines de la vie et de retracer son histoire, de passer de la vue fragmentaire et stéréotypée de leur fonctionnement à une vision globale de leur diversité.

• **S'affranchir des dogmes pour générer les ruptures.** L'unicité du vivant, la théorie cellulaire, le tout génétique, la classification du vivant..., autant de concepts installés avec certitude qui sont remis en question aujourd'hui. Le temps est venu de prendre en compte les règles de la physique, de la chimie et des sciences de l'environnement dans les mécanismes qui génèrent, façonnent et assurent le

fonctionnement du vivant, de s'inspirer des principes des lois de disciplines comme la physique et les sciences humaines et sociales pour dégager celles du vivant. Pour cela, il faut installer les conditions d'une recherche qui ait la possibilité de considérer les problèmes et de poser les questions d'une manière entièrement nouvelle, en s'affranchissant des dogmes. Les programmations thématiques encouragent à creuser des sillons fondés sur de la connaissance déjà acquise. C'est une voie prévisible et nécessaire, mais qui doit s'inscrire en complémentarité d'une recherche permettant la découverte de l'imprédictible.

• **Relever des défis technologiques.** Malgré des avancées d'une ampleur sans précédent ces 20 dernières années, ces défis restent immenses, en matière de génomique et métagénomique (non-destructrice), d'imagerie multi-échelles en temps et dimensions (non-destructrice également), de modélisation (dont la formalisation des données et l'intégration de données fonctionnelles), d'exploration d'écosystèmes difficilement accessibles, de reconstitutions et approches expérimentales de questions liées à l'évolution ou l'environnement...

À noter que les données de masse, séquençage des génomes et épigénomes, et données « -omiques » et d'imagerie variées, si elles génèrent des modèles et des simulations intéressantes pour formuler de nouvelles hypothèses, ne pourront constituer la seule dimension permettant de comprendre les systèmes vivants. Les hypothèses doivent être éprouvées et la biologie reste une science expérimentale.

De manière remarquable, les liens entre la biologie et les technologies pour la santé structurent un espace nouveau constitué de vastes verrous, qui irrigue les sciences de l'ingénierie ainsi que les sciences de l'information. Les défis en imagerie tant fonctionnelle qu'anatomique, que les nouvelles multimodalités commencent à aborder, ouvrent un champ immense. De même, la réparation ou le remplacement de tissus ou d'organes génèrent des questions fondamentales sur notre capacité à créer des éléments artificiels vivants, par exemple par impression 3D, et la robotisation d'opérations chirurgicales toujours moins invasives en fait autant sur les instruments eux-mêmes, mais aussi sur les interactions homme-machine, les simulations mécaniques en temps réel de la déformation des tissus, etc.

• **Prendre en compte leur champ d'applications, mais ne pas en faire l'unique visée.** Les progrès et les changements profonds des sciences du vivant révèlent les transformations qu'elles sont susceptibles de provoquer dans l'évolution de nos sociétés et dans celle de la planète. Bien que son cerveau soit doté de fonctions supérieures qui le distinguent des autres animaux, l'homme n'en demeure pas moins un maillon de la chaîne évolutive et n'en est pas son

aboutissement. Son fonctionnement de base s'inscrit dans celui des animaux de sa lignée. Décrypter les mécanismes biologiques du vivant dans son ensemble contribue donc à mieux comprendre le fonctionnement du corps humain et ses dérèglements pathologiques, en gardant en mémoire que c'est une recherche libre à tous les étages du vivant qui a produit beaucoup des outils diagnostiques et thérapeutiques d'aujourd'hui et que c'est à cette condition qu'elle gardera

la capacité d'en produire encore pour demain. Par ailleurs, la santé humaine n'est que l'un des multiples bassins d'applications des sciences du vivant. Utilisés de manière appropriée, leurs résultats devraient animer toujours davantage non seulement la santé, mais aussi l'agronomie et l'environnement, et être à l'origine de ressources nouvelles dans les domaines de l'énergie et de l'industrie.

