

Rapport de Prospective
Conseil Scientifique de l'Institut de Chimie du CNRS

Comité National de la Recherche Scientifique

Centre National de la Recherche Scientifique

Septembre 2018

**Membres du Conseil Scientifique de l'Institut de Chimie du CNRS,
mandature 2015-2018 :**

- Mireille BLANCHARD DESCE
- Didier BOURISSOU
- Sara CAVALIERE
- Bruno CHAUDRET, membre du CS du CNRS
- Evelina COLACINO
- Clémence CORMINBOEUF
- François-Xavier COUDERT
- Jacques DESBRIERES
- Stéphanie DESCROIX
- Jean-Pierre DJUKIC
- Gwilherm EVANO
- Etienne FLEURY
- Marc FOURMIGUE
- Claire HEROLD-MARECHE
- Lorena KLEIN
- Corinne LAGROST
- Solange LAVIELLE
- Benoit LIMOGES
- William MOTHERWELL
- Stéphanie NORSIKIAN-ROLAND
- Djar OQUAB
- Valérie PRALONG
- Jean-Paul RENAUD
- Jean Louis SCHMITT
- Lorenzo STIEVANO
- Alexandre ZIMMER, membre du CS du CNRS

Avant propos

Ce rapport de prospective est produit près de 8 années après le dernier rapport du Conseil Scientifique du Département de Chimie du CNRS qui effleurait les mutations commençant tout juste à remodeler la Recherche en France. Au-delà des enjeux sociétaux de la Recherche Scientifique, activité humaine ouvrant de futures perspectives de développement socio-économique et culturel, de nouvelles interrogations émergent : comment susciter la rupture conceptuelle ? Comment déceler les recherches émergentes et mieux les accompagner ? En d'autres termes, comment employer le potentiel intellectuel et structurel de l'édifice de Recherche pour accroître son potentiel d'innovation, sa faculté à réaliser de nouvelles percées dans la noble entreprise qu'est la production de nouveaux savoirs ?

Depuis 2010, année de livraison du dernier rapport de prospective du Conseil Scientifique du Département de Chimie du CNRS (qui deviendra le CSI de l'INC quelques années plus tard) le paysage national de la Recherche Scientifique a connu de vastes et profonds changements tant dans l'organisation des organismes publics de la recherche scientifique et plus généralement des universités que dans les modes de financement de la Recherche et donc des laboratoires publics. Avec la « Loi sur la Recherche » promulguée en 2005, ces derniers s'appuient désormais principalement sur des dotations soumises au principe compétitif de la concentration des moyens par appels à projets, projets qui, une fois financés, se réalisent sur des périodes relativement courtes fixant l'horizon à une dimension temporelle nouvelle.

A cette métamorphose du paysage national de la Recherche dite académique qui s'opère depuis maintenant plus de 10 années, s'ajoute le défi de la mutation de la nature des activités industrielles qui pose nécessairement la question du rapport de la recherche publique au développement industriel national, à la Recherche et Développement dans un contexte de désindustrialisation prononcé et de délocalisation de la production de la Chimie dite lourde.

Un rapport de l'Observatoire des Technologies de l'HCERES publié en 2018 pointe le recul de la France du 5^e au 7^e rang international pour la production scientifique sur la période 2000-2015: faut-il y voir seulement un résultat de la montée en puissance des pays dits "émergents" qui investissent massivement dans la Recherche et le développement de l'Enseignement Supérieur ? Ou est-ce aussi un signal inquiétant marquant l'échec des réformes de l'enseignement supérieur et de la Recherche qui se sont succédées depuis la loi sur la Recherche de 2005 ?

La création du Commissariat Général à l'Investissement (CGI, placé sous l'autorité du Premier Ministre) en 2010 (devenu Secrétariat Général à l'Investissement - ou SGI - en 2017, sous l'autorité du Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, MESRI) accompagne cette nouvelle phase de recomposition du paysage de la Recherche Scientifique qui se poursuit de nos jours. Sous la houlette du CGI, six axes stratégiques dont l'Enseignement Supérieur et la Recherche (ESR) ont été identifiés comme domaines prioritaires de l'intervention de l'Etat qui a manifesté son action avec l'émergence des Programmes Investissements d'Avenir (PIA). Ces PIA furent très rapidement dotés de plus de 30 milliards d'euros dans sa première programmation budgétaire. Les six axes stratégiques du CGI sont :

- L'enseignement supérieur, la recherche et la formation,
- La valorisation de la recherche et le transfert au monde économique,
- Les filières industrielles : développement des PME et ETI innovantes, consolidation des filières stratégiques de demain,
- Le développement durable,
- L'économie numérique,
- La santé et les biotechnologies.

En 2013, la définition d'une Stratégie Nationale pour la Recherche Scientifique (SNR) a été inscrite dans la loi. Cette SNR, dont les orientations ont été publiées en 2015, matérialise au travers d'enjeux de société la volonté de l'Etat de consolider l'effort de Recherche pour le développement industriel, économique et social du pays. Loin de constituer un carcan dans la SNR, ces enjeux sociétaux trouvent leur origine dans des préoccupations qui parcourent les sociétés industrielles depuis la fin du 20^{ème} siècle et qui constituent le

squelette programmatique de l'Union Européenne dans son soutien à l'effort de Recherche dans le cadre du programme H2020 : gestion sobre et durable des ressources, santé et bien-être, énergie propre sûre et efficace, le renouveau industriel, la transformation de la biomasse, l'environnement, la collecte, le stockage et le traitement des grandes masses de données. Il est tout à fait naturel que ces enjeux soient parmi les principaux leviers du pilotage national de l'effort de recherche en France au travers des alliances, des organismes de Recherche et des universités.

Par la SNR sont donc affirmés à la fois une priorité de l'Etat et un regard sur la recherche scientifique au travers du prisme de défis de société lisibles et identifiables par les citoyens et devant constituer les bases du contrat social liant les scientifiques à la société. Toutefois, la recherche fondamentale, prioritaire dans la SNR, ne fait pas l'objet de recommandations détaillées. Par les réponses qu'elle peut apporter et par sa capacité à induire des ruptures conceptuelles, des innovations méthodologiques et l'émergence de nouvelles sciences ou de nouveaux champs de savoirs, la recherche fondamentale est pourtant amplement reconnue comme essentielle à cet effort.

Ce nouveau paysage de la recherche induit une complexité nouvelle qui bouleverse le fonctionnement et l'organisation de très nombreuses unités de recherche. Ainsi, le court terme des financements sur projet pose la question de la temporalité consentie à la recherche fondamentale ou plus précisément à la pérennisation de programmes de recherche de longue haleine dont les résultats imprévisibles par nature sont pourtant nécessaires au développement de toute recherche appliquée innovante. L'histoire de la chimie est riche d'exemples de découvertes qui ont nécessité de nombreuses années de maturation.

Ce paysage voit également l'émergence d'une logique de site, consolidée par l'apparition de programmes incitatifs qui stimulent la structuration de la Recherche dans les unités localisées sur des sites géographiques spécifiques dont la déclinaison en terme de gouvernance et de politiques est toute aussi variée que déroutante tant la collégialité des instances délibératives y est variable et les relations avec les organismes inégales : PRES, COMUEs, Contrats de site, etc.

Participant à la complexification du paysage de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (ESR) et à un fonctionnement principalement basé sur les appels à projets compétitifs (AAP), les Programmes investissements d'avenir (PIA) qui furent directement pilotés au niveau du premier ministre, et dont l'efficacité et la sincérité budgétaire ont été contestées notamment par la Cour des comptes, ont donc été utilisés comme instruments pour susciter des restructurations au sein des établissements ainsi que leur mise en compétition dans une logique dite de site, logique toujours en phase d'émergence avancée. Les actions des PIA 1 et 2 (les IDEX : initiatives d'excellence et les ISITE : initiatives science - innovation - territoires - économie) ont abouti à une déconstruction de l'ESR national laissant apparaître une dizaine de pôles qualifiés d'"excellents" qui drainent plus de la moitié des Labex (laboratoires d'excellence) selon la logique d'emboîtement des projets. Le PIA 3 va lui permettre l'éclosion d'Ecoles Universitaires de Recherche (EUR) qui pourront rassembler des formations de master et de doctorat ainsi qu'un ou plusieurs laboratoires de recherche de haut niveau mais avec un risque croissant de rupture du principe d'Egalité au sein même des Universités et des Facultés, toutes les filières ne bénéficiant pas nécessairement de ces programmes sélectifs de soutiens financiers orientés. Ainsi la quasi-absence de structures en "ex" et assimilées dans certaines zones géographiques confirme que l'aménagement du territoire est le grand oublié dans la construction du nouveau paysage de l'ESR. L'apparition croissante d'une distinction entre "grandes universités de recherche" et "universités de proximité" ou encore de "masse" semble bien plus être la traduction d'une quête de visibilité et de compétitivité internationale, qui se traduit par des références fréquentes, symptomatiques, aux classements internationaux considérés, malgré leurs biais reconnus, comme des outils d'évaluation des performances des établissements d'enseignement supérieur et de recherche.

Ce document réalisé au cours des années 2017 et 2018 se propose de dresser un état des lieux, tant sur le plan institutionnel que sur celui de la recherche en sciences chimiques. De cet état des lieux et des travaux du Conseil Scientifique de l'Institut de Chimie est tirée une analyse qui a pour ambition d'éclairer sur le dynamisme qui anime la communauté scientifique dans un contexte incertain qui, de manière insistante, ébranle les missions premières des chercheurs et enseignant-chercheurs et de formuler quelques recommandations visant à préserver la raison d'être du soutien organique que l'Institut de Chimie du CNRS apporte aux unités de recherche dans toute leur diversité.

Sommaire

1- Les enjeux	6
1.1 Chimie: Énergie, Environnement, Développement Durable	6
1.2 Chimie et Vivant	8
1.3 Chimie, Renouveau industriel	8
2- Les grands défis de la chimie : une réponse aux enjeux ?	9
2.1 Synthèse et élaboration	9
2.2. Les matériaux et leur assemblage	11
2.3 Chimie du vivant	13
2.4 Méthodes d'analyse et suivi des systèmes complexes	14
2.5 Théorie, modélisation, simulation	15
2.6. L'évolution des disciplines	15
3- Structuration et environnement de la recherche en Chimie	16
3.1 Paysage de la Recherche	16
3.2 Financement de la Recherche	17
3.3 Évolution des Métiers de la Recherche Scientifique	17
3.4 Evolution des relations avec les universités et l'enseignement supérieur	19
3.5 Relations avec l'industrie	19
4 Conclusion	20
5. Recommandations	21
Annexes	22

1- Les enjeux

La Chimie, en tant que discipline, n'apparaît pas explicitement dans la SNR de 2015 bien que sa recherche fondamentale irrigue par ses questionnements et ses avancées toute recherche plus orientée avec des apports interdisciplinaires toujours plus prononcés. La Chimie en tant que discipline scientifique trouve dans les faits sa place dans la plupart des priorités de la SNR, principalement parce que depuis plusieurs décennies celles-ci constituent les sujets de recherche d'un grand nombre de chimistes. **La chimie est le pivot central de trois des 10 défis sociétaux identifiés par la SNR**, notamment le défi 2 "Une énergie propre, sûre et efficace", le défi 3 "Stimuler le renouveau industriel" et le défi 4 "Santé et bien-être", et son importance se décline comme suit.

