



HAL
open science

Rapport de Prospective 2023 du Conseil Scientifique de l'Institut de Chimie du CNRS (Mandature 2019-2023)

Balan Lavinia, Marylène Bertrand, Roberta Bongiovanni, Catherine Debiemme-Chouvy, Marie-Hélène Delville, Anne Dolbecq, Sylvie Foucaud, Marion Girod, Ali Abou-Hassan, Dominique Harakat, et al.

► To cite this version:

Balan Lavinia, Marylène Bertrand, Roberta Bongiovanni, Catherine Debiemme-Chouvy, Marie-Hélène Delville, et al.. Rapport de Prospective 2023 du Conseil Scientifique de l'Institut de Chimie du CNRS (Mandature 2019-2023). Centre national de la recherche scientifique (CNRS). 2023. hal-04307872v2

HAL Id: hal-04307872

<https://hal.science/hal-04307872v2>

Submitted on 31 Dec 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - ShareAlike 4.0 International License

CONSEIL SCIENTIFIQUE DE L'INSTITUT DE CHIMIE (CSI INC) – MANDATURE 2019-2023

Lavinia BALAN (membre du bureau) ; Marylène BERTRAND-URBANIAK ; Roberta BONGIOVANNI ; Catherine DEBIEMME-CHOUVY ; Marie-Hélène DELVILLE ; Anne DOLBECQ-BASTIN ; Sylvie FOUCAUD ; Marion GIROD ; Ali ABOU-HASSAN ; Dominique HARAKAT (membre du bureau) ; Christophe INNOCENT (secrétaire scientifique) ; Emmanuel LACOTE ; Eric LEROY ; Philippe LESOT (membre du bureau) ; François MAUREL ; Claude NIEBEL ; Jean-Pierre PEREIRA RAMOS ; Claude PIGUET ; Alain RIVES ; Jean-Yves SALPIN ; Olivier SANDRE (président) ; Vincent SCHANEN ; Lorenzo STIEVANO ; Patricia VICENDO

Avant-propos

Le présent rapport de prospective résulte des discussions menées lors des séances du CSI de l'Institut de Chimie du CNRS (**INC**), qui se sont déroulées de janvier 2019 à septembre 2023, et dont la liste est fournie en Annexe. Les premières parties du rapport visent à dépeindre le paysage de la recherche française en chimie, mais comme toute représentation, elle sera forcément partielle et résultant du point de vue de ses auteurs, qui ne revendiquent pas d'embrasser l'entièreté des sujets de recherche actuels, mais simplement de donner une vision de la discipline à travers le prisme des connaissances, de l'expertise et des orientations de recherches des membres du CSI. Les propos exposés dans la suite de ce document résultent des débats et des réflexions des membres du CSI. Ils ont été suscités d'une part par la présentation régulière devant le CSI des *Actualités de l'INC* par sa direction, d'autre part par des exposés de personnalités invitées pour leur expertise (et sur suggestion du bureau) sur des questions précises sur lesquelles la direction de l'institut a demandé au CSI de réfléchir, soit desquelles le CSI s'est auto-saisi, en fonction de l'actualité, pouvant concerner les membres des laboratoires rattachés à l'INC. Le rapport s'achève par une série de recommandations élaborées de manière collégiale et votées en séance.

Introduction

On entend souvent que comparée à d'autres champs de la connaissance scientifique, la chimie possède la particularité d'être à la fois une science (c'est-à-dire un domaine de recherche, avec son épistémologie et ses méthodes), mais aussi une industrie, plus particulièrement depuis la révolution industrielle, avec l'exploitation du charbon puis le développement de la pétrochimie devenue aujourd'hui omniprésente, par ses multiples « commodités » apportées dans la vie courante des populations (produits d'hygiène, médicaments, etc.). Depuis que ses premiers postulats ont été établis dès la fin du 18^{ème} siècle par Lavoisier et ses successeurs, la chimie moderne est devenue aujourd'hui une discipline bien établie qui, nonobstant un langage commun à tous les chimistes (la nomenclature chimique), comporte une ramification relativement précise et très structurante de ses sous-disciplines.

En cela les grandes organisations des chimistes (Académie des sciences, sociétés savantes, en premier lieu desquelles la Société Chimique de France) mais aussi le Comité National de la Recherche Scientifique (**CoNRS**) ou le Conseil National des Universités (CNU) sont répartis en sections sous-disciplinaires aux contours scientifiques très précis: Chimie théorique, physique, analytique (**CNU-31**) ; Chimie organique, minérale, industrielle (**CNU-32**) ; Chimie des matériaux (**CNU-33**) et les six sections du **CoNRS**, qu'on peut résumer ainsi: Assemblages supramoléculaires, polymères & colloïdes (**Section 11**) ; Chimie organique et sciences moléculaires (**Section 12**) ; Chimie analytique, théorique, physique, photochimie et électrochimie moléculaire (**Section 13**) ; Catalyse, chimie de coordination et électrochimie (**Section 14**) ; Chimie des Matériaux (**Section 15**) et Chimie du et pour le Vivant (**Section 16**). Les intitulés exacts et mots clefs des six sections rattachées à l'INC sont présentés en Annexe 2.

I. État des lieux de la recherche française en Chimie

Qu'il s'agisse de concevoir, synthétiser et caractériser des molécules ou matériaux nouveaux, ou bien de nouveaux procédés, pour des applications spécifiques d'aujourd'hui mais aussi de demain, la chimie se trouve au carrefour de nombreux enjeux sociétaux tels qu'énoncés par les 17 objectifs de développement durable (ODD) définis par l'ONU (cf. **Tableau 1**). Ces ODD visent à ce que les sociétés de l'ensemble des pays du monde atteignent un stade de développement durable à la fois sur les plans environnemental (**odd6** : assainissement de l'eau, **odd12** : maîtrise des ressources naturelles) et social (**odd3** : santé, **odd4** : éducation, etc.). Simultanément, la création de connaissances doit rester l'essence même du travail du chimiste académique, la réalisation concrète de ces objectifs appartenant à la société tout entière. La recherche fondamentale doit rester le cœur de métier des laboratoires du CNRS, tout en cultivant l'interdisciplinarité de nos recherches en chimie. La chimie moderne dans sa globalité se situe ainsi au carrefour entre la physique, la biologie, la santé et le génie des procédés, développant même une nouvelle interface avec la « science des données » aujourd'hui en plein essor.

Tableau 1 : Les Objectifs de Développement Durable d'après www.un.org/sustainabledevelopment/fr/objectifs-de-developpement-durable/

<u>Alimentation</u>	<u>Santé</u>	<u>Environnement</u>	<u>Ressources naturelles</u>	<u>Education</u>	<u>Droits humains</u>
odd1 : Pas de pauvreté odd2 : Faim « zéro »	odd3 : Bonne santé et bien-être (vaccins)	odd7 : Energie propre et d'un coût abordable odd9 : Industrie, Innovation et Infrastructure odd11 : Villes et Communautés durables odd13 : Lutte contre le changement climatique	odd6 : Eau propre et assainissement odd12 : Consommation et production responsables odd14 : Vie aquatique odd15 : Vie terrestre	odd4 : Education de qualité	odd5 : Egalité entre les sexes odd8 : Travail décent et croissance économique odd10 : Inégalités réduites odd16 : Paix, justice et institutions efficaces

Depuis l'avènement de la théorie atomiste et sa démonstration par la physique quantique au début du XX^{ème} siècle, les objets d'étude de la chimie couvrent toutes les échelles entre celles de la molécule et des matériaux, les plus avancés de ces derniers (mais aussi ceux inspirés de la Nature) pouvant présenter une structuration hiérarchique multi-échelles. Concevoir de nouvelles molécules, structures chimiques ou matériaux innovants implique la recherche de molécules originales par leur composition chimique et/ou leur structure et dont les propriétés satisferont à l'application visée. A partir de ces molécules, s'impose l'élaboration d'objets fonctionnels mettant en jeu la recherche de nouveaux procédés de fabrication associant la maîtrise compositionnelle, dimensionnelle et temporelle de l'objet, de l'échelle 0D à 4D. De plus, l'introduction de méthodes issues d'autres disciplines scientifiques telles que par exemple la modélisation numérique pour la conception de molécules ou de matériaux performants de géométries et de dimensions contrôlées, permet d'explorer de nouveaux designs, depuis leurs conceptions *in silico* jusqu'à leurs applications.

A. La Chimie moléculaire : synthétiser les briques élémentaires de systèmes avancés

La chimie dite « moléculaire » est un domaine central de la chimie en jouant un rôle essentiel et moteur dans divers domaines scientifiques et technologiques. La synthèse à façon permet un ajustement précis des structures et propriétés électroniques dans des systèmes moléculaires discrets ou étendus. L'élaboration et l'étude des molécules isolées ou de leur assemblage sont par exemple au cœur de la biologie moléculaire, des matériaux moléculaires, de l'électronique moléculaire et des polymères. Elle a de nombreuses applications dans les domaines de l'environnement (dépollution, matériaux de construction durable...), l'énergie (stockage et conversion), la santé (conception de médicaments, diagnostic médical avancé,

développement de nouvelles thérapies) et la chimie industrielle. Le design et l'ingénierie des molécules, de leur architecture à leur structuration et leur assemblage supramoléculaire, nécessitent une approche intégrée combinant la **physico-chimie analytique** pour les caractériser, et la **chimie théorique**, elle-même en pleine évolution et fortement sollicitée pour la représentation de tous les aspects de la matière, pour prédire et comprendre leurs propriétés, *via* des outils de modélisation classiques et quantiques. On assiste à l'émergence d'approches de type **apprentissage machine** favorisées par la masse de données existantes, qui à terme permettront de réduire le temps d'obtention des analyses de nouvelles substances.