Sciences en sociétés

En cohérence avec la transformation du rapport entre les scientifiques et les citoyens décrit dans le chapitre 3 du rapport d'autoévaluation, il nous semble indispensable d'abandonner le vocabulaire de la « vulgarisation », de

Outre une réflexion approfondie accompagnée d'actions sur les recherches participatives, le CNRS doit développer, en dépit de sa position de référence, une aptitude à la mise en cause interne de son organisation ou de ses pratiques. Il convient qu'il investisse davantage le champ de la réflexion sur les nouveaux enjeux que pose sa place dans la société, dès lors qu'ils sont proprement scientifiques. À cet égard, le CNRS doit s'interroger sur le rôle du comité d'éthique (COMETS) autonome du CNRS éloigné de la direction stratégique du CNRS et qui ne reflète ni la vivacité des débats internes à l'institution quel qu'en soit le niveau, ni les recherches sur ces sujets.

Nous nous proposons :

- D'animer au sein même du CNRS des débats sur des sujets controversés grâce à des systèmes participatifs internes.
- De proposer des position papers sur un nombre limité de sujets avec un fond partagé et des positions diverses, voire des états minoritaires.
- D'organiser des colloques interdisciplinaires sur les controverses sur des sujets tels l'expérimentation animale, les nanotechnologies, la biologie synthétique et le 'Do it yourself', le genre et la relation genre-sexe, la surveillance et les libertés.
- De traduire dans le journal en ligne l'ensemble des propositions précitées.

La question de la participation des citoyens à la recherche scientifique demeure une question controversée, bien plus que celle de la participation politique au sens large. Car elle met en cause une frontière, voire une hiérarchie entre les dits « citoyens ordinaires » et les experts scientifiques, donc le monopole de la production de la science par les professionnels. Elle est rendue urgente par la volonté d'une partie de la population de participer à des opérations de recherche qui va de pair avec la démocratisation des téléphones intelligents et autres terminaux mobiles, dont la puissance de calcul, les fonctionnalités multiples et standardisées (GPS, appareils photo, etc.) permettent à tout un chacun de disposer à tout moment d'un « mini-laboratoire

la « culture scientifique » qui réduit des relations entre scientifiques et citoyens à des relations descendantes et ne donne pas la mesure de la maturité acquise par les citoyens sur de nombreux sujets.

» pour la collecte de données et l'observation. Ces dispositifs permettent de mettre en place, de manière flexible et à bas coût, des protocoles pour la participation de personnes hors du milieu académique. Ils jettent des ponts, indispensables aujourd'hui entre les citoyens et les milieux de la recherche académique.

Ces modalités sont déjà à l'œuvre dans de nombreux programmes en Amérique du Nord – et dans une moindre mesure en Europe et en France. Elles changent la donne de l'innovation et de la décision par la mobilisation potentielle de larges catégories de la population dans les processus de recueil, de traitement et de circulation de l'information. Elles permettent une implication directe des citoyens ainsi qu'une mise en capacité (empowerment) de chacun-e d'agir en fonction de l'information disponible et à faire prendre en compte son intérêt.

Ces démarches sont également différentes des innovations pédagogiques ou de la médiation scientifique même lorsqu'elles font appel à des approches participatives. On parle en anglais de « crowdsourcing », de « community-based research » ou de « community services », autant d'expressions dont le contenu n'est pas exactement rendu dans les traductions françaises par « sciences collaboratives », « sciences participatives » ou « sciences citoyennes », ou bien encore « services à la communauté environnante ». Ces questions de vocabulaire montrent que ces notions ne sont pas stabilisées. À nous de contribuer à la nécessaire consolidation du domaine en soutenant cet ensemble de nouvelles démarches.

Nous nous proposons :

- De développer dans des UMR des actions de recherches avec le concours de la population et à son contact qui puissent être prises en compte dans l'évaluation des chercheur-e-s.
- De concevoir un soutien spécifique à ces programmes.
- D'avancer vers une légitimation scientifique et méthodologique de la community based research.
- De lancer en partenariat avec les grands sites universitaires des actions de community services.