1.1 Chimie: Énergie, Environnement, Développement Durable

Concevoir un nouvel équilibre entre les besoins croissants de la société, la disponibilité des matières premières (qui sont des ressources finies) et l'empreinte de l'activité humaine sur l'environnement (gestion des déchets, durabilité des procédés, limitations des risques technologiques) est un enjeu fort dans lequel la chimie joue un rôle central.

La mise au point de procédés moins polluants et/ou moins dangereux a été considérée assez tôt dans le domaine industriel, citons par exemple le procédé Solvay (1870) qui a remplacé le procédé Leblanc (1788) pour la production de carbonate de sodium. En revanche, il est notable de constater que la recherche académique ne s'intéresse à ces questions que depuis les années 90, avec l'apparition de nouveaux concepts tels que l'économie d'atomes, le facteur E ou encore les principes de la chimie verte. Aujourd'hui, un virage encore plus serré se doit d'être entrepris pour réconcilier l'obligation de sobriété avec l'inévitable intensification des procédés, si on prend en compte l'augmentation de la demande. De nouveaux concepts "durables" ont émergé tels que l'écologie industrielle et l'analyse du cycle de vie, qui concerne l'ensemble du cycle de vie d'une ressource jusqu'à l'utilisation finale du produit intégrant cette ressource en passant par le procédé de fabrication, la valorisation des déchets et le recyclage des matériaux en sens large (et pas seulement visant les matériaux stratégiques, notamment ceux générant des conflits géopolitiques). On a ainsi vu apparaître de nouveaux réactifs plus sûrs et moins polluants

(remplacement des métaux), de nouveaux solvants (liquides ioniques, *deep eutectic solvents*, CO₂ supercritique, solvants biosourcés) et de nouvelles matières premières issues de la biomasse (*e.g.*, les huiles végétales, l'amidon, les sucres, la cellulose) et actuellement valorisées pour la production de cosmétiques, détergents, peintures, additifs, etc. Dans le domaine de l'énergie, la biomasse trouve déjà application dans la production de biochaleur, bioélectricité et biocarburants de seconde et troisième générations (*i.e.*, issus respectivement de la biomasse ligno-cellulosique et d'organismes photosynthétiques), qui à terme devraient remplacer les carburants de première génération utilisant la fraction noble de plantes à vocation alimentaire. Dans la même direction, l'utilisation de systèmes bio(chimi)luminescents constitue une alternative intéressante pour l'éclairage.

A chaque étape, la chimie a un rôle clé à jouer. L'utilisation de systèmes ou matériaux issus du monde du vivant nécessitera une approche raisonnée impactant les stratégies développées et les pratiques. Ce nécessaire virage est moteur d'innovations à la fois conceptuelles et technologiques qui couvriront quasiment tous les domaines de la chimie, synthèse, procédés, matériaux, dépollution, analyses, énergie. Cependant, des verrous technologiques subsistent, et pour être levés, ils nécessiteront des recherches interdisciplinaires alliant ingénierie chimique et compétences aux interfaces entre chimie, biologie et physique. L'intensification de procédés passe à travers l'utilisation de technologies innovantes et méthodes d'activation comme les micro-ondes, les ultrasons, le broyage, la pression, la lumière, ou par le développement de nouvelles approches de type génie chimique (*e.g.* mini-, micro-réacteurs, micro-fluidique, milli-fluidique, parallélisation, membranes, etc.) En parallèle, de nouvelles technologies se développent déjà, impliquant de la catalyse chimique et/ou biochimique, mettant en jeu des systèmes bio-mimétiques, des systèmes enzymatiques ou des systèmes vivants (usine bactérienne, biotechnologies blanches, biopiles enzymatiques ou microbiennes). Dans ce contexte, l'exemple des microalgues est particulièrement illustratif des besoins de transversalité de la connaissance scientifique comme moteur de l'innovation. Les microalgues constituent une des ressources de la biomasse parmi les plus prometteuses pour la production de molécules pour l'agroalimentaire, la santé ou encore pour la production de biocarburants. Plus spécifiquement, elles peuvent permettre la production de grandes

quantités de lipides et de coproduits à haute valeur ajoutée. Elles présentent également l'intérêt de pouvoir être produites de façon continue toute l'année, sans empiéter sur les surfaces utiles à l'agriculture, et à faible coût. Néanmoins, l'utilisation des microalgues se limitent à la production de molécules à très haute valeur ajoutée et en petite quantité car leur production à l'échelle industrielle se heurte à différents freins technologiques chimiques et biologiques, freins qui sont inhérents à leur petite taille (quelques μm), leur culture dans un environnement composé à 99% d'eau où elles ne sont présentes qu'en faible concentration. Cela engendre des difficultés majeures et des coûts rédhibitoires dans leur récolte et l'extraction des molécules d'intérêt. Des verrous biochimiques sont associés à la faible connaissance du métabolisme des espèces, à la sélection d'espèces d'algues possédant des spécificités (*i.e.*, pour la production de biocarburants) et à l'absence d'outils d'ingénierie des génomes efficaces et robustes pour améliorer leur performance.

Parmi les verrous scientifiques auxquels la chimie doit faire face on retrouve ceux qui permettront d'atteindre un nouvel état d'équilibre du mix énergétique entre énergies fossiles, renouvelables et nucléaire, pour convertir de façon efficace et rentable l'énergie solaire dans ses composantes thermoélectriques ou photovoltaïques, sur la base de systèmes hybrides, tout en baissant sensiblement le coût des procédés. Le défi majeur sera le passage à une source d'énergie propre avec un bilan CO_2 minime voire nul via un stockage adapté de l'électricité sous forme chimique ou électrochimique (civilisation de l'hydrogène, batteries, super-condensateurs). En effet, l'augmentation à moyen terme des émissions anthropiques de CO_2 impose de progresser aux côtés des sciences de l'univers dans la chimie de l'atmosphère et des océans afin de trouver des solutions alternatives sur le bilan CO_2 . La poursuite des efforts sur sa séquestration (captage moins gourmand en énergie et en coût, transport du CO_2 capturé, sûreté des structures géologiques de stockage) doit se compléter par son utilisation/valorisation, par exemple dans la synthèse de bio-polymères et carburants, conventionnels ou non. Toutes ces cibles supposent des avancées et des sauts de rupture innovante dans le mode de production industriel actuel. Dans le domaine de l'énergie, en complément à l'énergie nucléaire de fission et à la mise en œuvre de nouvelles générations de centrales, qui représente une source massive d'énergie peu émettrice de CO_2 , la chimie a sa place dans l'exploration de pans entiers de chimie séparative, des matériaux et des procédés, autour de la maîtrise totale du cycle du combustible

et de la gestion des déchets.

Dans ce contexte l'activation ou la conversion de petites molécules ressources « abondantes » telles que O_2 , H^+ , H_2 , CO_2 , CO , H_2O , N_2 constitue un défi pour la recherche. Elles représentent un réel potentiel avec la possibilité de convertir l'énergie chimique qui y est stockée en énergie électrique avec une efficacité et une sélectivité maximales, soutenant ainsi une production d'énergie propre. Les matériaux d'électrodes (nano-structurés, hybrides, biomimétiques, intégrant composés moléculaires, inorganiques ou alliages métalliques, etc.) sont des éléments clés des dispositifs de production/stockage car leur efficacité dépend directement des phénomènes chimiques ayant lieu à leur interface. Le développement de nouveaux matériaux mais aussi de mises en forme innovantes allié à une nécessaire compréhension fondamentale des processus aux interfaces, couplant théorie et expériences, constituera une part importante de cette dynamique de recherche.

Incontournable est le rôle de la chimie analytique, pour identifier, tracer et quantifier les composés chimiques ou biologiques, ou pour étudier leur toxicité. Les analyses sont motivées par différentes raisons, sécuritaires en premier lieu (sécurité alimentaire, de santé publique, sécurité des personnes, fraudes, patrimoine), pour le diagnostic médical, mais aussi en lien avec la gestion durable des milieux naturels ou anthropiques. Les nouvelles contraintes et réglementations ont conduit à des nouvelles demandes, nécessitant de surmonter des verrous technologiques : rapidité des mesures (haut débit), analyse sur site, seuil de détection de plus en plus bas, miniaturisation, dépollution. Bien évidemment, les critères d'analyse seront différents selon les besoins mais on peut tout de même faire ressortir quelques points généraux qui seront des défis à relever dans le développement des techniques d'analyse de demain. Principalement, il s'agira d'opérer des analyses fiables, reproductibles, rapides et complètes d'échantillons complexes, contenant un grand nombre de constituants.

S'inspirant des efforts déjà réalisés par l'industrie chimique qui a limité son empreinte carbone avec des réductions de moitié à la fois de ses émissions de gaz à effet de serre depuis 1990, alors que la production doublait, et de celle de sa consommation énergétique sur les vingt années écoulées, la chimie se doit à présent de franchir un cap dans l'acceptabilité sociale. Cette demande sociale, la diffusion des informations, l'augmentation globale du niveau culturel et l'attitude plus ouverte sur ces questions des nouvelles générations de chimistes

rendent possible un vrai dialogue avec la société civile. La nécessité de développer des alternatives durables aux énergies fossiles (part croissante d'énergies renouvelables dans le mix énergétique, stockage « sûr » du CO₂, etc.) impose une réflexion alliant le monde de la recherche en sciences dures, sciences humaines et sociales et le monde industriel pour aboutir à une chimie acceptée par tout un chacun.

1.2 Chimie et Vivant

Il nous faut partir d'un triste constat. Dans le document de la SNR de 2015, le mot chimie n'apparaît à aucun moment dans le Défi 4 intitulé « Santé et Bien-être », malgré le fait que de nombreux revenus de brevets perçus par le CNRS proviennent de la recherche en chimie. Faut-il deviner que la chimie se cache dans « pharmacie, les biothérapies, les technologies pour la santé », ou encore dans la vitalité des « industries pharmaceutiques » ? Cette absence est-elle symptomatique de la considération de l'apport de la chimie dans les avancées en termes de santé, alors même que l'apport des physiciens et des chimistes est inestimable, si on considère l'exemple de la protéomique et son explosion qui a révolutionné le diagnostic et les traitements thérapeutiques en milieu hospitalier.

Pour contrebalancer cette absence nous nous devons d'affirmer que la chimie est non seulement présente mais aussi force de proposition dans bien des domaines de la Santé, pas seulement en tant que pourvoyeuse de molécules médicaments ou dans le diagnostic, domaines qui ne sont pas le fait de la « pharmacie ».

Nous affirmons que la chimie est présente dans l'étude des fonctions biologiques élémentaires et des différents niveaux d'intégration de ces fonctions au sein des systèmes biologiques (approche multidisciplinaire comprenant biologie, chimie, physique, et mathématique). Elle est aussi force de proposition non seulement dans l'industrie pharmaceutique, les biotechnologies, mais aussi dans les approches de médecine personnalisée. Elle peut le faire en synthétisant des molécules, des sondes, en développant de nouvelles approches. Elle ne peut le faire que parce que les chimistes ont aussi investi les problèmes biologiques, soit en étroite collaboration avec des cliniciens, des biologistes, soit en s'emparant des processus biologiques pour les réguler (biologie chimique *vide infra*).