Dans le domaine de la chimie macromoléculaire (c.à.d. des polymères), les principales évolutions concernent l'accroissement du contrôle des architectures et l'introduction d'unités stimulables *via* notamment des réactions de polymérisation contrôlée, radicalaire, ionique ou par ouverture de cycle, ou la post-modification, l'extension à des monomères dits difficiles, grâce au développement de nouvelles méthodes de synthèse, de procédés de polymérisation et l'introduction d'approches bio-inspirées pour obtenir des architectures macromoléculaires particulières et des *polymères de précision*. Les matériaux polymères de types élastomères thermoplastiques, *réseaux adaptatifs covalents (CAN)* et *vitrimes* (une invention datant d'une dizaine d'années, qui plus est française) constituent aujourd'hui un domaine intense de recherche porteur d'innovations (voire potentiellement d'un futur prix Nobel).

La chimie de coordination et la chimie organométallique jouent également un rôle crucial dans le développement de nouvelles réactions chimiques, la conception de catalyseurs plus efficaces et sélectifs – mais aussi « écologiquement et économiquement responsables » – ainsi que dans la compréhension des mécanismes réactionnels. Par exemple, l'activation de liaisons C-H, C-C et l'activation de petites molécules (CO₂, N₂, etc.) sont des axes de recherche majeurs en catalyse.

Les matériaux moléculaires issus de l'association de briques moléculaires qui peuvent interagir *via* des interactions supramoléculaires (liaison hydrogène, liaison halogène, interactions π - π , etc.), covalentes ou de coordination – matériaux de type *Covalent Organic Framework (COF)* ou *Metal-Organic Framework (MOF)* – sont décrits par l'approche *bottom-up* et par la chimie supramoléculaire. Il est ainsi possible d'élaborer des objets multifonctionnels qui peuvent être commutables, mettant en œuvre au moins deux propriétés telles que l'optique et le magnétisme, l'optique et la mécanique, l'électricité et le magnétisme, etc...

Le défi actuel de la chimie moléculaire est aussi de faire la transition vers une chimie plus verte, moins coûteuse (remplacement des métaux nobles, recyclage des catalyseurs, températures moins élevées grâce à l'emploi de la photochimie), moins toxique (milieux aqueux ou chimie sans solvant) et biosourcée (c.à.d. à partir de briques élémentaires ou *synthons* d'origine non pétrochimique).

B. La Chimie des matériaux : des applications toujours plus variées, de l'énergie, le transport, les infrastructures et la santé

Les travaux de recherche et de valorisation des connaissances académiques en chimie des matériaux visent à synthétiser de nouveaux matériaux pour une économie circulaire respectueuse des ressources naturelles et de l'environnement (recyclages physique ou chimique, écoconception, etc.) et jouent ainsi un rôle majeur dans l'atteinte des **ODD** cités plus haut. Néanmoins, bien que de nombreux concepts soient clairement établis, la complexité des problèmes fait que nous sommes encore loin d'une maîtrise complète et de plus, dans un monde fortement industrialisé s'appuyant sur de nombreuses technologies, les besoins **en matériaux avancés** et dits « de fonction » sont de plus en plus prégnants.

Les enjeux sociétaux de la chimie de matériaux (au sens le plus large) pour les besoins en santé, les nécessités énergétiques et la protection de l'environnement obligent aujourd'hui à l'innovation afin d'améliorer les dispositifs de production et de stockage de l'énergie, mais aussi le développement de matériaux biosourcés dont l'impact environnemental est *a priori* plus limité. La chimie des matériaux est donc au cœur des **enjeux** actuels et futurs dans la demande énergétique, la santé et la protection de l'environnement, tout en s'assurant de l'innocuité des produits sur le marché, ce qui nécessite de concevoir des matériaux *safe by design* vis-à-vis de la santé humaine, et n'entraînant pas non plus de pollution du milieu environnemental, ce qui force à réfléchir à tout leur cycle de vie (*cradle to cradle*).

C. La Chimie Physique : analyse, caractérisation et transformation de la matière

Aux frontières de la chimie et de la physique, la chimie physique étudie la physique des systèmes chimiques. De la thermodynamique à la cinétique en passant par la description quantique des liaisons et des molécules, la chimie physique couvre un large spectre de sous-disciplines : chimie théorique, quantique, spectroscopie, thermodynamique, photo/électro/radiochimie, chimie analytique... Les principaux domaines d'études et d'applications concernent les interactions entre la matière et les rayonnements, au sens large (électricité, lumière...).

En particulier, la chimie analytique est indissociable et complémentaire de toutes les autres sous-disciplines de la chimie, comme les paragraphes suivants se proposent de le démontrer.

1. Les enjeux de la chimie analytique : Pousser plus loin les frontières de l'insondable

Pour l'analyse de composés à l'état de trace dans des matrices complexes, différents traitements de l'échantillon visent à épurer la matrice avant l'analyse pour réduire les perturbations affectant la réponse du détecteur. Des méthodes d'extraction spécifiques permettent ainsi de réaliser une préconcentration des analytes d'intérêt en amont du détecteur et d'abaisser de manière significative la limite de détection (**LOD**) de la méthode. D'autres approches ayant pour objectif d'améliorer la sensibilité s'attachent quant à elles, non plus à jouer sur la composition de l'échantillon, mais à proposer des solutions innovantes dans lesquelles les principes physiques de détection sont exploités de manière optimale, voire poussés à leurs limites. Ainsi l'utilisation de nanomatériaux dans les biocapteurs électrochimiques ou d'agents de polarisation (**DNP**) en Résonance Magnétique Nucléaire (**RMN**) ont-elles pour objectif commun de provoquer une exaltation significative du signal détecté.

Une autre approche consiste à utiliser des méthodes de détection permettant un grand multiplexage telles que la spectrométrie de masse. Le couplage, en ligne ou séquentiel, de plusieurs techniques analytiques permet également d'augmenter la résolution de l'analyse. En effet, la capacité de détection des analytes dans des échantillons complexes est démultipliée lors du couplage de la chromatographie bidimensionnelle, de la mobilité ionique et de la spectrométrie de masse. D'une façon générale, les approches ciblées ou non ciblées s'appuyant sur des balayages à très haute résolution ou sur des **approches multidimensionnelles, multi-techniques ou multi-omiques** génèrent des données de grand volume. On peut citer en exemple les images obtenues en imagerie. S'agissant de l'étude d'objets du patrimoine, l'approche multi-technique et interdisciplinaire dépassant même la chimie est essentielle. Se pose donc ouvertement la nécessité de disposer d'infrastructures permettant le stockage de ces données et le partage de celles-ci entre les collaborateurs.

Le **stockage des données** n'est pas le seul défi, leur traitement notamment multidimensionnel est aussi un défi. Celui-ci demande de plus en plus de puissance de calcul et des compétences statistiques particulières. Les instruments sont aujourd'hui si rapides que l'étape limitante est l'enregistrement et le stockage des données pendant l'acquisition. Le traitement statistique, l'apprentissage automatique, la représentation et la visualisation des données lorsqu'elles dépassent 3 dimensions devient aussi une gageure. Des solutions logicielles aidant ces traitements existent mais sont particulièrement onéreuses. Une piste pourrait être la mise en place de programmes pluridisciplinaires impliquant plusieurs Instituts du CNRS, visant à proposer de **nouvelles méthodes statistiques** et des **solutions logicielles libres**.

Dans le cadre du développement d'approches non ciblées, l'une des stratégies consiste à comparer les données obtenues sur différents instruments (expériences inter-laboratoires) ou à associer différentes techniques instrumentales. Ces expériences sont cependant considérablement freinées car menées sur des instruments le plus souvent différents, ne partageant pas le même format de fichier ou de dimensions différentes. Il est par conséquent nécessaire de travailler à la conversion de ces différents types de fichiers en un seul format commun et flexible, afin de **simplifier le traitement des données et les comparaisons inter-laboratoires**. Les acteurs de la chimie analytique sont en attente d'un format de fichier universel, afin d'accélérer et de simplifier la comparaison de données provenant de différents laboratoires, et de généraliser les approches multimodales, combinant plusieurs techniques expérimentales.

Quant à la **miniaturisation des systèmes analytiques et la microfluidique**, elles permettent l'analyse de faibles volumes d'échantillons, une faible perturbation des procédés lors des analyses en ligne (cas des **réactions chimiques réalisées en flux**) ainsi qu'une faible consommation de réactifs chers ou polluants.

Des microsystèmes d'analyse intégrés et portatifs (notamment des biocapteurs) sont également développés pour une analyse *in situ* dans des cas de diagnostic médical ou de contrôle qualité de procédés industriels.