Anticiper et accompagner les grands défis de l'avenir

Une fois dressé le tableau des défis réels ou supposés auxquels nous aurons à faire face, exercice obligé de l'autoévaluation, la question se pose inmanquablement de savoir s'il faut anticiper ces défis par des

Abordons tout de suite la deuxième question. L'ambition sous-jacente à la présentation du CNRS dans ce document se traduit tout simplement par la volonté de continuer à opérer des recherches sur un vaste front de la connaissance. Cela ne fait pas l'objet d'un débat très actif en France, même si l'idée selon laquelle il faudrait plutôt « faire des choix » refait surface régulièrement. Une récente tentative de définition par les pouvoirs publics d'une Stratégie nationale de la recherche (SNR) n'a pas abouti à des résultats marquants, faute d'avoir pu décider si l'on allait simplement mettre l'accent sur quelques thématiques importantes pour le pays tout en poursuivant des recherches de base dans tous, ou presque tous les domaines, ou si alors on allait de façon drastique abandonner des sujets de recherche et laisser le soin à d'autres que nous de s'en occuper. Le débat n'a pas été hélas de grande qualité, et peut-être ne le pouvait-il pas, tant la question semble assez mal posée (à titre d'exemple, couvrir un large front de recherche ne veut pas dire que l'on ne fait pas de choix, on s'en est expliqué plus haut). Les protagonistes d'un tel débat campent très vite sur des positions de principe figées. La première consiste à dire que l'on finance « beaucoup » (c'est à dire trop) la recherche fondamentale sans en voir suffisamment les retombées en matière d'innovation et la seconde défend bec et ongles la « pure » recherche fondamentale supposée menacée dès lors que l'on se pose la question du transfert et de la valorisation des résultats de cette recherche. Nous avons montré plus haut dans le chapitre 3 à quel point la question de la valorisation de la recherche de base posait, en soi, des questions qui dépassaient de beaucoup ces postures caricaturales.

Un pays qui compte dans le concert international est un pays qui possède un appareil de recherche de grande qualité et une capacité à opérer des recherches dans un vaste champ de la connaissance, non pas dans le but d'être le meilleur partout, mais pour permettre un accès informé au meilleur niveau scientifique permettant de tirer profit des résultats de la recherche, quel que soit l'endroit du monde où ils ont été produits. Les circuits de valorisation de la recherche de base sont aujourd'hui courts et complexes, bien différents du modèle linéaire devenu obsolète. Les pays qui s'étaient

changements ou évolutions dans l'organisation et le fonctionnement de l'établissement, d'une part, et si d'autre part nous aurons les moyens des ambitions que nous nous donnons pour l'avenir.

fait une spécialité de copier et d'améliorer les technologies venues d'ailleurs l'ont bien compris. Ils deviennent tous, l'un après l'autre, des producteurs de science fondamentale. Le véritable accès à la science mondiale est payant. On n'opère plus aujourd'hui de la science de base uniquement pour ses propres besoins, mais aussi et peut-être surtout parce que c'est le ticket d'entrée pour participer à la science mondiale de façon active et accéder en pleine expertise et en temps réel à toute la science qui se produit dans le monde.

Se pose alors, c'est une évidence, la question de l'usage que l'on fait de cette extraordinaire capacité que possède chacun des pôles mondiaux, d'accéder en principe à toute la science du monde. Les pouvoirs publics ont le souci, parfaitement légitime, de voir la recherche qu'ils financent contribuer à répondre aux besoins économiques et sociaux de la nation. Cela signifie que l'on doit se doter des outils nécessaires pour valoriser et transférer, vite et bien, les éléments de la science mondiale auxquels nous accédons, et pour lesquels nous estimons disposer d'avantages compétitifs vis-à-vis d'autres pôles mondiaux. Il ne s'agit donc pas de faire moins de recherche de base au profit d'une recherche plus orientée, mais de maintenir et de consolider la position de notre pays comme un des pôles marquants de la science mondiale, tout en continuant à enrichir l'interface entre la recherche publique et le milieu socio-économique, au bénéfice de l'emploi, de la compétitivité industrielle et de la richesse nationale.