Le chimiste a développé et doit poursuivre son investissement, de nouveaux outils pour comprendre les processus biologiques fondamentaux et alors

proposer de nouvelles stratégies thérapeutiques. A côté des « médicaments petites molécules », on a assisté à une explosion des biothérapies (protéines thérapeutiques, *e.g.*, anticorps) et on a vu même apparaître des composés hybrides (par exemple les ADCs : antibody-drug conjugates). Dans tous les cas, la mise au point de ces molécules résulte d'une approche multidisciplinaire mais avec une implication incontournable de la Chimie. Dans la foulée du séquençage du génome, le développement de la protéomique a ouvert la voie au recensement et à l'étude de nouvelles cibles thérapeutiques potentielles en termes de caractérisation et de recherche de molécules les ciblant, non seulement des protéines individuelles mais aussi des interfaces protéine / protéine ou protéine / acide nucléique et des cascades de régulation (en synergie avec la biologie intégrative et la biologie des systèmes). Plus récemment, on a également assisté à l'émergence de la glycomique, de la lipidomique et de la métabolomique. La caractérisation structurale et dynamique de tous ces composants cellulaires et de leurs interactions complexes permet de découvrir les mécanismes de leur fonction biologique et ouvre la voie à de nouvelles stratégies thérapeutiques. En particulier, le développement de la médecine personnalisée (*precision medicine*) repose sur une approche moléculaire qui relève de la chimie. Une autre contribution de la chimie à la santé se situe dans le domaine du diagnostic avec le développement de molécules et systèmes plus complexes (notamment avec l'émergence des nano-plateformes visant l'imagerie multimodale) utilisées en imagerie (IRM, PET, microscopie optique en particulier à super-résolution). La chimie est également mise à contribution pour la vectorisation des médicaments, en particulier dans le traitement des cancers et la thérapie génique en plein essor. Enfin on soulignera l'émergence de la nanomédecine et du design de systèmes moléculaires et/ou hybrides pour le theranostic.

Au-delà de l'axe Santé, l'étude de la Chimie du vivant impacte de nombreux autres domaines comme l'agriculture et l'alimentation (chimie des plantes), l'énergie (valorisation de la biomasse), l'environnement (dépollution) et la chimie verte (biocatalyse, procédés biomimétiques).

1.3 Chimie, Renouveau industriel

La Chimie entre de plein droit dans 3 des 4 axes principaux du défi sociétal autour du renouveau industriel : les matériaux, les nanomatériaux et la chimie durable, ainsi que les procédés et les technologies associés. Dans ces domaines, la Chimie est appelée à implanter des acquis de connaissances

et de technologies qui favorisent l'émergence d'innovations de rupture sans que nécessairement les recherches visent une innovation particulière. Cela peut donc produire du soutien direct non seulement à l'industrie chimique, mais aussi aux autres secteurs industriels.

Dans le domaine des matériaux et de leur mise en œuvre, on trouve par exemple les matériaux polymères et composites, les matériaux bio-inspirés et/ou biocompatibles, la métallurgie chimique, etc. pour lesquels la chimie apporte de nouvelles compositions pour des nouvelles propriétés (propriétés spécifiques à l'utilisation, ainsi que durabilité et recyclabilité) et à des nouveaux procédés de synthèse économes en matière et en énergie. De plus, des modifications spécifiques visant une optimisation de la mise en œuvre (traitements de surface, fonctionnalisations, fabrication additive, etc.) se basent principalement sur des procédés chimiques.

La Chimie joue aussi un rôle principal dans la synthèse, la formulation et la mise en forme de nanomatériaux. Cela inclut la synthèse de nano-objets et de nano-composites, souvent avec des structures hiérarchiques (*e.g.*, structures cœur-coquille), leur fonctionnalisation et les possibles stratégies de leur production en volume. La chimie peut aussi fournir les outils nécessaires à l'évaluation et à la modulation de leur réactivité (par exemple, dans la catalyse, la vectorisation de médicaments ou le développement de nano-capteurs).

Pour ce qui concerne la chimie durable, la chimie est au cœur des sciences et technologies de synthèse, production et transformation de molécules et matériaux avec une attention particulière au respect de l'homme et de l'environnement. Cela inclut le développement de nouvelles molécules et matériaux ainsi que l'optimisation des procédés liés aux molécules et matériaux actuels. Dans ce domaine, la catalyse (homogène et hétérogène) joue un rôle majeur à côté des biotechnologies, la valorisation de bio-ressources, les assemblages supramoléculaires, etc.

Les attentes de la société vis-à-vis de la recherche scientifique, exprimées par ces enjeux sociétaux, ne recouvrent pas les champs disciplinaires classiques de la recherche en Chimie. La recherche scientifique en Chimie en tant que telle peut en effet déboucher sur des inventions ou des découvertes qui peuvent générer du renouveau industriel sans forcément partir du cadre spécifique d'un défi sociétal. Ces apports sont sûrement mieux représentés au jour d'aujourd'hui au sein des sections disciplinaires, et encouragés au CNRS par des activités visant à

promouvoir la recherche fondamentale, grâce au travail des sections disciplinaires, aussi bien que la recherche aux interfaces, grâce à la mission pour l'interdisciplinarité. Dans cet esprit il faut encourager l'interaction des jeunes en formation et des chercheurs avec des collègues de disciplines différentes afin de dépasser les frontières et d'élargir les horizons.

2- Les grands défis de la chimie : une réponse aux enjeux ?

La spécificité de la Chimie en tant que science est son emprise sur et sa maîtrise de la matière : elle crée son objet. La synthèse (molécules, assemblages moléculaires, polymères, matériaux, etc.) est l'activité centrale de la chimie, qui reste tributaire de sa capacité à analyser les systèmes chimiques et leurs propriétés fonctionnelles. La modélisation des systèmes chimiques « artificiels » comme l'appréhension théorique de la complexité des systèmes chimiques (naturels ou artificiels) doit pouvoir poser les jalons de futures avancées conceptuelles. Les disciplines de la chimie sont donc en constante évolution, voire révolution. Certaines d'entre-elles ont été intégrées dans des axes de recherches plus vastes, d'autres ayant atteint un niveau de développement ultime doivent encore trouver leur place dans les nouveaux champs de recherche émergents. L'un des enjeux majeurs reste la préservation des savoir-faire, leur pérennisation et leur intégration à des programmes de recherche récemment priorisés.

2.1 Synthèse et élaboration

La préparation de nouvelles molécules, objets, architectures moléculaires, matériaux ou polymères aux propriétés bien définies concerne toutes les sections de l'INC. Ces recherches autour du design moléculaire mettent un accent fort sur le développement de nouveaux procédés de synthèse permettant un accès aisé et innovant à ces objets moléculaires. Les domaines d'applications sont particulièrement vastes et couvrent notamment la chimie pour le vivant, la chimie supramoléculaire et les matériaux moléculaires et hybrides pour l'optique, l'électronique et la biologie. Ces développements impliquent une contribution forte des Sciences Analytiques et Théoriques. Ces nouveaux outils synthétiques reposent sur la catalyse (organique, organométallique, biocatalyse, multicatalyse) et/ou sur le développement de nouvelles réactions et nouveaux réactifs sélectifs associés à des technologies de synthèse innovantes (micro-ondes, ultrasons, radiofréquences, photo-

chimie, mécanochimie, hautes pressions, micro- et milli-fluidique, etc.). De plus, la mise au point de réactions multi-composants ou en cascade permet l'accès à des architectures moléculaires complexes en un nombre limité d'étapes et en minimisant la quantité de catalyseur ou de co-catalyseur employé.

L'exploitation de ressources biosourcées renouvelables et d'oxydes de carbone apparaît en outre comme un élément indispensable pour le développement durable de procédés de synthèse innovants. La mise au point de réactions de ligation de type "click" est de plus essentielle pour la synthèse d'architectures très complexes dans des conditions expérimentales beaucoup plus simples et compatibles avec des milieux biologiques. La prise en compte des problématiques de développement durable implique aussi des synthèses plus efficaces, plus courtes (nombre d'étapes et temps de réaction), plus propres (minimisation des déchets, solvants absents ou aqueux, etc.) et moins onéreuses.

La chimie macromoléculaire est une discipline jeune qui consiste à former des édifices architecturaux macromoléculaires plus ou moins complexes à partir de synthons réactifs d'origine fossile ou biosourcée, dans le but d'obtenir des systèmes présentant des propriétés spécifiques dont l'usage va permettre de répondre aux enjeux sociétaux présentés précédemment. Le chimiste des polymères dispose déjà d'une boîte à outils très fournie qui va de la modification des polymères (naturels ou non), à la polymérisation par étapes ou par croissance de chaîne en passant par la polymérisation contrôlée et vivante et qui permet de maîtriser les masses molaires des macromolécules, la dispersité de la taille des macromolécules et également leur composition. Cependant, les nouvelles approches, inspirées des processus biologique et/ou de la chimie de peptides ou bien encore faisant appel à des systèmes de catalyse chimique ou enzymatique permettent de conforter le concept de chimie de précision, terme qui était, encore récemment, dénié aux chimistes des polymères. Ces nouvelles méthodes assurent en effet le contrôle de sélectivité et régiosélectivité de la réaction chimique, et donc de la régularité de la structure de la chaîne macromoléculaire (tacticité, etc.) L'émergence de ces concepts doit favoriser les projets aux interfaces avec d'autres disciplines telles que la biologie, la catalyse, etc.

La communauté des polyméristes a aussi largement investi le domaine de la chimie supramoléculaire pour promouvoir cette chimie de précision qui est induite par la spécificité des liaisons non-covalentes et ainsi élaborer de nouvelles structures, surfaces ou nano-objets polymères, éventuellement stimulables et

présentant des propriétés avancées comme l'autoréparation, le recyclage, etc. Plus largement, ce concept de liaisons réversibles a donné naissance aux polymères ou matériaux dynamiques, par exemple les vitrimères qui ont la capacité à se transformer comme des thermoplastiques tout en ayant les propriétés de matériaux thermodurcissables. Ce concept émergent ouvre un large espace pour l'innovation et des projets interdisciplinaires.

La nature reste aussi une source inépuisable d'inspiration et de nouveauté. Déjà lancée depuis plus de 10 ans, la valorisation de la biomasse est devenue une réalité industrielle. Sur le plan recherche, la valorisation des déchets végétaux et des matériaux lignocellulosiques est un objectif à moyen terme, notamment pour élaborer des synthons aromatiques. Le développement des matériaux polymères passe aussi par l'émergence de nouveaux procédés d'élaboration (extrusion réactive, ultra-sons, micro-ondes, CO₂ super-critique, etc.) et de transformation (nanoextrusion, fabrication additive, etc.)

Outre les propriétés physico-chimique et d'usage attendues, la stratégie d'élaboration d'un polymère et, plus largement, d'un matériau polymère doit intégrer dans sa conception la notion de transformation, de réutilisation, de recyclage et ou de biodégradation. Plus globalement l'analyse de cycle de vie (ACV) d'un matériau devient incontournable.