2. Infrastructures analytiques nationales versus plateformes locales

Afin de travailler « aux frontières de la connaissance » en chimie, un atout de l'INC est la mise en place récente de grandes infrastructures nationales multidisciplinaires en réseau telles que la **fédération de recherche Infranalytics** (FR CNRS 2054) qui permet de regrouper et de mutualiser des instrumentations d'exception de spectroscopies RMN, RPE et FT-ICR-MS, méthodes incontournables en analyse chimique au service de la communauté scientifique académique et industrielle. Créée plus récemment, la **FR Spectroscopies de Photoémission** (FR SPE 2050) rattachée à la Section 14 a pour objectif de structurer la communauté scientifique autour de la photoémission et des spectroscopies connexes. A l'échelle nationale, on peut aussi citer METSA, une infrastructure de recherche distribuée de 9 plateformes du CNRS et du CEA qui met à la disposition de la communauté une expertise et des instruments uniques dans le domaine de la microscopie électronique et de sonde atomique. La visibilité internationale de ces plateformes est à la base de leur force. Concomitamment, les infrastructures ou les plateformes analytiques locales au sein des unités de l'INC – unités mixtes de recherche (**UMR**) et unités d'appui à la recherche (**UAR**) – sont le cœur de l'analyse chimique et du travail analytique quotidien des chimistes et doivent être maintenues à un niveau d'efficacité optimale à la hauteur de la Chimie française. Dans le secteur de la biologie – santé – agronomie, la structuration des plateformes pour l'obtention de la labellisation **IBISA** améliore la visibilité des instruments et des compétences techniques et scientifiques associées. Il faudra cependant porter attention à ce que le système n'évolue pas vers une rigidification associée à une monétarisation trop importante de l'utilisation des plateformes, afin que la créativité et la souplesse nécessaires à la recherche puissent encore y trouver leurs places.

Une question récurrente sur l'instrumentation concerne les équipements de caractérisation courante qui ne sont pas suffisamment innovants ou coûteux pour être financés par les diverses voies de financement de la recherche (Contrat de Projets Etat-Région (**CPER**), appels à projets régionaux tels que « SESAME » en Ile de France, etc.). Lors de l'enquête réalisée par l'INC en avril-mai 2019 durant la période de préparation de la Loi de Programmation de la Recherche (**LPR**), un point récurrent dans ces remontées des besoins des laboratoires concernait le financement d'achat et de la jouvence de ce type d'équipements, qui était auparavant finançable par les crédits dits « mi-lourds » du CNRS (150 à 600 k€) aujourd'hui disparus.

Le renouvellement d'appareils tels que, par exemple, des microscopes électroniques à balayage ou à transmission d'entrée de gamme ou bien des spectromètres RMN de routine sont compliqués à obtenir, ce qui handicape la recherche quotidienne sans laquelle les laboratoires ne peuvent travailler. Cette situation diffère selon les régions mais s'avère problématique pour certaines d'entre elles, et notamment en région parisienne, du fait d'une part, d'un nombre important de laboratoires de chimie analytique présents en Ile de France, et d'autre part, de la diminution des outils de financement permettant ces renouvellements (arrêt du DIM Analytics, diminution des financements SESAME, disparition de financements départementaux). Cette situation est inquiétante dans le contexte de la préservation de la compétitivité des laboratoires de l'INC au niveau international. Par ailleurs, il n'existe pas d'appels d'offre permettant le financement des coûts (élevés) de maintenance. Ceux-ci peuvent être financés en dédiant une partie du temps machine à la réalisation de prestations de service facturées ou en opérant des prélèvements sur ressources propres. Néanmoins, un équilibre doit être trouvé entre le temps consacré aux prestations de service, et celui dédié au développement des activités de recherche des unités. Ceci s'avère nécessaire afin que les ingénieurs plateforme consacrent au moins 75% de leur temps de travail à la recherche académique et non pour des prestations extérieures plus rémunératrices (ce qui n'est actuellement plus le cas sur certaines plateformes). Pour rappel, les instruments acquis par les fonds FEDER ne doivent pas être utilisés à plus de 20% de leur temps pour des prestations extérieures. De plus, les chercheurs et ingénieurs CNRS acceptent de moins en moins les prélèvements effectués par les tutelles sur les contrats qu'ils obtiennent. **Une meilleure visibilité et communication sur la manière dont sont utilisés ces fonds – de même qu'une certaine reconnaissance – s'avèrent indispensables pour que le seuil d'acceptabilité ne soit pas franchi.**

En conclusion, si les grandes infrastructures et réseaux nationaux sont des forces pour la visibilité de la chimie française, **il est primordial pour les laboratoires de l'INC de retrouver des sources de financement pour renouveler et entretenir les équipements scientifiques du quotidien.**

D. Chimie et interdisciplinarité : quelle place doit jouer la Chimie dans les consortiums multidisciplinaires ?

Deux des sections de chimie du **CoNRS** ont un deuxième institut de rattachement : l'**INP** pour la section 11, l'**INSB** pour la Section 16. L'**INC** est aussi institut secondaire pour plusieurs commissions interdisciplinaires : la **CID51** (théorie / modélisation) pilotée par l'**INSB**, la **CID52** (environnement / société) sous l'égide de l'**INEE**, la **CID54** (méthodes expérimentales pour le vivant) de l'**INP** et la nouvelle **CID55** (sciences et données) créée en 2021 prise en charge par l'**INS2I**. On note ainsi que l'**INC** ne pilote aucune CID, peut-être parce que la chimie fournit des objets moléculaires et des matériaux pour de nombreuses autres disciplines, mais qu'elle ne revendique pas la finalité et les applications ? La communauté des chimistes est certes impliquée dans d'innombrables projets interdisciplinaires, par exemple dans ceux financés par l'Agence Nationale de la Recherche (**ANR**), mais il faut veiller à ce que les synthèses et méthodes développées « sur mesures » et « à façon » par les chimistes ne soient pas utilisées par les collaborateurs comme s'il s'agissait de produits commerciaux. L'interdisciplinarité est vraiment enrichissante quand les chercheurs d'une discipline donnée s'intéressent aux motivations de leurs collègues venant d'autres horizons, et pas seulement pour être « à la mode » ou obtenir des financements. Les consortiums multidisciplinaires font apparaître parfois des questions déontologiques, par exemple le devenir d'échantillons originaux synthétisés par des chimistes au cours d'un projet, qui ont été discutées par le CSI lors de ses séances dédiées à l'éthique et la déontologie (voir plus loin).

On peut également souligner un exemple particulièrement fructueux d'interdisciplinarité dans le domaine du patrimoine. Les outils et concepts de la chimie, en particulier de la chimie physique, irriguent fortement le domaine de la recherche sur les objets du patrimoine. Les progrès fulgurants des outils ces dernières années pour rendre moins invasives les techniques d'analyse (spectrométrie de masse haute résolution, désorption-ionisation laser assistée par matrice (**MALDI**), imagerie en MALDI, accélérateur de particules New Aglaé...), et préserver les œuvres et objets particulièrement fragiles, font progresser les connaissances dans le domaine de l'art et du patrimoine historique sur les pratiques et techniques utilisées à l'époque de l'élaboration de ces objets.

II. Les défis de demain pour la Chimie française : quelles réponses peut-elle apporter aux enjeux sociétaux ?

A. L'énergie, les ressources, le climat, la santé et l'environnement

La chimie est encore trop souvent perçue à tort par le grand public uniquement comme un danger et une source de pollution, alors qu'elle détient au contraire des réponses possibles déterminantes dans la transition écologique rendue indispensable par la crise climatique. La nécessité absolue de sortir de l'ère des ressources fossiles, notamment pour remplacer la pétrochimie, y compris en utilisant le CO₂ lui-même comme brique élémentaire de molécules pharmaceutiques (acides aminés) ou de matériaux (carbonates), est devenue un enjeu mondial. Dans cette optique, les chimistes des laboratoires de l'**INC** travaillent déjà depuis de nombreuses années à trouver des ressources alternatives pour synthétiser les molécules et matériaux nécessaires à la vie courante et la santé des populations, mais aussi pour faire baisser les émissions des bâtiments et des transports, en particulier grâce aux matériaux composites alliant la légèreté et les performances, auxquelles s'ajoute aujourd'hui l'allègement des émissions de CO₂ telles qu'évaluées par les **analyses de cycles de vie (ACV)**. Ainsi, par les douze principes qu'elle s'est donnée, la **chimie verte** vise-t-elle à concevoir des molécules et matériaux par des réactions économes en atomes et en énergie, non polluantes, tout en prévoyant, dès le départ, les conditions de leur fin de vie et la possibilité de les recycler, si possible en boucle fermée, même si le recyclage (par exemple, des matériaux plastiques) ne constitue pas l'unique solution à la question des déchets et de la pollution, et que la question de limiter la production de produits manufacturés non durables est posée.

Pour répondre à la limitation de l'emploi des énergies fossiles, indispensable compte tenu des enjeux climatiques actuels, la chimie est une discipline clé à la fois pour la production de nouveaux vecteurs

énergétiques (l'hydrogène, biocarburants...) mais aussi pour la production et le stockage de l'électricité : conception de batteries pour le stockage de l'électricité et sa production grâce à des piles à combustible développement de l'électrolyse ou de la photocatalyse de l'eau pour la production d'hydrogène... Pour l'optimisation de ces procédés, il est nécessaire de concevoir de nouveaux matériaux d'électrode et de catalyseurs des réactions électrochimiques qui soient à la fois efficaces et abondants (remplacement des métaux rares par des nanoparticules de carbone par exemple). Les besoins énergétiques croissants de notre société et la nécessité de préserver l'environnement obligent les chimistes à s'engager dans le développement d'énergies renouvelables telles que le photovoltaïque, mais aussi à explorer de nouvelles voies telles que les piles basées sur une force osmotique ou un gradient de concentrations ioniques (« énergie bleue »).