Alors, aurons-nous les moyens de notre ambition ? Cette question a été abordée dans les conclusions du rapport d'autoévaluation. Si l'essentiel a pu être sauvegardé à ce jour, la situation de stagnation budgétaire ne pourra pas durer longtemps sans avoir des effets délétères sur le CNRS. Nous sommes pour l'essentiel financé par les deniers publics, et nous ne sommes pas les seuls dans ce cas dans le monde. La question se pose de savoir si l'État va pouvoir, comme c'est le cas en Allemagne (75 % d'augmentation du budget de R&D de l'état fédéral allemand en dix ans !), retrouver des marges qui permettent des augmentations de budgets raisonnables, ou s'il faudra passer par de nouveaux modèles de financement. On sait que le secteur privé est

globalement défaillant en France en matière de financement de la recherche, mais cela ne veut pas dire qu'une évolution positive ne puisse se traduire par un abondement du financement de la recherche fondamentale. On a parlé plus haut des revenus de licence d'exploitation des brevets, et mentionné que, sauf cas exceptionnel, un organisme de recherche public pouvait rarement compter sur ces revenus pour améliorer durablement son budget. Y aura-t-il dans un avenir proche de nouvelles pistes de financement ? À l'âge de Google et de Wikipedia, on constate aujourd'hui que des fondations privées se préoccupent de financer des laboratoires publics sur des sujets précis, dans le domaine de la santé par exemple. Cela fait l'objet de débats qui dépassent le cadre de ce rapport d'autoévaluation.

Il est donc nécessaire de conclure, sur ce sujet, que sans amélioration de l'équation budgétaire du CNRS dans les prochaines années, des mesures drastiques devront être prises et auront des conséquences en matière de volume de recherches opérées par l'organisme, avec un affaiblissement prévisible de la position de la France dans la compétitivité scientifique internationale. On constate par exemple dès aujourd'hui qu'il nous est de plus en plus difficile de tenir nos engagements dans les organisations internationales porteuses de Grands Équipements de recherche. Dans un avenir proche nous devons peut-être renoncer à entrer dans des structures internationales de préfiguration de nouveaux grands instruments à l'horizon de dix-quinze ans, alors même que nous disposons des compétences humaines et techniques pour le faire, et que les pays partenaires nous attendent. La question d'un éventuel décrochage de la recherche française dans les quelques prochaines années, vis-à-vis de ses concurrents, est posée.

En matière d'organisation du CNRS, il convient sans doute de réfléchir à des adaptations, mais débattre des structures est une passion française ! Il convient toujours de rappeler que seuls les projets comptent vraiment, et que s'ils sont bons, portés par des personnes compétentes, et que les financements suivent, l'organisation passe souvent au second plan. On s'est prononcé plus haut sur l'existence des 10 Instituts, et l'on n'envisage pas pour l'instant d'en modifier le nombre ni les contours, l'enjeu étant essentiellement de recruter des directeurs scientifiques de grande qualité ayant la volonté de travailler ensemble sur les questions transverses qui nous occupent de plus en plus. Il reste qu'à la lumière du présent rapport d'autoévaluation, nous envisageons les adaptations suivantes.

Nous nous proposons :

- D'étendre à tous les domaines scientifiques, l'appel à projets permettant à de jeunes chercheurs de mettre en place et d'animer une équipe. Les équipes créées viennent renforcer le dispositif de recherche de leur structure d'accueil en

développant de manière autonome leur propre thématique. Un tel appel existe déjà dans le domaine des sciences du vivant, il est porté conjointement par le CNRS et l'INSERM (appel «ATIP-AVENIR»). On constate que les réponses à l'appel à projets actuel concernent de plus en plus des thématiques interdisciplinaires, d'où notre volonté d'ouvrir largement le champ thématique de l'appel.

- Renforcer la Mission pour l'Interdisciplinarité (MI), en multipliant les financements d'amorçage, avec prise de risque. L'agence de financement de la recherche (ANR) ne sait pas financer les projets interdisciplinaires et/ou risqués. Au-delà de la mécanique habituelle des appels à projets compétitifs, il est nécessaire d'avoir une vision «top-down» des équipes et des laboratoires, et de compléter le financement des projets par des opérations collaboratives et la construction de nouveaux réseaux de recherche.