La Chémobiologie explore le vivant par une meilleure compréhension des mécanismes fondamentaux des processus biologiques et de leurs régulations par de petites molécules naturelles ou synthétiques et/ou par des réactions chimiques. L'intervention dans l'analyse et/ou la régulation d'un processus biologique nécessite la conception de molécules actives/principes actifs (peptides, polysaccharides, lipides, et sondes fluorescentes, imagerie, etc.) et/ou de substances naturelles issues d'extraction. Elle nécessite aussi le développement de méthodes d'analyse pour sonder la structure, démarches bien évidemment intimement liées aux domaines d'applications, particulièrement dans le domaine de la Santé. Toutes ces démarches sont associées à des développements en bio-informatique et modélisation, spectroscopies optiques et magnétiques, spectrométrie de masse, méthodes de diffraction, imageries.

La chimie de coordination et plus spécifiquement la chimie organométallique a consolidé sa position dans la recherche de méthodes permettant

l'activation de liaisons C-H et leur fonctionnalisation sélective, l'activation des liaisons C-C pour la chimie des trans-réactions dans les vitrimères, la décomposition des polymères en oligomères ou molécules de faible poids moléculaire potentiellement recyclables dans les process industriels, l'activation et la dérivation de petites molécules. La métathèse des oléfines biosourcées connaît un regain d'intérêt. La chimie des métaux de transition en phase homogène contribue plus généralement aux efforts de rationalisation des process industriels en s'inscrivant dans le développement de catalyseurs plurifonctionnels, pour la catalyse uni-réactionnelle ou pour la catalyse multi-composant ou tandem avec une quête prononcée pour le recours à des métaux peu coûteux et largement disponibles dont la chimie reste toutefois un défi expérimental majeur. L'optimisation des catalyseurs pour une économie d'énergie, le traitement et la remédiation de l'air et des eaux, le remplacement des métaux nobles dans les domaines de la (photo)catalyse, l'(opto)électronique, l'énergie, le transport, la communication, et la durabilité des matériaux synthétisés et leur régénération sollicitent un effort important de recherche qui a connu une évolution constante.

En particulier, l'activation/valorisation/conversion de petites molécules (CO_2 , O_2 , N_2 , H_2 , alcanes légers) via la catalyse homogène et hétérogène est un axe crucial pour les applications énergétiques et environnementales (par exemple les piles à combustible). Le concept d'*Eco-Conception* en chimie de synthèse (« chimie verte ») est devenu essentiel, tout comme la valorisation de la biomasse, des sources de carbone renouvelables, par les voies biochimiques et catalytiques thermochimiques. Un axe majeur est représenté par le développement de matériaux nanostructurés pour la catalyse et l'adsorption. En particulier émergent les matériaux moléculaires, avec une nanostructuration mono-, bi- ou tridimensionnelle via des interactions supra-moléculaires, et la possibilité de multi-fonctionnalité/synergie de propriétés permettant une grande variété de domaines d'applications. Entre autre, on peut citer les MOF (metal organic frameworks), les PCP (porous coordination polymers), les COF (covalent organic frameworks) et les matériaux hybrides bio-inspirés. Dans ce contexte, la chimie bio-inorganique et les systèmes biomimétiques connaissent un grand essor. Enfin, un autre axe fondamental est la chimie de modifications des surfaces (modèles plans, nanoparticules, matériaux poreux, post-fonctionnalisation) par différentes techniques (laser, plasma, CVD, greffage covalent, etc.)

L'électrochimie est également un outil de synthèse, qui permet de construire ou agencer de nouvelles molécules, d'élaborer des matériaux et des structures moléculaires, composites ou hybrides et de réaliser de nouvelles interfaces fonctionnelles. L'utilisation des liquides ioniques à basse température pourra amener à de nouvelles voies de synthèse en chimie verte. Un domaine émergent est l'électrochimie bipolaire qui s'est développée par exemple pour la synthèse de particules Janus et qui possède des applications potentielles aussi bien dans le domaine des nanosciences qu'en chimie analytique et des matériaux. L'électrochimie localisée est également une stratégie très prometteuse pour la préparation de surfaces fonctionnalisées et nanostructurées ainsi que de filaments métalliques, contacts atomiques et nanofils.

En chimie du solide, les efforts de synthèse portent entre autres sur les nanomatériaux et nanostructures, les matériaux hybrides ou bio-inspirés, avec un souci d'eco-efficience (choix de la nature des matériaux, minimisation de la quantité de matière) et une capacité de recyclage en fin de vie. La combinaison des données expérimentales déjà connues et la simulation d'un très grand nombre de systèmes potentiels, appelée génomique des matériaux, permet aujourd'hui d'orienter les efforts de synthèse sur les cibles les plus prometteuses. Ces efforts de modélisation investissent aussi l'échelle mésoscopique, avec des retombées sur des matériaux piézoélectriques ou bio-inspirés, sur le contrôle de défauts structuraux, sur le mélange de matériaux nano et micro-structurés, etc. Dans ce contexte, la synthèse de nouveaux matériaux, par le biais d'une chimie exploratoire toujours indispensable, doit être largement soutenue, comme l'ont pointé les actions nationales pour une chimie du solide exploratoire (PIRMAT Bordeaux 2011, ANF ChimSol Caen 2015).

2.2. Les matériaux et leur assemblage

L'objectif principal est le développement de nouveaux matériaux fonctionnels avec des meilleures performances via des procédés plus rapides, plus propres et plus économiques, en prenant en compte le cycle de vie entier du matériau (de la synthèse au recyclage). Ainsi, se développe la préparation de matériaux et de composites inorganiques, organiques et hybrides par des méthodes d'assemblage de type bottom-up, créant des architectures composées de briques élémentaires, par exemple assemblages de nano-objets ou matériaux construits sur des squelettes biosourcés. Cela nécessite un ajustement optimal de la

composition chimique, de la structure et de la texture (porosité, nanostructuration, etc.) afin de contrôler à façon les propriétés physiques, chimiques, catalytiques et/ou biologiques du matériau en vue d'une possible application.

Ainsi, la physicochimie des matériaux polymères s'appuie sur une approche multi-échelle pour atteindre de multiples fonctionnalités. En parallèle des efforts portant sur l'architecture des macromolécules elles-mêmes (polymères en étoile, dendrimères), ce sont l'exploitation des phénomènes de séparation de phases dans les mélanges peu ou pas miscibles, ainsi que les phénomènes d'auto-organisation dans les copolymères di- ou tri-blocs qui offrent le plus de possibilités. Cette structuration multi-échelle est aussi recherchée pour favoriser le couplage du nano-objet (nanotube de carbone, silicates lamellaires, graphène ou whiskers de cellulose) avec des renforts fibreux, tandis que les colloïdes concentrés et les polymères nano-chargés sont aujourd'hui deux domaines très étudiés.

Ces approches sont valorisées dans des domaines émergents que sont les matériaux cellulaires (mousses, aérogels), matériaux pour la santé et à l'interface avec le vivant, matériaux électro/magnétocaloriques, etc. et font appel à des procédés eux aussi émergents (fabrication additive, stéréolithographie, plasma, micro et nano co-extrusion, multi-couches, micro-injection, surmoulage pour la plastronique, etc.)

Au-delà des matériaux polymères, des matériaux moléculaires et hybrides sont développés comme matériaux fonctionnels pour l'électronique (transport de charges, de photons, conversion photovoltaïque, transistors, capteurs), en optique (détection, affichage et stockage de l'information, défense), en magnétisme. S'appuyant sur la richesse remarquable des structures moléculaires permises par une chimie organique de synthèse toujours plus performante, des effets de synergie sont recherchés dans des systèmes multifonctionnels mettant en œuvre dans le même matériau au moins deux propriétés telles que l'opto-magnétique, l'opto-mécanique, la conduction/magnétisme, la luminescence/propriétés d'optique non-linéaire...

L'électrochimie offre également des outils pour la préparation ou la transformation sélective de matériaux ou de surfaces ainsi que la production et le stockage d'énergie. Le développement des énergies renouvelables, par leur propre nature intermittentes, la volonté de disposer de sources autonomes d'énergie électrique pour l'alimentation de petites centrales ou d'appareils portables, l'essor des

véhicules électriques et hybrides, ont engendré d'intenses efforts de recherche dans le domaine des générateurs et des accumulateurs électrochimiques (e.g., batteries Li-ion, supercondensateurs, piles à combustible). Dans ce cadre, notons l'émergence du réseau RS2E (Réseau sur le Stockage Electrochimique de l'Énergie) qui a été conçu pour permettre un transfert technologique rapide et efficace vers le monde industriel national.

Ces évolutions fortes vers les matériaux moléculaires se retrouvent en parallèle en chimie de coordination et en chimie organométallique, où le développement de matériaux nanostructurés est une évolution majeure en catalyse et en adsorption. Citons à titre d'exemple zéolithes, charbons, argiles, MoS₂, graphène, nitrures de carbone, HDL, MOF, nanotubes (carbone, oxydes), matériaux mésostructurés (carbone, oxydes), matériaux hybrides, matériaux bio-inspirés, nanoparticules, autant de matériaux avancés aux énormes potentialités à explorer. Les solides cristallins organiques ou métallo-organiques nanostructurés via des liaisons non covalentes ou les « composites » associant une surface (métallique, oxyde ou polymère) et une phase structurée par des interactions non-covalentes illustrent ces nouvelles familles de matériaux moléculaires développables à l'infini.

Parmi les procédés d'élaboration de matériaux développés ces dernières années dans la chimie du solide, on peut rappeler par exemple ceux qui permettent d'obtenir des nanoparticules, des nanofibres ou des films ultra-minces grâce à des méthodologies à la frontière avec la physique, incluant la synthèse activée par micro-ondes/ultrasons, le dépôt physique/chimique en phase vapeur (PVD, CVD), le dépôt de monocouches atomiques, l'électrofilage et l'électrospray, l'impression 3D, le Spark Plasma Sintering (SPS) et tout possible couplage de ces techniques. Toujours dans une approche bottom-up, l'assemblage et la mise en forme des matériaux devient un aspect de plus en plus essentiel, avec l'auto-assemblage et l'exploitation de la fonctionnalisation chimique via des interactions ioniques/covalentes générant des matériaux composites hiérarchisés. La nature est source d'inspiration, mais on peut aussi élaborer des matériaux avec des propriétés qui n'existent pas dans la nature. C'est le cas des métamatériaux : des matériaux à façon avec des propriétés électromagnétiques, optiques ou acoustiques nouvelles. L'avancée de méthodes de caractérisation de plus en plus sophistiquées telles que les microscopies électroniques à haute résolution et en

champ proche permet un contrôle fin de cette nano-structuration et/ou hiérarchisation. De plus, l'émergence des méthodes analytiques *in situ* et *in operando* assure le suivi du matériau dans les conditions opératoires ainsi que son éventuel vieillissement/dégradation dans le temps.

2.3 Chimie du vivant

Force est de constater que la France souffre encore du cloisonnement historique entre les disciplines. Au-delà de l'enseignement dans le secondaire, où l'on se débat entre parcours scientifiques et non scientifiques, bac général et bac professionnel, le carcan des disciplines perdure dans l'enseignement universitaire, et ceci même entre sciences dites dures. Mais n'est-il pas déjà trop tard à l'Université pour enfin donner goût aux démarches transgressives !