3. Chimie et environnement : suivre la piste des espèces sentinelles pour traquer les polluants émergents

Les espèces dites sentinelles (abeilles, vers de terre, petits crustacés et mollusques aquatiques...) ont une capacité d'accumulation des contaminants qui est utilisée comme indicateur de la qualité de leur environnement. L'identification de traces et d'ultra-traces de polluants (molécules de pesticides ou leur métabolites, biomarqueurs, nanoplastiques, métaux lourds,...) par des techniques ultrasensibles (Py-GC/MS, fluorescence, etc.) à l'échelle d'individus, d'organes ou de microorganismes, permet d'étudier la biodisponibilité, la variabilité de l'impact de la pollution au sein d'une même espèce selon les individus ou de plusieurs espèces d'un même écosystème (d'où l'apparition de termes issus du champ des recherches environnementales comme « holobionte » ou « mésocosme » dans des projets interdisciplinaires). Les laboratoires d'écotoxicologie utilisent ainsi des espèces comme biocapteurs extrêmement sensibles, afin d'améliorer la compréhension des effets sur les êtres vivants de l'exposition à certaines substances chimiques ou « exposome chimique ». A l'origine du cycle de vie des substances incriminées, des laboratoires de l'INC travaillent aussi sur des produits de substitution à des produits de grande consommation posant des problèmes environnementaux : détection des substances perfluorées et polyfluoroalcanes (PFAS), synthèse de poly(hydroxy)uréthanes sans réactifs isocyanates (NIPU)...

4. Chimie à l'interface avec la biologie et la santé

La chimie joue un rôle essentiel dans de nombreux aspects de la recherche en biologie et santé, de la découverte de nouveaux médicaments à la compréhension des processus biologiques dans toute leur complexité. Dans ces domaines, la chimie théorique et notamment **l'analyse multi-échelle et la simulation, la biochimie structurale** ainsi que la **chémiobiologie** – qui vise à « concevoir et élaborer des outils moléculaires afin de sonder ou moduler un processus biologique » –¹ jouent des rôles essentiels dans la compréhension des interactions moléculaires et des mécanismes impliqués dans les systèmes biologiques. Concernant la **découverte de nouveaux médicaments**, la recherche en chimie pharmaceutique contribue au développement de composés chimiques bioactifs, utilisant la conception de ligands de cibles biologiques assistée par ordinateur (l'un des outils de la chémiobiologie), la chimie combinatoire et d'autres approches thérapeutiques innovantes. Ainsi, la découverte de médicaments ciblés spécifiques de certaines pathologies est en constante évolution. Dans ce domaine, la chimie hétérocyclique perd sa place prépondérante au profit d'une chimie de molécules plus complexes et de taille plus importantes, en particulier la chimie des peptides, protéines et acides nucléiques. Comprendre la relation structure-fonctions de ces biomacromolécules et étudier leurs interactions au sein des organismes vivants est essentiel pour le développement de nouvelles thérapies ciblées. Des avancées en biochimie structurale ainsi qu'en séquençage sont essentielles pour une compréhension des mécanismes biologiques et des processus pathologiques, allant jusqu'à la conception de traitements spécifiques et personnalisés. Les avancées en chimie organique permettent la synthèse de composés complexes, des produits naturels et des sondes moléculaires pour l'étude des processus biologiques.

¹ D'après www.gdr.chemobiologie.cnrs.fr

Ainsi, des médicaments de plus en plus spécifiques sont développés pour cibler sélectivement certaines cellules, cancéreuses notamment, tout en préservant les cellules saines. Certaines molécules associent aussi à une partie ciblage, une partie délivrance de médicaments. Cette approche réduit les effets secondaires indésirables en allant délivrer le médicament là où est le besoin. Dans ce cadre, nous pouvons citer le développement de nouveaux photosensibilisateurs, de nanoparticules *upconverting* pour la thérapie photodynamique (**PDT**). La conception de nanoplateformes à visée thérapeutique et diagnostique est actuellement en plein essor. Cette stratégie a pour but d'augmenter la biodisponibilité des molécules actives en les encapsulant dans des nanovecteurs à bases lipidiques ou polymères, décorés par des entités chimiques ou biologiques pour un ciblage cellulaire et l'imagerie médicale. De façon plus large, toutes ces approches visent à augmenter le pronostic vital des patients en réduisant les effets secondaires indésirables grâce à l'adressage cellulaire, et à permettre une visualisation et une exérèse plus aisée de microtumeurs. Il est important de souligner que tous les développements de ces **nanovecteurs théranostiques** ne sont possibles que grâce aux avancées en chimie et physicochimie des polymères (en particulier des propriétés d'autoassemblage) et de la matière molle en général.

La chimie est également importante dans le domaine de la toxicologie pour évaluer et atténuer les risques pour la santé associés à la pollution de l'air, de l'eau et des sols, ainsi qu'à l'exposition à des produits chimiques toxiques. Toujours dans le domaine de la santé, le développement des dispositifs analytiques vise aussi à mieux comprendre des processus biochimiques et biophysiques complexes. Dans un contexte de vieillissement de la population, de nouvelles méthodes de chimie analytique sont développées afin de déterminer des biomarqueurs et d'établir les diagnostics les plus précoces, rapides et non invasifs de maladies neurodégénératives ou de cancers. De même, des travaux de plus en plus nombreux développent des **méthodes multi-omiques associant génomique, transcriptomique, protéomique ou métabolomique** afin d'identifier de nouvelles cibles thérapeutiques, de développer de nouveaux médicaments plus ciblés, d'évaluer et d'atténuer les risques pour la santé des facteurs environnementaux, ou de suivre l'effet d'un traitement grâce à la détection de biomarqueurs sanguins.

Par ailleurs, un enjeu majeur pour lutter contre la résistance aux antimicrobiens est d'identifier et de caractériser les facteurs de résistance par l'analyse de protéines spécifiques de bactéries, de virus ou de champignons (et leurs interactions), notamment par spectrométrie de masse, spectroscopie RMN ou cryo-EM, qui induisent progressivement un changement du positionnement de la cristallographie par diffraction des rayons X. L'évolution vers l'étude et la caractérisation d'édifices à très haut poids moléculaire (complexes protéines-protéines, protéines-acides nucléiques, quadruplexes d'ADN, multimères protéines-ligands) par microscopie électronique haute résolution et/ou spectroscopie RMN du solide (HR-MAS) est également au cœur de cette problématique. Dans un autre domaine qu'est celui de la biophysique, l'analyse de molécules *in cellulo* qui consiste à détecter des molécules uniques dans une cellule par des techniques de pointe de microscopie avec une résolution jusqu'à 10 à 50 nm (ou 250 nm en imagerie Raman) offre des modalités analytiques puissantes pour la compréhension des processus biochimiques et physiques impliqués dans l'organisation du vivant.

Le développement de la médecine personnalisée est aussi un nouvel enjeu interdisciplinaire. Ainsi, des modèles cellulaires ou de drosophiles, avatar d'un patient, permettent à présent de tester des traitements ou des médicaments et de choisir rapidement le plus adapté. De même, l'analyse séquentielle de liquides biologiques d'un patient en overdose de divers médicaments, permet de détecter les composés qui ne se métabolisent pas et de choisir le traitement adapté. Tous ces travaux demandent des compétences à la fois en chimie analytique et en synthèse (macro)moléculaire, mais aussi dans les domaines de la biologie et de l'instrumentation, ainsi que dans le développement de logiciels et de bases de données adaptés.

Ainsi la chimie continue-t-elle de jouer un rôle crucial dans l'amélioration de la santé humaine, en contribuant à la **compréhension des mécanismes biologiques liés aux maladies, à la découverte de nouveaux médicaments et au développement de diagnostics avancés**. Les perspectives dans ce domaine restent prometteuses, avec un accent croissant sur l'utilisation de technologies novatrices pour relever les défis de la santé et la personnalisation des traitements.

B. Quelles tendances récentes semblent-elles structurer la recherche en chimie pour les prochaines années ?

D'autres défis se présentent aux chimistes, qui peuvent sembler plus éloignés des grands besoins de la société précédemment décrits (énergie, ressources, environnement, santé), mais qui n'en restent pas moins actuels et marqueront profondément l'évolution de la recherche en chimie d'ici la fin de la décennie.