- De réorganiser les processus d'incitation et d'aide à la constitution des projets de financement par l'European Research Council (ERC). Les résultats obtenus par les chercheurs CNRS ne sont pas mauvais, mais il est possible de faire mieux. Au passage, le CNRS est très réticent au sujet de la constitution d'un EIC (European Innovation Council) dont l'objectif n'est pas clair. Au-delà de l'ERC qui est un outil de très grande valeur, le CNRS va mettre l'accent sur les collaborations franco-allemandes, faute de pouvoir agir efficacement au niveau de l'Espace européen de la recherche. Ce jugement est largement partagé par nos partenaires des pays voisins scientifiquement développés.

On assiste actuellement à un bouleversement de l'organisation de l'Enseignement supérieur français, avec la création par regroupement d'établissements existants, de nouvelles Universités multidisciplinaires intensives en recherche. On a décrit plus haut dans le chapitre 2 de ce document, la façon dont le CNRS intervenait comme acteur dans ces opérations de différenciation des établissements d'enseignement supérieur français. On peut imaginer, à l'horizon de quelques années, voir émerger une poignée de ces Universités de recherche (autour d'une dizaine). Le CNRS en sera le premier partenaire en matière de recherche, et forme des vœux pour la constitution d'une « ligue » de ces universités à laquelle le CNRS pourrait adhérer en tant que partenaire, afin de pouvoir élaborer ensemble les éléments principaux d'une stratégie de recherche à l'échelle nationale. Ajoutons que l'on aurait alors un cadre plus propice à l'incitation et l'organisation efficace des mobilités entre recherche et enseignement supérieur, contribuant ainsi à la fluidification du système.

Du chemin a été parcouru dans la structuration territoriale de l'enseignement supérieur et de la recherche (ESR), mais on ne peut pas rester au milieu du gué. Car nous ne sommes pas au bout des transformations du paysage de l'ESR. Des questions redoutables sont encore devant nous, en ne mentionnant que

celle des besoins croissants de financement ou encore la révolution attendue et en cours des modes de transmission des savoirs.

En complément de ces nouvelles Universités dont on peut espérer qu'elles soient progressivement plus visibles à l'international, notamment au travers des différents classements (critiqués, mais regardés partout), il sera nécessaire d'organiser des réseaux de recherche incluant les équipes universitaires de qualité qui se situent en dehors des sites principaux. La différenciation des sites territoriaux ne doit pas être conçue comme une discrimination, comme on l'entend parfois. Il est important que notre pays valorise le tissu assez dense d'Universités de proximité qui doivent pouvoir former des étudiants au niveau de la Licence (undergraduate) dans les meilleures conditions possible. Cela implique de pouvoir maintenir sur ces sites de très bonnes équipes de recherche lorsqu'elles existent ou d'en créer. Le CNRS, fort de sa longue expérience dans l'animation des Groupements de Recherche (GDR) thématiques, est prêt à se mobiliser pour créer avec ses partenaires ces réseaux de recherche multi-territoriaux entre Universités de recherche et Universités de proximité, et à les animer.

En termes d'organisation de la direction du CNRS une évolution majeure a déjà été réalisée. Chaque Directeur d'Institut a également pour fonction de représenter l'ensemble du CNRS sur un site donné. Cette nouvelle fonction est celle de Directeur scientifique référent (DSR). Il est secondé sur place par le Délégué régional qui représente l'administration déconcentrée du CNRS sur les territoires. Le DSR est l'interlocuteur de la gouvernance des établissements regroupés sur le site dont il s'occupe, en matière de politique scientifique. Les laboratoires (UMR) restent évidemment sous la responsabilité de leur Institut de rattachement. Les DSR ont joué un rôle déterminant dans les candidatures à l'appel à projets IDEX des différents sites depuis cinq ans. Une fois le paysage de l'enseignement supérieur stabilisé, le CNRS renforcera son organisation pour assurer le meilleur suivi des sites devenus Universités de recherche, et désignera par ailleurs des responsables scientifiques pour l'animation des réseaux de recherche décrits plus haut.