Dans le cadre imparti « chimie du vivant » nous considérerons la place de la Chimie et son évolution chaotique entre physique et biologie, coïncée entre des appellations en évolution de physicochimie, biochimie, biophysique, biologie chimique. Seule la chimie de synthèse tente de résister, même si le chant des sirènes tente de dévoyer cet îlot de résistance pour la transformer en pourvoyeuse de molécules.

Dans quelques pays depuis presque vingt ans, voire plus, la Chimie s'est emparée des questions du vivant et des chimistes ont structuré une chimie du vivant, sous un dénominateur « Chemical Biology » créant Instituts ou Départements dédiés en associant compétences et disciplines. Citons quelques pays de référence dans cette démarche transdisciplinaire : les Etats-Unis avec le « Synthetic Biology Institute » (Berkeley), le « Department of Chemistry and Chemical Biology » ainsi que les « Broad Institute » et « Wyss Institute » (Harvard), le Royaume Uni avec Oxford et Cambridge, Londres et leurs départements dédiés, citons le « Department of Biochemistry, Chemical Biology and Drug Design group », l'« Institute of Chemical Biology » (Imperial College), l'Allemagne avec les Max Planck Institutes, etc. En France, le cœur du débat demeure encore où se situer, comment se définir. La dénomination biologie chimique trop « brutale » pour certains dans sa traduction de « chemical biology » positionnerait la chimie comme une sous-discipline de la biologie, alors francisons en "chémobiologie" !

En l'absence d'une réelle culture et/ou offre de formation pluridisciplinaire aux interfaces entre chimie, physique et biologie comment travailler à l'interface ? Doit-on se contenter d'une formation en communication pour échanger avec des biologistes et des cliniciens, la validation d'une nouvelle approche

thérapeutique par le biologiste/clinicien ouvrant ensuite la voie à l'intervention du chimiste ?

À la croisée de la Chimie, de la Biologie et de la Physique, la Chémobiologie permet d'appréhender les fonctions biologiques à différentes échelles : molécule, cellule, tissu, organisme. Elle fait en particulier appel à des criblages contre une cible macromoléculaire donnée (approche réductionniste partant d'hypothèses sur l'implication d'une cible spécifique ou sur le mécanisme d'action) ainsi qu'à des criblages phénotypiques (approche agnostique non biaisée par des hypothèses basées uniquement sur la recherche d'un effet biologique). Les premiers aboutissent à l'identification et l'optimisation de sondes moléculaires spécifiques d'une cible permettant d'étudier sa fonction et son implication éventuelle dans une pathologie (validation de cible) ; quand c'est le cas, ces sondes constituent alors un point de départ pour la conception de candidats médicaments. Les seconds permettent de mettre en évidence de nouveaux mécanismes d'action, de nouvelles voies de signalisation et, par voie de conséquence, des approches thérapeutiques originales.

La recherche de petites molécules interagissant avec une cible s'appuie sur le criblage de banques de composés de taille variable. Après l'adoption du « fragment-based drug design » par les sociétés pharmaceutiques basé sur le criblage de banques de petite taille (plusieurs centaines à plusieurs milliers de composés de faible masse moléculaire, en général moins de 350 Da, permettant de trouver des points d'ancrage au site actif constituant le point de départ pour la conception de composés plus élaborés de meilleure affinité pour la cible), on assiste au retour de très larges banques issues de la chimie combinatoire (plusieurs millions de composés) avec les « DNA-encoded chemical libraries » dans lesquelles des petites molécules sont conjuguées à de courtes séquences d'ADN servant à leur identification par « code barre ».

En termes de molécules actives, de nouvelles familles de composés émergent au-delà des traditionnelles « petites molécules », comme les peptides modifiés et peptidomimétiques, les macrocycles et les ARN thérapeutiques (siRNA, miRNA, mRNA, oligonucléotides antisens, ces derniers étant modifiés chimiquement pour assurer leur stabilité en milieu physiologique).

En termes de cibles thérapeutiques, des familles de cibles auparavant considérées comme difficiles (en particulier les protéines membranaires comme les RCPGs et les canaux ioniques) sont devenues

abordables, en particulier grâce aux progrès de la biologie structurale, laissant la place à de nouvelles frontières, comme les interactions protéine-protéine ou protéine-acide nucléique et les protéines intrinsèquement désordonnées.

Il faut aussi citer de nouvelles approches moléculaires prometteuses comme les modifications ciblées de l'ADN avec le système CRISPR/Cas9 et plus récemment de l'ARN avec le système CRISPR/Cas13 qui sont en train de révolutionner la biologie et peut-être, à terme, la médecine, l'immunothérapie des cancers utilisant les cellules CAR-T (lymphocytes T porteurs d'un récepteur antigénique chimérique) et la dégradation ciblée de protéines indésirables par des molécules bifonctionnelles (PROTAC : proteolysis targeting chimera) capables d'ancrer la protéine à éliminer à une ubiquitine ligase E3 qui va catalyser le transfert d'ubiquitine d'une protéine E2 à la protéine à éliminer, la marquant pour la dégradation par le protéasome.

On peut supposer que la Chémobiologie, discipline en pleine effervescence, en lien avec la biologie des systèmes pour la connaissance des réseaux d'interaction et des voies de signalisation, les techniques à haut débit et la montée en puissance de l'intelligence artificielle, n'en est qu'à ses débuts.

À côté des molécules thérapeutiques, on s'intéresse également aux molécules dans notre environnement et notre alimentation pouvant présenter des dangers pour la santé humaine. Ainsi, les perturbateurs endocriniens font depuis peu l'objet de nombreuses études.

Enfin l'étude du vivant a un impact dans bien d'autres domaines que la santé : ainsi la chimie biomimétique, désormais appelée bio-inspirée, touche à l'énergie (énergies propres, par exemple H₂), à l'environnement (biorémédiation), à la chimie verte (par exemple la transformation N₂ --> NH₃ inspirée par la nitrogénase, la biocatalyse de réactions organiques), aux matériaux biocompatibles, etc.

Dans ce contexte en évolution rapide fortement pluridisciplinaire, et en conjonction avec l'arrivée de nouveaux outils de plus en plus puissants en provenance des disciplines connexes [physique : cryo-microscopie électronique permettant la résolution d'un nombre croissant de structures macromoléculaires complexes jusqu'alors inaccessibles à l'étude structurale ; biologie : séquençage très haut-débit, outil de modification ponctuelle du génome (CRISPR) ; informatique : biologie des systèmes, exploitation des données massives ("omics")], il faut soutenir fortement la

Chémobiologie. Cette dernière va jouer un rôle essentiel dans le développement de nouveaux outils pour élucider les processus biologiques fondamentaux et la mise au point de nouvelles stratégies thérapeutiques (essor de la médecine personnalisée).

2.4 Méthodes d'analyse et suivi des systèmes complexes

La Chimie Analytique est aujourd'hui un domaine disciplinaire largement établi et qui répond à de nombreux besoins sociétaux (sécurité alimentaire, environnement, diagnostic, etc.) Néanmoins, la chimie analytique continue à évoluer et à se renouveler et ce notamment pour répondre aux enjeux précédemment exposés. Une des mœurs de la chimie analytique moderne s'articule autour de la micro-fluidique. La possibilité de manipuler des fluides dans des canaux de dimensions micrométriques permet de fait une miniaturisation des approches analytiques et en ce sens répond déjà à certains des challenges auxquels la chimie analytique est confrontée (chimie analytique plus verte, haut débit...). En effet, la micro-fluidique permet de diminuer drastiquement les volumes de réactifs nécessaires mais également les volumes d'échantillons. En ce sens, elle permet pour une quantité d'échantillon finie d'effectuer un plus grand nombre d'analyses et potentiellement d'étudier un plus grand nombre de biomarqueurs ce qui peut être primordial dans le contexte de médecine personnalisée.

En parallèle de ces aspects qui concernent uniquement une réduction d'échelle, le caractère intrinsèquement pluridisciplinaire de la micro-fluidique (physique, technologies, chimie et biologie) permet également de développer des nouveaux concepts et de nouvelles approches analytiques. On peut notamment citer le potentiel de la micro-fluidique de gouttes qui a permis de faire émerger de nouveaux biomarqueurs (ADN tumoral circulant) en oncologie médicale et qui devrait répondre aux défis de l'analyse de cellules individuelles avec des approches de type code à barre.

Cette évolution a été rendue possible par une forte interaction entre les différents champs disciplinaires et une communauté micro-fluidique française très active. Il convient de continuer à soutenir ces évolutions de la chimie analytique moderne qui font de ce domaine scientifique non plus seulement un support pour l'analyse mais aussi un domaine scientifique et technologique riche et pourvoyeur de transfert technologique et de création de start-up.

2.5 Théorie, modélisation, simulation

Nous vivons une évolution importante de la place de Chimie Théorique (dans ses volets de théorie analytique, modélisation numérique, et simulation) dans les projets de recherche aussi bien que dans les unités de recherche. L'enjeu se déplace et se focalise désormais moins dans le développement de nouvelles méthodologies, mais dans la valeur ajoutée de la chimie théorique pour la compréhension de systèmes complexes, au sein de projets de recherche regroupant plusieurs techniques de caractérisation, à la fois expérimentales et théoriques. On voit notamment un apport majeur d'études incluant des techniques de modélisation à plusieurs échelles (combinant par exemple microscopiques et mésoscopiques, ou calculs statiques et simulations dynamiques), et une évolution vers des techniques résolues en temps et en espace, *in situ* ou *in operando*. En ce sens, la modélisation devient un outil parallèle aux techniques expérimentales, une autre manière de générer des données sur des systèmes d'intérêt, une «expérience *in silico*».

Cette évolution a été permise par la maturité atteinte par d'un certain nombre de méthodes « de référence » (calculs DFT, dynamique moléculaire *ab initio*, champs de force classiques, méthodes de criblage virtuel, calculs de docking, etc.), stables et robustes, et par la disponibilité de codes de calculs riches en fonctionnalités, disponibles sur de nombreuses plateformes et avec une bonne efficacité numérique à des niveaux de parallélisation et des tailles de système élevées. On trouve notamment de nombreux logiciels sous licence libre ou académiques, disposant d'une large communauté d'utilisateurs au niveau national. Un autre facteur marquant de cette transition est un accès relativement aisé aux installations de calcul, à l'échelle locale, régionales (mésocentres), nationale (via le Grand équipement national de calcul intensif GENCI créé en 2007), et européenne (via l'infrastructure de recherche PRACE notamment).

En parallèle, on note un plus grand nombre d'« utilisateurs avancés » des méthodes de chimie théorique, sans en être nécessairement experts ou développeurs. Cette évolution augmente l'importance de l'utilisation de la chimie théorique dans les grands projets et les publications à haute visibilité, à tel point qu'elle apparaît maintenant comme un outil incontournable de la caractérisation à l'échelle microscopique des systèmes et processus physico-chimiques. Si cette évolution est une force pour la communauté de chimie théorique, il convient de veiller à ce que ces chercheurs puissent être accompagnés dans leur formation aux outils

théoriques, à la fois en formation initiale et continue (écoles thématiques, actions nationales de formation, etc.), mais aussi à travers des réseaux disciplinaires permettant l'échange de bonnes pratiques et les échanges scientifiques.