5. Chimie en flux à haut débit, données (*big data*) et intelligence artificielle (IA)

Au cœur des transitions et des tensions sur les ressources, les enjeux de durabilité, d'allègement et de recyclabilité lors de la synthèse de nouvelles molécules ou la création de nouveaux matériaux, poussent à accélérer la découverte de systèmes plus performants en diminuant l'apport de constituants toxiques ou critiques. Face à ces défis, l'IA offre une approche efficace et des outils visant à explorer les combinaisons infinies de **synthons** (c.à.d. les briques élémentaires de réactions) qui soient **plus durables, circulaires et à faible impact environnemental, pour aboutir à la génération de matériaux multifonctionnels optimisés**. Probablement accélérées grâce aux outils de l'IA, ces études permettent d'imaginer les matériaux de demain répondant aux grandes transitions précédemment citées (énergie, environnement, numérique et santé). L'un des enjeux ici est de prédire par le calcul de nouveaux matériaux et molécules qui soient **safe by design**, aux **propriétés sur mesure, modulables**, notamment des matériaux architecturés, multi-échelles et des assemblages supramoléculaires, et ainsi de déployer des bases de données spécifiques et les outils nécessaires à leur exploitation. Pour aller plus loin, et modéliser les molécules ou matériaux *in operando* dans leur environnement de travail, il est indispensable de connecter les différentes échelles de leur caractérisation à leurs propriétés d'usage. Pour ce faire, l'enjeu est de développer une connaissance statistiquement consolidée des relations composition-propriétés ou structures-fonctions, en déployant des outils spécifiques pour la recherche haut-débit en synthèse moléculaire et science des matériaux : synthèse, procédés de fabrication et caractérisation des propriétés structurales, chimiques et physiques. Ainsi le calcul de structures virtuelles réalistes pour l'application visée constitue-t-il une étape clé de la conception de systèmes moléculaires et de matériaux à hautes performances. De même, l'amélioration de la robustesse des procédés de fabrication des objets grâce une assistance par l'IA de la conduite de plans d'expérience, tendra vers la génération de matériaux plus fiables et donc aussi plus durables.

La génération d'un grand nombre de données sous différentes formes numériques (graphes, tables, images...) est habituelle dans tous les domaines de la chimie quelle que soit la sous-discipline. Pour optimiser un procédé chimique, cibler un (nano)composé ou mettre sa production à l'échelle, l'utilisation de la **microfluidique** automatisée opérant à hauts débits et couplée à des techniques de détection (hors ligne ou en ligne), capables de générer rapidement un grand nombre de données est devenue une routine. Grâce aux algorithmes d'IA, il sera possible de classer et réduire ces données afin d'en extraire les paramètres clés ou d'élaborer des modèles. Ces modèles pourraient accélérer nos connaissances sur le lien structure-propriétés et fonctions des molécules ou des nanostructures existantes, et moyennant cet apprentissage machine des algorithmes d'IA, d'en prédire de nouvelles.

Dans le domaine de la chimie bio-analytique, l'IA devrait permettre de réduire considérablement le nombre d'échantillons biologiques nécessaires (et ainsi les coûts occasionnés) en créant des jeux de données virtuelles à partir de données réelles. Cela permettra, après apprentissage profond sur un jeu de données réelles, de classer des échantillons inconnus ou d'améliorer le diagnostic d'une maladie. De même, grâce à des bases de données gratuites et accessibles à tous, que les chercheurs académiques ont, depuis des années, contribué à construire, il deviendra possible à ceux qui disposent des moyens financiers et des capacités de calcul, d'obtenir toutes sortes d'informations grâce à l'IA. Les données produites deviennent donc un enjeu majeur et essentiel, et **il est indispensable qu'une réflexion soit menée sur l'accessibilité des données produites par le CNRS et par la recherche académique dans son ensemble**,² qui coûtent très cher à produire et peuvent servir des intérêts privés à contre-courant d'un développement des connaissances au service de la population et de la société.

² Il faut aller plus loin que l'antienne des données « aussi ouvertes que possible, aussi fermées que nécessaire » !

6. Chimie des matériaux en conditions extrêmes

Le besoin continu de repousser leurs limites de fonctionnement, fait de l'étude du comportement des matériaux en conditions extrêmes, au-delà des limites conventionnelles, un passage obligé pour leur développement futur. Ainsi l'étude de ces matériaux dans des conditions extrêmes de pression, température, irradiation ou encore réactifs gazeux ou liquides, parfois hautement corrosifs, oxydants..., ainsi que leur comportement sous sollicitations thermiques, chimiques, mécaniques, électriques... de plus en plus souvent couplées, est de première importance pour de nombreux secteurs d'application.

L'élaboration et la mise en forme, le contrôle pointu de leurs propriétés en condition d'usage ou *in operando*, leur durabilité sous conditions sévères, présentent de nombreux verrous qui restent encore à lever. C'est d'ailleurs un enjeu majeur pour les industries de la chimie, de l'énergie, des transports, du nucléaire, de l'espace, de la transformation des matériaux ou de la valorisation des déchets qui couplent ou associent des métaux, alliages, ciments, verres, céramiques, carbones, composites pour donner une valeur ajoutée à leurs produits. La maîtrise de la composition et de la microstructure de ces matériaux est fondamentale, et leur conception nécessite une **connaissance approfondie de l'ensemble des phénomènes multi-physiques et chimiques mis en jeu et de leurs couplages**.

Un autre enjeu est également l'évaluation spatiotemporelle des propriétés et phénomènes en jeu dans les matériaux avancés. Ceux-ci peuvent être synthétisés par des approches très variées associant les échelles macro-, micro- et nanoscopiques comme les méthodes de coulage ou de moulage, la fabrication additive, les procédés de déformation, électrochimiques, les dépôts physiques et chimiques, les traitements thermiques, etc. Pour une grande part, leurs caractéristiques physicochimiques dépendent des moyens d'élaboration qui ont été utilisés, il est donc essentiel de coupler leur conception et leur développement à celui des procédés. Les applications de ces matériaux concernent de nombreux secteurs d'activité : l'automobile, l'aéronautique, le spatial, le ferroviaire, la défense, l'énergie mais aussi la cosmétique, le luxe, le médical etc. Les phénomènes chimiques et biochimiques qui sont à l'œuvre dans le cas de conditions extrêmes (haute ou basse température, pression, hygrométrie, pH, radiations, etc.) peuvent être explorés par analyse chimique, évalués et extrapolés grâce à des modèles mathématiques. Là encore, des compétences variées sont nécessaires afin de mettre en œuvre ces études et d'en extraire le maximum d'informations.

7. « Science Ouverte » et évolution des pratiques de publications des chimistes

Le CSI constate que les chimistes se sont plutôt bien approprié les nouvelles formes de publications scientifiques. Plus précisément, la direction des données ouvertes de la recherche (DDOR) du CNRS a observé depuis 2018 une augmentation globale des frais de publication ou *Article Processing Charges (APC)* au CNRS et en particulier + 58 % pour la chimie. Cette augmentation est d'autant plus marquée chez certains éditeurs (+ 88% chez MDPI ou + 216 % chez Wiley). Se pose ainsi l'intérêt de publier en Open Access (OA). **Depuis 2022, le CNRS encourage ses scientifiques à ne plus payer pour être publiés**. En effet en 2020, 73,5% des publications en chimie sont en OA et 26,2% dans une revue sous abonnement. La mise en place d'une chargée de mission sur le thème a notamment abouti à l'élaboration – en collaboration avec le CSI – d'une fiche synthétique intitulée « Publier un article en Chimie dans un monde de Science Ouverte » donnant des recommandations aux chercheurs.³ L'autoarchivage par dépôt des versions *preprints* de nos productions scientifiques en archives ouvertes telles que HAL-CNRS est fortement recommandé et même nécessaire pour le compte rendu annuel d'activité (CRAC) des chercheurs. Le *Directory of Open Access Journals (DOAJ)* est une base de données bibliographiques qui recense les périodiques scientifiques en ligne qui correspondent à des critères de qualité et de libre accès : articles en texte intégral ; articles en libre accès ; articles dont la qualité est contrôlée. Elle permet aux chercheurs de mettre en application les recommandations du CNRS à savoir : choisir sa revue au regard d'indicateurs de qualité, favoriser la biblio-diversité, éviter les revues prédatrices et rester vigilant vis-à-vis des « méga-revues » c'est-à-dire celles qui n'ont pas de discipline définie. **Le CNRS – mais aussi le CSI dans sa recommandation du 21 mai 2019 – mettent en garde contre les revues hybrides induisant un double paiement** (à la fois des APC et d'un abonnement pour les établissements).⁴

³ [Fiche Science Ouverte INC 2023 VF-1.pdf \(cnrs-orleans.fr\)](https://www.csi.fr/ressources/fiche-science-ouverte-inc-2023-vf-1.pdf)

⁴ [https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/INC/Recommandation.CSINC.pdf\(21/5/19\)](https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/INC/Recommandation.CSINC.pdf(21/5/19))

La stratégie de non-cession des droits ou *Rights Retention Strategy* (**SNCD**) permet de ne pas céder exclusivement les droits d'auteurs aux éditeurs et de maîtriser la diffusion des manuscrits. C'est également un autre moyen, en plus de la publication en accès ouvert, de rendre disponible immédiatement ses travaux sans embargo. Cette méthode gratuite consiste à apposer une licence *Creative Commons* notée **CC-BY** et un logo associé sur les différentes versions d'un manuscrit dès sa soumission. « À des fins de libre accès, une licence CC-BY a été appliquée par les auteurs au présent document et le sera à toute version ultérieure jusqu'au manuscrit auteur accepté pour publication, résultant de cette soumission. » L'éditeur est ainsi informé. Une fois le processus de publication terminé, il est possible de déposer le manuscrit auteur autorisé dans l'archive HAL et de le rendre immédiatement disponible.