Néanmoins, il convient également de continuer à soutenir et financer les travaux les plus en amont, sur des développements méthodologiques et logiciels (le « cœur de métier » de la chimie théorique), afin de faire émerger les techniques de modélisation nouvelles ou le passage à l'échelle « appliquée » (base de code utilisée à large échelle par la communauté de recherche) des techniques prometteuses. Cet appui nécessite également un soutien des réseaux existants sur les thématiques de la modélisation (GDR, réseaux ou sociétés savantes) et le renforcement de l'offre de formation, prédoctorale et doctorale, alors que les filières spécifiques à la chimie théorique tendent localement à être menacées, notamment au niveau master.

2.6. L'évolution des disciplines

L'évolution des disciplines relève d'une dynamique dans laquelle certaines sous-disciplines connaissent une forte progression en lien avec le pilotage de la recherche mais qui en parallèle s'accompagne de la disparition de certaines sous-disciplines (par exemple, la cristallographie, la chimie organique physique, la thermodynamique classique) qui seront un fort handicap pour le futur (situation que l'on a connue par exemple dans le domaine de la chimie enzymatique).

Si le rôle et l'intérêt de l'interdisciplinarité sont croissants, la structuration du CNRS en sections et les faibles moyens alloués à l'interdisciplinarité demeurent un véritable handicap. Le renforcement des commissions interdisciplinaires, et la transformation de certaines en véritables sections seraient des moyens d'améliorer la situation.

L'émergence scientifique recouvre les recherches opérant une rupture de pratiques et/ou de paradigmes scientifiques qui ne sont pas aisément décelables dans leurs phases initiales. L'émergence scientifique est avérée par la persistance d'une activité scientifique originale qui peut dans la plupart des cas se heurter à des résistances, épistémologiques ou structurelles, liées à l'hétérodoxie des nouvelles thèses défendues, à la non préparation des esprits au saut épistémologique initié. Le statut du chercheur et de l'enseignant-chercheur est d'ailleurs celui qui préserve le mieux la liberté de la recherche et donc de l'innovation aux frontières de la connaissance. C'est à ce stade qu'un

soutien institutionnel en vue d'une consolidation du champ émergent trouve toute sa justification. Ce soutien peut aujourd'hui trouver plusieurs sources. Celles-ci sont principalement les actions des dispositifs du PIA et certaines initiatives récentes du CNRS comme par exemple l'AAP Momentum. La grande difficulté reste la possibilité pour les laboratoires d'initier et de maintenir une prise de risque scientifique car les financements récurrents restent limités et parce qu'il est souvent difficile de consacrer une partie des fonds de contrats de recherche existants à une recherche exploratoire déconnectée de la destination principale des projets déjà financés. Cette difficulté est réelle et peut obérer le développement scientifique des laboratoires tout comme leur participation à l'émergence de nouveaux champs de recherche. L'ANR qui, un temps, possédait un programme blanc, doit progresser dans son appui à la recherche exploratoire en levant les restrictions tacites qu'impose la feuille de route du programme européen H2020. Le CNRS doit pouvoir ménager une marge de financement de soutien à la maturation des recherches en rupture pour leur permettre d'augmenter leurs chances d'obtenir des financements ultérieurs. L'identification et le signalement de ces recherches « anormales » aux instances chargées de la politique scientifique s'inscrit dans les attributions mêmes des organismes tutélaires et donc du CNRS. La remontée depuis les directions d'unité qui semble être la voie la plus naturelle pour sensibiliser la direction d'un institut du CNRS est elle-même confrontée à plusieurs obstacles liés aux missions mêmes des directions d'unités (DU), aussi multiples et complexes que les champs disciplinaires couverts par les unités sont larges et nombreux (unités multi-sections, multi-instituts, multi-sites, multi-tutelles), qui ne sont pas nécessairement suffisamment distancées des impératifs locaux de politique scientifique. Cette observation doit cependant être contrastée par la vision d'ensemble que les DU peuvent avoir et qui peut être mise à contribution pour aider à identifier les « signaux faibles » d'une thématique en émergence et susciter les démarches volontaires de chercheurs. Le signalement « bottom-up » peut ne pas aller de soi, les instances internes des unités n'étant pas nécessairement scientifiquement compétentes pour juger de la nature innovante des recherches en question. Cette difficulté réelle, d'autant plus délicate à réduire en raison de la multiplicité des typologies d'unités relevant de l'INC, doit éveiller l'attention. Il faut garder à l'esprit que ces obstacles à l'innovation conceptuelle en « rupture » trouvent aujourd'hui bien plus de lieux pour se manifester avec la diversification des sources de financements. L'effet d'entre soi, de défense de communautés établies (autoréplication), effet de « masse » ou de mode, périmètres disciplinaires et

sous-disciplinaires qui vont contre l'ouverture et favorisent l'ultra-spécialisation, effets de site (poids de certains sites groupant des universités dites de "recherche intensive" déjà très impliqués dans le soutien à l'émergence par les dispositifs LABEX, Clusters, etc. et par les fondations d'université et autres dispositifs découlant des PIA) pouvant induire un phénomène de cumul au détriment des équilibres et de l'équité. Préserver un champ de liberté créative de la recherche et donc de prise de risque scientifique reste la mission fondamentale du CNRS, qu'il s'agit de consolider.

Si pilotage il doit y avoir, c'est dans la création des conditions de l'innovation et de la découverte, en favorisant la rencontre d'acteurs de champs disciplinaires différents, et en accompagnant toutes les initiatives multidisciplinaires visant l'innovation dès le début. On doit noter cependant que la dispersion des bailleurs de fonds compétents pour ces initiatives multidisciplinaires complique amplement la tâche des chercheurs(euses). Pour les initiatives fortement concernées par la protection de la propriété industrielle (PI), peu de programmes nationaux peuvent égaler les soutiens des programmes FET de l'ERC, ce qui pose la question de la stratégie nationale de reconstruction du tissu industriel face à la réalité d'une *mosaïcité transnationale* accrue et incitée des acteurs de la PI.

3- Structuration et environnement de la recherche en Chimie

3.1 Paysage de la Recherche

La force de la Chimie Française n'est pas dans sa concentration : l'INC possède une carte de maillage territorial très complète, et on trouve des unités partout où il y a des universités. Ses forces, soit près de 12 500 personnes, comprennent (données actualisées au 2016) 5196 chercheurs et chercheuses (dont 31% du CNRS), plus 390 rattachés et rattachées à d'autres instituts, 2685 BIATSS/IT (dont un peu plus de 50% du CNRS) et 4618 personnels non permanents.[2] De 60 chercheurs et chercheuses CNRS pour les unités plus grandes, à 4-5 pour les petites, la situation est ainsi très hétérogène, et cette diversité est revendiquée comme une richesse.

Un début de spécialisation scientifique au niveau régional se dessine. Ce mouvement se révèle par la montée en puissance de l'organisation territoriale par sites promue par les nouveaux modes de financement de la Recherche. Dans ce cadre, on note une volonté affirmée du CNRS d'être fortement impliqué dans la gouvernance de ces sites. Cette

volonté de rester un acteur majeur de la politique de site nécessitera une représentation plus forte et plus homogène du CNRS sur l'ensemble du territoire.

3.2 Financement de la Recherche

Au cours de ces dernières années, une évolution importante s'est mise en place dans le panorama du financement par la recherche. Si, d'une part, le financement récurrent des laboratoires n'a pas cessé de baisser et le rôle de l'ANR dans le financement sur projet de se consolider, l'apparition de nouveaux modes de financement, nationaux et internationaux, sont apparus. Au niveau national, la mise en place de la politique d'excellence mise en place par PIA (incluant Labex, iDEX, iSite, etc.) n'a fait que renforcer le pouvoir du CGI, instance placée auprès du Premier ministre. La création du CGI témoigne d'une forte volonté de la classe politique de piloter l'évolution des domaines de l'enseignement supérieur et de la recherche, de la valorisation de la recherche et de l'innovation sans s'appuyer sur les instances et les institutions qui ont jusqu'ici fait évoluer le monde français de la science.

La force de frappe du CGI a été impulsée par l'allocation d'un financement élevé aux PIA (à la hauteur de 57 milliards d'euro pour les trois premiers plans PIA), financements qui n'arrivent plus aux laboratoires par les autres voies de financement (inclus le CNRS), et qui forcent une évolution importante des politiques de site et l'émergence d'une hiérarchie forcée entre universités et instituts de recherche. Le financement des PIA ont en effet permis de transférer les financements récurrents des établissements pour les diriger avant tout vers le périmètre des actions d'excellence et ce au détriment des autres activités de recherche et de formation.

D'une part, on assiste à une nette diminution des dotations de base des établissements ne permettant presque plus aux personnels de l'ESR de développer des activités sans contrats. D'autre part, la multiplication des appels à projets ainsi que des mesures incitatives pour orienter la recherche publique (ANR, multitude de dispositifs pour le développement de la recherche partenariale et innovation, restructuration du paysage de l'ESR *via* les PIA) conduit à une complexification des financements (éligibilité de dépenses), à des temps réduits pour les recrutements, etc... Dès lors une crainte légitime d'émiettement de la liberté de la recherche due à sa contractualisation fait jour. Ceci pose la question impérieuse du rééquilibrage des modes de soutien à la recherche ainsi que de sa continuité pour que les chercheurs se recentrent sur leur cœur de métier, qui doit laisser un espace

suffisant à la prise de risque scientifique dont seul un financement pérenne peut garantir l'exercice libre. Au contraire, seuls les projets innovants et « en rupture » sont pris en considération. De plus, leur organisation et leur sélection se fait sur la base de défis scientifiques et sociétaux. La prise en compte des disciplines et sous-disciplines serait vraisemblablement plus pertinente pour la rédaction des projets.

3.3 Évolution des Métiers de la Recherche Scientifique

Le métier de chercheur a beaucoup évolué ces dernières décennies, en lien avec l'évolution de l'environnement de travail au laboratoire et les sources de financement. La diversification des sources de financement des projets de recherche des laboratoires académiques a entraîné la modification des modes de fonctionnement et du quotidien de nombre de nos chercheurs. Les ressources et les partenariats rythment la vie des thématiques de recherche, avec des perspectives à court ou moyen terme. La recherche de financement est par ailleurs une tâche chronophage. Le temps consacré au montage de projets et à la préparation de dossiers pour répondre aux appels d'offre (AO), dont le taux de succès reste relativement faible, ainsi que le temps consacré à la gestion administrative et financières des projets est pris sur la part précédemment réservée à l'activité scientifiques, à l'encadrement et à la formation. A défaut de pouvoir confier ces tâches à un personnel dédié, le temps passé à la gestion de projet entraîne une certaine distance entre le chercheur et son environnement.

Depuis 2009 et le passage aux RCE (responsabilité et compétences élargies), les petits établissements ont bloqué leur masse salariale avec comme conséquences peu de recrutements de Maîtres de Conférence et de Professeurs d'Université.

Concernant les IT, les données publiées sur le site du CNRS (bilans sociaux CNRS) montrent qu'après une augmentation d'environ 10% sur la période 2008-2011, le nombre d'IT de la branche professionnelle Science Chimique et Science des Matériaux (BAP B) reste sensiblement stable (+0,3%) sur les trois dernières années. Par ailleurs, une augmentation de la catégorie A (IR, IE, AI) est constatée par rapport aux corps des techniciens (T, Adj.T) passant de 3,95 A pour 1 Tech en 2008 à 5,98 A pour 1 Tech en 2011. Il y a une dévalorisation des métiers niveau catégorie A qui, faute d'avoir des collègues de catégories B et C, doivent faire preuve d'une pluridisciplinarité accrue et exercer tous les métiers d'Ingénieur de Recherche à Adjoint Technique, ce

qui est ressenti comme une perte de sens du travail.

Les contributions et les expertises des personnels IT ne sont pas toujours visibles. Ils apparaissent peu ou pas dans les présentations et les rapports et ne bénéficient pas toujours de considération nécessaire. Cette méconnaissance de leurs missions conduit à la pénalisation de ceux en particulier qui se consacrent principalement à une activité de recherche. Les cartographies réalisées lors de la mise en place du RIFSEEP en 2017 ont particulièrement révélé ce point qui a conduit à plusieurs recommandations des CS des Instituts du CNRS sur la très faible reconnaissance de l'exposition des métiers techniques dans l'évaluation de leur cotation RIFSEEP. Ces recommandations resteront lettre morte sans un changement des pratiques au sein des structures, au regard de la place qu'occupent les fonctions administratives par rapport aux fonctions scientifiques et techniques.

L'encadrement scientifique et technique des agents IT semble constituer une nécessité afin de faire évoluer leurs expertises le long de leurs carrières en accord avec une gestion de carrière dynamique. Dans le cas des IT CNRS, il y a à ce jour un accompagnement plus structuré et des formations professionnelles diversifiées et faciles d'accès, ce qui n'est pas toujours le cas des personnels techniques universitaires (BIATSS).

Un point marquant de ces dernières années concerne l'évolution des métiers des IT avec de plus en plus d'interdisciplinarité et de polyvalence, surtout pour les BAP B (Sciences chimiques et Sciences des matériaux) et C (Sciences de l'Ingénieur et instrumentation scientifique). L'interdisciplinarité des Ingénieurs et des Techniciens concerne principalement les IR et les IE. Le CNRS est en capacité d'afficher et de recruter des profils d'interdisciplinarité en concours externe mais l'interdisciplinarité peut constituer un frein à la progression des carrières des agents concernés. L'évaluation telle que proposée actuellement vise essentiellement à valoriser l'expertise technique.

« La polyvalence participe grandement au bon fonctionnement du laboratoire, elle tend à se développer en période de pénurie de postes et pour autant elle demeure majoritairement masquée et difficilement prise en compte dans la promotion. » (Interdisciplinarité des Ingénieurs et Techniciens au CNRS, OMES CNRS, 2017)

A l'INC, les agents sont confrontés à tous les risques particuliers : agents chimiques dangereux, CMR, agents biologiques, sources radioactives,

rayonnements optiques artificiels, nanomatériaux etc. De ce fait, la mise en place d'une démarche de sensibilisation aux risques liés aux manipulations est un point très important, mais la lourdeur de la tâche doit rester maîtrisée.

La direction de l'INC a pris la mesure de la tâche et plusieurs investissements ont été réalisés ces dernières années comme par exemple : remplacement des bouteilles d'hydrogène sous pression par des générateurs d'hydrogène, armoires de stockage de produits chimiques dangereux, hottes et sorbonnes, identification de dangers dus aux nanomatériaux, etc. Il est essentiel que les conventions entre le CNRS et les cotutelles des UMR identifient clairement la contribution de chacun dans la dépense inhérente à la sécurité au travail.

Dans notre domaine d'activité, particulièrement pour les disciplines appliquées, la conjugaison des compétences et des performances des trois composantes à savoir chercheurs, personnels techniques et équipements, est gage du succès de nos missions. Les performances des équipements de caractérisation s'améliorent de jour en jour et leur nombre augmente. Leur complexification nécessite des compétences et des expertises adaptées pour aller jusqu'aux limites de ce que les techniques modernes peuvent offrir, afin d'arriver à l'exploitation optimale des résultats expérimentaux. Il est plus difficile voire impossible d'obtenir un poste d'Ingénieur ou de technicien que d'acheter une machine qui peut valoir plus d'un million d'euros. Cette perspective nécessite une collaboration de qualité entre différentes catégories de personnels (EC, CR, ITA, BIATSS). Elle ne sera que meilleure lorsque les compétences et les contributions de chacun sont reconnues à leur juste valeur.

Par des choix politiques (construction de plateformes, PIA, etc.), les parcs instrumentaux grossissent. La conséquence que l'on peut déplorer est l'exploitation trop partielle et trop superficielle de ces équipements ultra-performants par manque de vrais spécialistes associés. Ce point est d'autant plus accentué par l'augmentation des charges administratives des CR et EC au détriment de leurs fonctions d'encadrement et de leurs positions d'experts sur les techniques, par exemple de caractérisation. La fonction d'encadrement, indispensable pour les doctorants et jeunes chercheurs l'est autant pour les personnels ITA. Leurs contributions très appréciées ne sont pas toujours valorisées et reconnues à leur juste valeur. L'absence de visibilité sur la progression de carrière et les délais imposés, en particulier en début de

carrière, lorsque les jeunes recrues sont volontaires et dynamiques constitue un frein aux motivations. On constate qu'après une phase de satisfaction en tout début d'une longue carrière, la frustration s'installe pour des années restantes d'activité. L'effort doit être porté sur l'amélioration de ce point.

3.4 Evolution des relations avec les universités et l'enseignement supérieur

Une des forces du CNRS, notamment souligné dans le dernier rapport d'évaluation, est sa capacité à décliner son intervention dans des collaborations avec les universités et les centres d'enseignement. L'activité d'enseignement supérieur et de formation par la recherche reste en effet un de piliers portants pour assurer la continuité du vivier scientifique français.

Ces dernières années, cette intervention a davantage impliqué le CNRS dans le cadre de l'évolution de la Politique de Site, stimulée par la mise en place de politiques d'excellence menées par le CGI et des crédits mis en place par les régions pour stimuler l'activité et l'investissement dans les nouvelles technologies. La participation du CNRS à cette action est importante, et le CNRS doit arriver à concilier sa dimension nationale avec sa participation à une échelle plus locale. Malgré cela, une amélioration de la coordination entre universités et CNRS est souhaitable.

À ce jour, les universités et le CNRS ne coordonnent pas forcément leurs efforts en termes de financements aux laboratoires mixtes pour la formation par la recherche. On peut en effet remarquer l'existence de financements morcelés de la part des universités visant l'achat et le renouvellement d'équipements, en laissant à la bonne volonté des laboratoires une éventuelle gestion et coordination de tels investissements. Un manque de coordination existe parfois aussi dans la gestion des plateformes d'analyses, parfois adossées aux universités et parfois gérées par le CNRS, sans par ailleurs un cadre de collaboration spécifiquement défini. On se demande si des entités plus larges comme les COMUEs peuvent aider à une amélioration de cette coordination dans un cadre plus large.

Ce besoin de coordination et de définition d'un cadre plus clair n'est pas aidé par l'actuelle évolution en cours du paysage de l'ESR en France, avec l'avancement d'une politique de plus en plus centrée sur la sélection par ladite « excellence ». Dans le cadre des relations entre CNRS et universités, des

nouveaux outils apparaissent actuellement, comme par exemple les EUR (Ecoles Universitaires de Recherche) mises en place par le CGI dans le cadre du PIA3. Ce projet réserve un volant financier de 300 millions d'euro en 10 ans pour la création d'une version française des « graduate schools » américaines, avec la mise en place de parcours de Master d'excellence, qui seront liés à un nombre réduit d'Ecoles Doctorales sélectionnées sur leur niveau d'excellence. Cela est censé apporter une forme de sélectivité par la labellisation des jurys internationaux du programme d'investissements d'avenir qui distinguera des masters d'excellence parce qu'ils seront adossés à des axes de recherche sélectionnés. La création de tels outils complique d'avantage le panorama en devenir déjà assez complexe de l'ESR, en plus de concentrer une fois de plus les outils financiers dans les mains du CGI (SGI) pour des politiques élitistes.

3.5 Relations avec l'industrie

La chimie est un secteur propice à des relations fortes avec l'industrie dans de nombreux domaines (Pharmacie, Energie, Matériaux, Agro-Alimentaire, Synthèse, Formulation, Extraction, Instrumentation, etc.) Les opérateurs publics affichent une politique volontariste pour renforcer les collaborations avec les acteurs industriels, y compris au niveau international. Ainsi, l'Institut de Chimie est directement impliqué dans 10 unités partagées avec des grands groupes industriels (Solvay, EDF, Safran-CNES, Saint-Gobain, Herakles, etc.) dont 3 unités mixtes internationales (Japon, Chine, USA), dans 6 groupements de recherche, dans 15 laboratoires communs de recherche, et dans des fédérations de recherche (source : « Partenariat industriel, inter-organisme et international de l'Institut de Chimie », mars 2015). Il convient de noter que ces liens formalisés concernent majoritairement des grands groupes industriels, susceptibles de supporter les coûts de l'innovation et de la formation de leurs futurs experts (doctorants, master en alternance). Très peu de PME/PMI nouent des relations contractuelles avec la recherche académique, alors qu'elles représentent un potentiel reconnu d'idées novatrices et de croissance économique. On dénombre ainsi un seul laboratoire commun de recherche avec une PME, même si le programme LABCOM de l'ANR (lancé en 2013) a permis l'établissement d'une dizaine de LABCOM avec des PME/PMI.

Un autre indicateur intéressant est la prise de brevets et la création de start-up. En 2015, sur les 4117 brevets portés par le CNRS, 1704 concernaient l'Institut de Chimie, avec 309 licences d'exploitation (sur 1220) et 150 contrats de copropriétés

industrielles ou institutionnelles. Depuis 2000, une dizaine de start-up sont créées chaque année, essentiellement par des chercheurs, avec toutefois un rythme plus soutenu depuis 2009. Ces start-up émanent à 60% d'une vingtaine d'UMR, notamment UMR 5247-IBMM, UMR 6226-ISCR, UMR 8612-GALIEN et l'UMR 7006-ISIS. Les activités couvertes par ces start-up concernent pour environ 40% chimie moléculaire, la réactivité, la catalyse, la chimie physique, analytique et théorique. La chimie supramoléculaire, organique, la chimie du vivant et pour le vivant sont représentées à la hauteur de 35%, alors que la science des matériaux, des polymères, et de la matière molle compte pour 23 %. Les données consolidées (1999-2013) indiquent la création de 140 start-up en chimie, correspondant à 1100 emplois créés (77 % des start-up ont moins de 7 salariés), avec 47 % de ces start-up avec un chiffre d'affaire annuel inférieur à 200 k€. On peut citer comme exemples marquants de réussite Graftys, Innoveox et MAGPIE Polymers.

Néanmoins, le lien entre secteurs académique et industriels (variables selon les secteurs) reste fragile, outre la grande difficulté à tisser des liens avec les PME/PMI. Les relations les plus solides correspondent à des collaborations anciennes, souvent basées sur des relations « amicales » et de confiance. Elles sont aussi le fait de projets collaboratifs au travers de financements CIFRE, FUI et Carnot.