Si la pratique peut rebuter certains, un bon moyen est de déposer son manuscrit avant soumission à un journal sur une archive internationale telle que – selon le domaine – ChemRxiv en chimie, ArXiv en matière condensée ou science des matériaux ou BioRxiv pour l'interface chimie-biologie, puis ensuite de l'importer automatiquement dans HAL. Une fois l'article accepté, il ne reste plus qu'à ajouter le DOI définitif dans les métadonnées, celui du *preprint* restant toujours apparent.⁵ L'avantage de procéder ainsi au dépôt *via* une archive de *preprints* est ainsi d'apposer automatiquement la licence CC-BY requise par les tutelles (dont le CNRS) et les agences de financement comme l'ANR.

8. Formation par la Recherche des nouvelles générations de chimistes

La formation par la recherche est un élément clé dans la formation des futurs chercheurs et le devenir de l'innovation et la recherche. En ce qui concerne la chimie, il a paru important au CSI d'étudier cette question à travers deux sessions plénières aux cours desquelles des directeurs d'écoles doctorales de sciences chimiques (**EDSC**) ont été invités, ainsi que par la création d'un groupe de travail (**GT**) dédié afin d'analyser la formation des docteurs en chimie et leur devenir. L'objectif de ce GT était, d'une part d'établir un état des lieux concernant la formation doctorale des doctorants en chimie et d'évaluer l'impact de la pandémie sur leur travail, d'autre part d'estimer l'insertion professionnelle des docteurs chimistes.

Les résultats des différentes enquêtes sont souvent déclinés par établissement et ne distinguent pas forcément les domaines scientifiques. Très peu d'études nationales ne considèrent que les docteurs en chimie. Nous nous sommes appliqués à extraire les résultats concernant particulièrement les EDSC. Les références utilisées concernent la situation au 1^{er} janvier 2020 des docteurs 2019 (n+1), 2017 (n+2) et 2015 (n+5) de Toulouse, et au 1^{er} décembre 2019 des docteurs 2016 de Lyon (n+3).^{6,7}

Sur les différentes promotions réunies, **46,1% des docteur(e)s diplômé(e)s en chimie sont des femmes**. Trois docteurs sur dix sont de nationalité étrangère (29,9%). L'âge moyen des docteurs lors de leur soutenance s'élève à 30,8 ans. Si plusieurs types de diplômes permettent d'accéder à la formation doctorale, la majorité des répondants étaient titulaires d'un master, DEA ou DESS (54,6%) ou d'un diplôme d'ingénieur (28,4%) lors de leur entrée en thèse. Le mode de financement du doctorat est essentiel et différents types de financement peuvent être envisagés, qui sont plus ou moins en lien avec l'activité de recherche menée dans la thèse. D'après les résultats des enquêtes, les fonds publics français représentent plus de la moitié de ces financements (55% répartis à parts égales entre les contrats doctoraux d'établissement et ANR, suivis (à hauteur de 16,8%) par les conventions industrielles de formation à la recherche (**CIFRE**) et, pour 11,3%, les financements internationaux tels que ceux de l'Union Européenne (notamment *via* les réseaux *Innovative Training Networks* (**ITN**) ou d'organismes étrangers comme ceux du *China Scientific Council* (**CSC**). **La durée médiane de la thèse en chimie est de 3,1 ans et la moyenne de 3,2 ans. 10,1% des répondants ont réalisé leur thèse en cotutelle et 30% ont réalisé une mobilité internationale durant leur doctorat.**

⁵ Voir comme exemple ce dépôt : <https://cnrs.hal.science/hal-03841722>

⁶ M. Jaoul-Grammare, S. Macaire, [Étudier le devenir professionnel des docteurs. Groupe de travail sur l'enseignement supérieur](#), Céreq Echanges, n° 2, décembre 2016

⁷ O. Wolber, P. Zedam [Devenir des docteurs trois ans après : les indicateurs par discipline](#), Note d'information SIES, n° 17.10, décembre 2017

-Situation de docteurs en chimie et sciences chimiques après la thèse

57% des docteurs sont en emploi 1 an après leur diplôme, 81% après 3 ans et 92% après 5 ans. Pour comparaison, le taux d'emploi des diplômés de master après 3 ans est de 88% et celui des diplômés d'écoles d'ingénieurs de 95% sur la même période. **Seuls 33% des docteurs en chimie ont un emploi stable après 1 an, 62% après 3 ans et 60% après 5 ans. La durée médiane de recherche du premier emploi est de 6 mois.** La majorité des docteurs ont utilisé leur réseau professionnel (28%) ou les réseaux sociaux (28%) pour obtenir leur emploi. Les docteurs en chimie sont caractérisés par un faible taux d'emploi et d'importantes périodes de chômage tout au long de leur parcours (9,1 mois passés au chômage dans les 3 années suivant l'obtention de la thèse).

Sans trop de surprise, quelle que soit l'année de leur soutenance, les docteurs en emploi occupent très majoritairement un poste de cadre (plus de 93% à 1 et 3 ans après la thèse). Plus d'un docteur sur deux en emploi travaille dans le secteur public (62,5%) 1 an après leur diplôme. Ce pourcentage chute à 46%, 3 ans après la thèse et à 40,5%, 5 ans après ; l'autre partie est employée par le secteur privé. Une partie des répondants en emploi ont créé leur entreprise. Ils représentent en moyenne 4% de l'ensemble des docteurs. **Les docteurs en chimie travaillent principalement dans le domaine de l'enseignement, de la recherche et du développement (plus de 41%).** Le salaire médian des docteurs en emploi est de 2126€ après un an, 2333€ après trois ans et 2459€ cinq ans après leur diplôme. Les docteurs en emploi ayant répondu aux différentes enquêtes se disent très majoritairement satisfaits par leur situation professionnelle. Le développement des compétences et des connaissances et l'ouverture qu'apportent leurs activités sont les deux critères les mieux notés. Les critères les moins appréciés sont le niveau de rémunération et les perspectives d'évolution ou les opportunités.

En chimie, étonnamment par rapport aux autres disciplines, on observe une excellente parité homme-femmes (discipline la plus paritaire) et des **situations d'emploi relativement similaires entre les hommes et les femmes**. 80% des femmes ayant un diplôme de doctorat ont un emploi à 3 ans (dont 68,7% un emploi stable). Les femmes sont cependant moins nombreuses à travailler dans le secteur public (38,1% après 3 ans contre 46% pour les hommes). Le salaire moyen après 3 ou 5 ans est quasiment identique pour les hommes et pour les femmes, mais la différence s'accroît d'autant plus qu'on avance dans la carrière avec des salaires moindres pour les femmes.

Si le doctorat peut constituer un rempart contre le chômage, l'accès à l'emploi stable peut être long et le niveau de rémunération faible. En effet, les données relatives à l'emploi des docteurs témoignent de façon récurrente de leurs difficultés d'accès à un emploi stable. Cela peut s'expliquer en partie par le manque de postes dans la recherche publique pour les jeunes docteurs qui envisagent une carrière académique et doivent « enchaîner » les contrats postdoctoraux. D'autre part, les acteurs du secteur privé ont toujours des réticences à embaucher des docteurs (image du docteur spécialisé dans un domaine de recherche très pointu, présumé de la non-adaptabilité du docteur à différents profils dans l'entreprise, recrutements par l'entreprise de profils identiques à celui des managers, le plus souvent issus de grandes écoles ou d'écoles d'ingénieurs...) et ce, malgré les efforts du Ministère initiés depuis 2014 avec un travail d'évolution réglementaire sur le doctorat. En effet, la loi relative à l'enseignement supérieur et la recherche (ESR) de 2013 stipule que l'insertion des docteurs doit être facilitée dans le secteur privé par la reconnaissance du doctorat dans les conventions collectives, en application des dispositions de son article 82 qui précise que le doctorat est une expérience professionnelle de recherche. Bien que les textes relatifs à la formation doctorale aient été révisés afin de garantir aux doctorants une formation de très haut niveau, une meilleure reconnaissance nationale et internationale de leur diplôme, une insertion professionnelle dans le domaine académique et dans le secteur privé ainsi qu'une amélioration de sa prise en charge, le doctorat n'est pas toujours synonyme d'accès facilité à l'emploi.

Plus récemment, une enquête parue en janvier 2022 a été faite par le réseau national des collègues doctoraux (RNCD), auprès des doctorantes et des doctorants inscrits en doctorat en 2021 et de leurs encadrantes et encadrants.⁸ Cette enquête part du constat que la France est en recul concernant la part des docteurs dans la population âgée de 25 à 34 ans, à 0,6% pour une moyenne des pays de l'OCDE de 0,9%, et 0,9 % pour l'Allemagne, 1,2% pour le Royaume Uni ou 1,5% pour les USA. L'ensemble de données de

⁸ S. Pommier, M. Talby, M. Auffray-Seguet, M. Dalaut, H. Eijsberg, P. Elshawish, H. Muller, [Le doctorat en France Regards croisés sur la formation doctorale - hal-03494721](#)

cette enquête est global sur toutes les disciplines, mais la chimie ne semble pas faire exception. Il serait souhaitable de pouvoir analyser spécifiquement la situation des doctorants en chimie au regard des particularités de notre discipline, à la fois une science et une industrie, et dont la recherche est basée principalement sur l'expérimentation. Créé en 2009, le réseau des écoles doctorales en sciences chimiques (**REDOX**) pourrait peut-être avoir la capacité de mener une telle enquête.⁹

Impact de la crise COVID sur les doctorants

La période 2019-2023 a été caractérisée par la crise sanitaire de 2020 à 2022.¹⁰ Les modifications brutales des conditions de travail et d'apprentissage ont nécessairement entraîné des répercussions importantes sur tous les acteurs de la recherche et en particulier sur les doctorants avec un nombre de soutenances de thèses en 2020 en forte diminution. En 2021, on retrouve un niveau proche des années précédentes avec 13590 diplômes de docteurs délivrés mais pas le rattrapage escompté par rapport à 2020, ce qui suggère un nombre d'abandons de thèse en augmentation.