Ces relations peuvent disparaître avec le turnover naturel et les changements profonds dans les pratiques et les fonctionnements : les chercheurs répondent à des appels à projets (ANR, Europe, Région...) tandis que les grands groupes industriels se recentrent sur la recherche d'innovations très incrémentales, payantes sur le court-terme. Les grands groupes possédant souvent l'expertise et les équipements nécessaires pour leurs besoins courants, leur demande se place généralement dans un contexte d'un besoin exceptionnel avec un équipement sophistiqué et l'embauche d'un post-doc ou d'un ingénieur, c'est-à-dire soutenu par une expertise de très haut niveau pour répondre à une problématique de façon très rapide. Les PME, bien qu'intéressées à créer des relations avec la recherche, ont de trop grandes difficultés à trouver, gérer et maintenir ces relations (manque de temps, d'outils de veille technologique). Une difficulté reconnue par les industriels est l'identification d'un laboratoire susceptible de répondre à leurs besoins.

Le verrou majeur pour l'établissement de relations concrètes, tant du côté académique qu'industriel, demeure la partie contractuelle, avec des temps de

négociations et de mise en place bien trop longs, qui se traduisent en coûts élevés, complètement rédhibitoire pour une PME/PMI. L'accord Cadre est une solution à cette lourdeur administrative mais il ne concerne que les grands groupes. La propriété intellectuelle au cœur de ces négociations est souvent un sujet délicat voire bloquant, notamment dans le cas où un industriel ne souhaite pas breveter, qui se règle au cas par cas. A cela s'ajoute une complexification du paysage académique ces dix dernières années (autonomie, PRES, Labex, IDEX, Pôles, réseaux, Instituts Carnot), difficile à appréhender par les industriels et multipliant de fait les interlocuteurs dans la partie contractuelle. La construction des réseaux permettant le transfert de technologie entre université et entreprise a été une des nouveautés de ces dernières années : l'idée générale de ces structures est de fédérer entre eux laboratoires de recherche académiques, EPICs et groupes industriels pour faciliter et rendre plus rapide le transfert des innovations de l'académie à l'industrie. Le CNRS est un des acteurs dans la création de ces réseaux (on peut rappeler le réseau RS2E sur le stockage électrochimique de l'énergie), le rôle des EPICs étant surtout celui de proposer une étape intermédiaire dans le *scale-up*, de l'idée au prototype commercial. Toutefois, même au sein de ces structures, les accords concernant la gestion de la propriété intellectuelle ne sont pas anodins (souvent peu compréhensibles) et parfois le groupe industriel participe à ces activités de façon incomplète.

Parmi les exonérations fiscales et les aides incitatives de l'état à destination de la recherche privée, le crédit impôt recherche (CIR) constitue le dispositif le plus important. Celui-ci a connu une hausse significative de son montant en 2008 et n'a depuis cessé de croître. La nécessité de maintenir une recherche publique de haut niveau justifierait également des engagements politiques et budgétaires ambitieux.

4- Conclusion

Parmi les évolutions principales du paysage de la science au cours des dernières années, un changement conceptuel majeur est représenté par le passage, graduel mais inexorable, d'une vision scientifique disciplinaire héritée de la science classique à une vision sociétale où la science est au service de la société pour répondre immédiatement aux défis de demain (énergie, environnement, santé, etc.) : la Chimie disparaît nommément des programmes stratégiques pour se fondre dans le chœur des acteurs utiles des "défis sociétaux". Ce changement de perspective, qui devient aujourd'hui la vision dominante, rapprochant davantage le

monde de la recherche à des contingences sociétales, n'est que l'attestation d'un nouveau regard porté sur la Science par la société et par ses attentes, mais aussi le signe d'une volonté politique majeure de faire contribuer davantage la Science au développement du pays, de la rendre donc plus « utile », en négligeant la capacité du chercheur d'exercer sa propre créativité et donc de poser ses propres questions.

Cette nouvelle vision utilitariste, confortée et rendue centrale aujourd'hui par la mise en place des financements ANR organisés par défis sociétaux, est une vision alternative quelque peu inquiétante de prime abord mais pas forcément opposée à la vision disciplinaire classique. Par analogie avec la Cristallographie, l'exercice délicat consiste à trouver la transformation permettant de passer d'une représentation à l'autre, comme on passe de l'espace réciproque à l'espace réel. Dans ce rapport, nous avons cherché à montrer comment ces deux visions s'articulent entre elles, sans se retrouver forcément en opposition, mais sans nécessairement faciliter non plus la préhension de ce nouveau paradigme par les acteurs de la recherche scientifique. Le fait de piloter la Recherche par son impact sociétal présumé est parfois orthogonal à une vision de recherche plus fondamentale, celle de la Chimie *créant son objet* en permanence, parfaitement représentée dans les recherches primées par le prix Nobel de Chimie en 2016.

5- Recommandations

Au regard de cet état de faits le CSI de l'INC formule les recommandations suivantes :

- Préserver le CNRS comme lieu de liberté créative de recherche, comme lieu de prise de risque scientifique.
- Ne pas réduire le pilotage à des appels d'offre compétitifs, mais redonner des marges de manœuvre de politique scientifique aux unités et favoriser tous les outils collaboratifs et interdisciplinaires (MI, GDR...) qui suscitent la créativité du chercheur.
- Mettre toujours plus en avant les grands succès des partenariats du CNRS avec l'industrie dans la création de valeur et d'emploi.
- Renforcer l'implication du CNRS sur les sites dans la définition de la politique scientifique.
- Maintenir un flux d'emploi scientifique statutaire suffisant pour le maintien de l'attractivité des métiers de chercheur, ingénieur et technicien, pour éviter tout décrochage de la recherche française au niveau international.
- Assurer une veille sur les disciplines en péril et mettre en place des outils pour préserver et développer les compétences.

Annexes

Les Instituts du CNRS

INSB Institut des sciences biologiques
INC Institut de chimie
INEE Institut écologie et environnement
INSHS Institut des sciences humaines et sociales
INS2I Institut des sciences de l'information et de leurs interactions
INSIS Institut des sciences de l'ingénierie et des systèmes
INSMI Institut national des sciences mathématiques et de leurs interactions
INP Institut de physique
IN2P3 Institut national de physique nucléaire et de physique des particules
INSU Institut national des sciences de l'Univers

Les Sections et Commissions Interdisciplinaires

Sections du CoNRS ayant pour rattachement principal l'INC

Section 11 : Systèmes et matériaux supra et macromoléculaires : élaboration, propriétés, fonctions
Section 12 : Architectures moléculaires : synthèses, mécanismes et propriétés
Section 13 : Chimie physique, théorique et analytique
Section 14 : Chimie de coordination, catalyse, interfaces et procédés
Section 15 : Chimie des matériaux, nanomatériaux et procédés
Section 16 : Chimie et vivant

Sections du CoNRS ayant pour rattachement secondaire l'INC

Section 20 : Biologie moléculaire et structurale, biochimie

CID du CoNRS dont des sections sont rattachées à l'INC

50 : Gestion de la recherche
51 : Modélisation, et analyse des données et des systèmes biologiques : approches informatiques, mathématiques et physiques
52 : Environnements sociétés : du fondamental à l'opérationnel
53 : Méthodes, pratiques et communications des sciences et des techniques
54 : Méthodes expérimentales, concepts et instrumentation en sciences de la matière et en ingénierie pour le vivant

Sigles

ADC Antibody drug conjugate : anticorps monoclonal couplé à un agent cytotoxique par le biais d'un agent de liaison
AERES Agence d'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur
ACV Analyse de cycle de vie
ANF Action nationale de formation
AAP Appels à projets compétitifs
BAP Branches d'activités professionnelles (A : Sciences du vivant de la terre et de l'environnement; **B : Sciences chimiques et Sciences des matériaux**; **C : Sciences de l'Ingénieur et instrumentation scientifique**; D : Sciences humaines et sociales, E : Informatique, statistique et calcul scientifique ; F : Culture, Communication, Production et diffusion des savoirs ; BAP G : Patrimoine immobilier, Logistique, Restauration et Prévention ; J : Gestion et Pilotage)
BIATSS Personnels Bibliothécaires, Ingénieurs, Administratifs, Techniciens, de Service et de Santé
CGI Commissariat Général à l'Investissement
CID Commissions interdisciplinaires
CIFRE Convention industrielle de formation par la recherche
CIR Crédit impôt recherche
CMR Cancérigène, mutagène et repro-toxique
CNRS Centre national de la recherche scientifique
CNU Conseil national des universités
COMUE Communauté d'universités et d'établissements

CoNRS Comité national de la recherche scientifique
CRISPR Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats, en français « courtes répétitions en palindrome regroupées et régulièrement espacées »
CSI Conseil Scientifique d'Institut
CVD Chemical vapor deposition, en français, dépôt chimique en phase vapeur
DFT Density Functional Theory, en français, la théorie de la fonctionnelle de la densité
EPCS Établissement public de coopération scientifique
EPIC Établissement public à caractère industriel et commercial
EPSCP Établissement public à caractère scientifique, culturel et professionnel
EPST Établissement public à caractère scientifique et technologique
EQUIPEX Équipement d'excellence
ESR Enseignement supérieur et recherche
ETI Entreprise de taille intermédiaire
EUR Ecoles Universitaires de Recherche
FET Future and Emerging Technologies
FUI Fonds unique interministériel
GDR Groupement de recherche
GDRI Groupement de recherche international
GENCI Grand équipement national de calcul intensif
GIS Groupement d'intérêt scientifique
HCERES Haut conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur
H2020 Horizon 2020 - programme de financement de la recherche et de l'innovation de l'Union européenne pour la période 2014-2020.
IDEX Initiative d'excellence
IE Ingénieur d'étude
IR Ingénieur de recherche
IRM Imagerie par résonance magnétique
ISITE Initiatives Sciences Innovation Territoires Economie
IT Ingénieurs et Techniciens
LABEX Laboratoire d'excellence
LIA Laboratoires internationaux associés
MESRI Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation
MI Mission pour l'interdisciplinarité
OMES Observatoire des Métiers et de l'Emploi Scientifique
PEPS Projets exploratoires premier soutien
PET Tomographie par Émission de Positrons ou TEP en français
PIA Programme d'Investissements d'Avenir
PME Petites et moyennes entreprises
PPP Partenariat Public/Privé
PRACE Partnership for Advanced Computing in Europe
PRES Pôles de Recherche et d'Enseignement Supérieur
PVD Physical vapor deposition, en français, dépôt physique en phase vapeur
RCE Responsabilité et compétences élargies
RCPG Récepteurs couplés aux protéines G
RIFSEEP Régime indemnitaire tenant compte des fonctions, des sujétions, de l'expertise et de l'engagement professionnel
RS2E Réseau sur le Stockage Electrochimique de l'Énergie
RTP Réseaux thématiques pluridisciplinaires
SGI Secrétariat Général à l'Investissement
SMI Soutien à la mobilité internationale
SNR Stratégie Nationale pour la Recherche Scientifique
SPS Spark Plasma Sintering, en français, Appareil de Frittage Flash
TGIR Très grande infrastructure de recherche
UMI Unité mixte internationale
UMR Unité mixte de recherche
UMS Unité mixte de service
USR Unité de service et de recherche