Les écoles doctorales ont été mobilisées afin d'assurer des prolongements de contrats de thèse pour tous les étudiants financés par le ministère de la recherche (contrats d'établissement ou projets ANR...). Par ailleurs, les services de médecine universitaires ont été sollicités pour le suivi psychologique des étudiants et donc aussi des doctorants. L'organisation des laboratoires a également permis lors de la reprise d'activité dès juin 2020, une priorisation des activités expérimentales des doctorants.

Toutefois, nous pensons qu'une analyse de la cohorte des étudiants ayant démarré leur thèse en 2019 sera nécessaire. Sans avoir de chiffres, les abandons de thèse en 2022 et 2023 semblent plus nombreux que durant les années précédentes. Il serait important de pouvoir analyser ces périodes précisément afin de déterminer les conséquences de la crise sanitaire mais aussi les changements de comportement que cela a pu induire. L'ensemble de la société a connu après la crise COVID une grande réflexion sur le travail et sur la répartition temps de travail – temps personnel. Le sens donné au travail et l'investissement dans le travail ont été questionnés, y compris par les personnels de recherche, comme en témoigne l'enquête effectuée fin 2020 sur les risques psychosociaux (**RPS**) au CNRS.¹¹

Evolution de la recherche pour les doctorants

Les évolutions du monde de la recherche avec un financement à l'heure actuelle exclusivement sur projet, voire sur contrat industriel, posent un certain nombre de questions quant à la formation par la recherche de nos doctorants, en particulier dans le domaine de la chimie. En effet, les objectifs fixés par les projets (ANR, Europe ou autres) obligent à orienter le travail sur l'obtention de résultats « coûte que coûte » afin de satisfaire les exigences des financeurs. Dans un cadre entrepreneurial, ce système de développement sur objectif est parfaitement intégré. En revanche dans le domaine de la recherche où justement le résultat n'est pas garanti et les chemins qui y mènent ne sont pas toujours prévisibles, ce mode exclusif de fonctionnement peut s'avérer néfaste. Notamment dans le cadre du doctorat où le volet de formation par la recherche est essentiel pour former les chercheurs de demain, associer systématiquement cette formation à l'obtention de résultats au détriment d'une progression intellectuelle et scientifique ouverte peut constituer un frein, ou tout au moins une source de frustration, pour les doctorants. L'acceptation du doute scientifique et des échecs expérimentaux deviennent beaucoup plus difficiles à transmettre à un jeune doctorant tant la pression du résultat est forte.

Le sentiment d'échec ressenti par les doctorants face aux expériences qui ne donnent pas le résultat attendu, est un exemple de formatage imposé par le mode projets où la thèse n'est vue que sur le plan du résultat final sans intégrer la construction de la pensée, à la base de la méthodologie scientifique. Le

⁹ <https://docteurs-chimie.org/redox>

¹⁰ [Dossier de presse du Ministère sur la rentrée étudiante de septembre 2022](#)

¹¹ « [Les professionnels RH du CNRS accompagnent les agents pendant la période impactée par le COVID](#) » voir aussi le rapport de l'enquête « [Diagnostic qualitatif des risques psychosociaux pour les chercheurs du CNRS](#) »

questionnement n'est pas une simple curiosité intellectuelle, mais l'essence même de la recherche, et la pratique de la recherche par les jeunes que nous formons aujourd'hui est en train d'évoluer.

La recommandation à la suite de notre travail et nos réflexions est donc de **limiter au maximum les thèses sur projet contractuel afin d'ouvrir le champ scientifique et la créativité**. Par sa construction et son objectif de résultats, un projet ne favorise pas la recherche fondamentale basée sur l'avancée des connaissances *via* l'exploration de chemins de traverse, d'idées nouvelles et risquées – et donc intrinsèquement incertaines. L'influence du « mode projet » / contrat pour les doctorants va bien au-delà de leur travail et modifie les rapports hiérarchiques entre l'encadrant et le doctorant, induisant un rapport entrepreneurial qui se substitue au rapport formateur / étudiant, caractéristique du monde universitaire.

Bilan du GT Devenir des Docteurs

Les perspectives annoncées par les chiffres d'inscription en doctorat sont inquiétantes : **-8% de baisse des inscriptions en doctorat en chimie pour 2023 et -2,4% (entre 2020 et 2021) de lycéens choisissant la spécialité physique-chimie.**¹² Les causes peuvent être multiples (reprise économique, ère « post-Covid »...) mais si la tendance se confirme, une remise en question des conditions pour attirer les jeunes vers la science en général et la chimie en particulier sera nécessaire, notamment du fait du désintérêt des jeunes pour les sciences qui commence à s'exprimer dès le lycée.^{13,14}

Cette question de diminution des effectifs des doctorants, en chimie particulièrement, doit être abordée selon différents angles car les explications qui conduisent à cette diminution sont multiples. Le fait que la chimie soit, parmi les disciplines scientifiques, une science basée sur l'expérience constitue un élément déterminant. En effet, les sciences expérimentales sont globalement peu valorisées et les étudiants choisissent moins ces disciplines. La biologie semble faire exception en raison de son lien fort avec la médecine et l'environnement.

La baisse du nombre d'étudiants en licence de chimie provoquera donc une poursuite de la baisse des doctorants dans la discipline. Les choix dans l'enseignement secondaire influent sur les poursuites dans le supérieur avec aussi des facteurs aggravant comme la valorisation du doctorat par rapport au master qui ne se traduit pas dans les rémunérations des jeunes embauchés. La thèse n'offre plus de plus-value pour l'insertion professionnelle, à la fois en termes de salaire mais aussi de travail. La thèse est devenue un contrat à durée déterminée dans lequel le plaisir de la découverte, de la pratique de la recherche n'est plus central comparé aux objectifs à atteindre fixés pour mener à bien le projet. La thèse ne fait plus rêver, et l'obtention du doctorat n'est plus un aboutissement personnel.

L'introduction dans l'enseignement secondaire d'un véritable éveil aux sciences et à la chimie en particulier est nécessaire notamment au regard des enjeux actuels sur le climat et l'environnement où la chimie doit avoir toute la place que la société devrait lui accorder pour les affronter et permettre l'amélioration – ou du moins le maintien – de bonnes conditions de vie à la population.

Etude statistique des contrats doctoraux alloués par les écoles doctorales en chimie

En sus des réflexions menées par le GT présentées précédemment, le CSI a aussi examiné la question du nombre de contrats doctoraux alloués par les établissements (anciennement appelés « bourses ministérielles ») en fonction des écoles doctorales de sciences chimiques (**EDSC**) sur le territoire. Pour les universités ne disposant pas d'une EDSC explicite, on a considéré plus généralement l'école doctorale à laquelle pouvaient être affiliés les chercheurs des laboratoires de l'INC (« science des matériaux », « toxicologie »...), compte tenu du fait que les encadrants de thèse titulaires de l'habilitation à diriger les recherches (**HDR**) ne peuvent être rattachés qu'à une seule école doctorale.

¹² <https://www.education.gouv.fr/reperes-et-references-statistiques-2022-326939>

¹³ <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/baisse-du-nombre-de-premieres-inscriptions-en-doctorat-en-2022-en-particulier-dans-les-domaines-91897>

¹⁴ Baudry M., « [Projections des effectifs dans l'enseignement supérieur pour les rentrées de 2022 à 2031](#) », Note d'information SIES, n° 23.04, avril 2023

Tableau 2 : Statistiques nationales sur les allocations doctorales de chimie (Sources : rapports du Hcéres des ED)

ED n°	Intitulé	Etablissement(s)	*Nbre total chercheurs	Nombre de doctorants	Nbre de thèses soutenues /an	Nbre de HDR	Contrats doctoraux (CD)/an	HDR/ CD	HDR/ Thèse
40	Sciences Chimiques de Bordeaux	Univ. Bordeaux	366	295	92	215	14	15	2.3
182	Physique et Chimie Physique	Univ. Strasbourg et Univ. Haute-Alsace (Mulhouse)	-	220	60	220	20	11	3.7
206	Chimie, procédés, environnement	Univ. Lyon Claude Bernard / ENS Lyon et INSA Lyon	350	350	73	200	15	13	2.7
218	Chimie et Sciences du Vivant	Univ. Grenoble-Alpes, CEA et Grenoble INP	500	330	80	380	32	12	4.8
222	Sciences Chimiques de Strasbourg	Univ. Strasbourg et Univ. Haute-Alsace (Mulhouse)	295	280	70	183	20	9	2.6
250	Sciences Chimiques de Marseille	Aix-Marseille Université	168	90	30	98	8	12	3.3
388	Chimie Physique et Chimie Analytique de Paris Centre	Paris Sciences & Lettres / IFPEN / Sorbonne Univ / Univ. Paris Cité	-	280	80	228	23	10	2.9
397	Physique et Chimie des Matériaux	Sorbonne Univ / Paris Sciences & Lettres	243	239	80	163	20.5	8	2.0
406	Chimie Moléculaire de Paris Centre	Sorbonne Univ / Paris Sciences & Lettres	112	115	30	68	10	7	2.3
459	Sciences Chimiques Balard	Univ. Montpellier	334	244	85	200	17	12	2.4
482	Sciences de la Matière	Univ. Paul Sabatier, INP & INSA Toulouse	489	350	94	328	28	12	3.5
508	Ecole Doctorale Normande de Chimie	Univ. Rouen, Caen et Le Havre	140	111	35	93	-	-	2.7
549	Santé, Sciences biologiques et chimie du vivant	Pôle Univ. Centre Val de Loire (Orléans-Tours)	475	270	65	325	34	10	5.0
563	Médicament, Toxicologie, Chimie, Imagerie	Univ. Paris Cité	453	200	50	283	15	19	5.7

571	Sciences Chimiques: Molécules, Matériaux, Instrumentation et Biosystèmes (2MIB)	Univ. Paris Saclay	478	299	75	310	24	13	4.1
596	Matière, Molécules, Matériaux (3M) Bretagne(-Loire)	Univ. du Mans, de Brest, de Rennes, d'Angers et Nantes Université		405	121	444	32	14	3.7
606	Chimie Mécanique Matériaux Physique (C2MP)	Univ. Lorraine, CentraleSupélec	439	320	80	238	14	17	3.0
609	Sciences et Ingénierie des Matériaux, Mécanique, Énergétique	Univ. confédérale Léonard de Vinci (Poitiers, Limoges), ISAE-ENSMA	350	300	-	200	-	-	-
ED n°	Moyenne	Etablissement(s)	346	261	71	232	20	12	3

*quand l'information n'était pas dans le rapport Hcéres, nombre de chercheurs des labos de l'INC dans [l'annuaire du CNRS](#).

Depuis la loi relative aux libertés et responsabilités des universités (**LRU**) de 2007, les supports des contrats doctoraux (**CD**) ne sont plus alloués par le Ministère (bourses de thèse « ministérielles ») mais par les établissements, qui sont donc responsables du nombre de CD et de leur mode de répartition entre leurs écoles doctorales. A leur tour les ED ont la liberté soit d'organiser un concours « au mérite » entre les titulaires de masters dans leur discipline, généralement ouvert aux étudiants de l'extérieur, soit d'instaurer un roulement entre les laboratoires qui leur sont rattachés. Les ED fixent alors des règles afin d'assurer une répartition homogène entre les laboratoires, consacrant aussi un nombre donné de CD aux « jeunes HDR » et pour des sujets interdisciplinaires (communs avec une autre ED ou un autre collège de l'établissement). S'agissant de la chimie, le tableau montre néanmoins une relative disparité entre les écoles doctorales de chimie (prise au sens large, incluant chimie physique, science des matériaux et interface chimie/santé) ; si en moyenne les établissements consacrent 1 CD pour 12 titulaires de la HDR – ce qui signifie que chacun d'eux dirigera 2,2 thèses sur contrat d'établissement durant sa carrière – en fait la situation est très disparate, les universités les mieux dotées (ou consacrant la plus forte part de leur budget aux thèses) offrant une pression moins forte aux titulaires de la HDR pour encadrer. Quoiqu'il en soit, les contrats d'établissement ne représentent que 15 à 30% des thèses par an, ce qui montre que les laboratoires de chimie recrutent leurs doctorants grâce à d'autres types de financements (ANR, CIFRE, réseaux européens ITN...).

D. La science chimique dans un monde devenu incertain

Depuis l'époque des grands précurseurs (Lavoisier, Berthelot, etc.), la chimie française a toujours tenu son rang dans le concours des nations. Néanmoins, si parmi les derniers Prix Nobel français, celui de Jean-Pierre Sauvage en 2016 illustre le cas d'un chercheur ayant passé l'intégralité de sa carrière dans le système français, ceux plus récents d'Emmanuelle Charpentier en 2022 ou de Moungi Bawendi en 2023, tous deux récompensés pour leurs travaux à l'étranger, sont révélateurs de conditions de recherche qui se sont peu à peu dégradées depuis plusieurs décennies, malgré (ou à cause ?) de réformes de l'enseignement supérieur et la recherche (**ESR**) qui se sont enchaînées : LRU votée en 2007 déjà mentionnée puis en 2022 « loi de programmation de la recherche » (**LPR**). Dans sa recommandation du 28 janvier 2020,¹⁵ le CSI a alerté sur

¹⁵ [Recommandation_CSI-INC_baisse-des-financements.pdf \(28.1.2020\)](#)

la baisse inquiétante du niveau des dotations financières « récurrentes » des laboratoires de l'INC. Comme son nom l'indique, la **LPR** a apporté une programmation budgétaire pluriannuelle, mais qui concerne essentiellement des mesures de revalorisation des carrières *via* une hausse du montant des primes et un arrêté (publié le 31 août 2022) revalorisant le doctorat et améliorant différents points (information des futurs docteurs, déroulement de la thèse, devenir professionnel des docteurs, intégrité scientifique).¹⁶ Cependant, concernant le financement de la recherche, force est de constater un fonctionnement des laboratoires toujours plus dépendant du succès à des AAP nationaux (la plupart gérés par l'**ANR**) mais aussi européens comme ceux des programmes du *European Research Council* (**ERC**). Dans ce modèle de financement basé essentiellement sur les AAP, la recherche est fractionnée en projets certes ambitieux mais où la continuité et les liens nécessaires entre tous ces projets ne sont pas assurés faute de financements récurrents. Ces AAP déstructurent les collectifs de travail avec des collègues qui, de collaborateurs, deviennent concurrents. **Le CSI s'interroge sur l'effet délétère d'une telle philosophie de compétition à tout crin sur la qualité de la recherche française et sur les capacités du pays à répondre à l'avenir aux grandes questions scientifiques qui se posent à l'humanité.**

9. La Chimie face aux crises (sanitaires, environnementales, sociales) et aux tensions internationales

Durant la pandémie de 2020, les laboratoires de l'INC n'ont absolument pas démerité, avec plusieurs unités fortement engagées dans la recherche de solutions rapides et efficaces à des questions pratiques cruciales : lavage et recyclage des masques FFP2 (par réacteurs sous pressions et procédé au CO₂ supercritique) mais aussi développement de peptides antiviraux pour application sous forme de spray nasal, participation au développement du vaccin cubain. Plusieurs équipes de chimistes ont ainsi obtenu des financements de l'appel "Flash COVID-19" de l'ANR et se sont également regroupées au sein du consortium Gavo, financé par le ministère, pour stimuler le développement de molécules susceptibles de bloquer la réplication des virus à ARN. Néanmoins, la crise sanitaire a montré les insuffisances du système industriel français, en particulier dans la production de principes actifs de médicaments de base (paracétamol, etc.), et la nécessité de relocaliser cette production en France ou en Europe, mais aussi d'encourager les partenariats de recherche entre les laboratoires pharmaceutiques (seuls à même de conduire des tests cliniques très coûteux) et les laboratoires académiques, notamment ceux de l'INC.

Les récents changements géostratégiques mondiaux placent la recherche en chimie en première ligne pour faire face aux défis de *sourcing* de matières premières ou de molécules et matériaux produits ailleurs, voire à des relocalisations nécessaires de productions dans des domaines comme la défense (batteries portables et rechargeables en environnements dégradés, matériaux énergétiques dont la production doit en plus s'adapter à la directive REACH), le spatial, la pharma, etc. Pour les deux premiers, qui relèvent de domaines régaliens, les partenariats existants avec l'Agence de l'Innovation de Défense (**AID**) et le Centre National d'Études Spatiales (**CNES**) pourraient être renforcés, notamment *via* l'institut franco-allemand Nanomatériaux pour Systèmes Sous Sollicitations Extrêmes (NS3E) de Saint-Louis, qui dépend de l'INC. Face au contexte géopolitique actuel, un questionnement sur la place de la recherche en chimie et les interactions avec l'ensemble du monde semble nécessaire. La remise en cause de l'ordre mondial, les guerres ou le terrorisme sont autant d'éléments qui doivent conduire à repenser en permanence le positionnement des activités de recherche et les collaborations. On peut noter aussi que comme d'autres instituts du CNRS, l'INC a accueilli plusieurs chercheurs réfugiés dans le cadre du programme PAUSE mis en place par le Collège de France, avec des moyens du Ministère de la Recherche, de l'Enseignement Supérieur et de l'Innovation (**MESRI**) et de mécènes privés.¹⁷

Deux points méritent enfin d'être soulignés : relations avec les pays en développement et relations avec de grandes puissances économiques et scientifiques, déjà établies ou en devenir. Même si les financements des projets internationaux sont dictés par la politique des institutions européennes ou par des relations d'État à État, il est possible pour les chercheurs et les chercheuses choisir leurs sujets en lien avec le contexte global. **Les activités de recherche en chimie sont ainsi parfois devenues des sujets stratégiques.**

¹⁶ arrêté du 26 août 2022 modifiant l'arrêté du 25 mai 2016 fixant le cadre national de la formation et les modalités conduisant à la délivrance du diplôme national de doctorat ([JORF n°201 du 31 août 2022, texte n° 19](#)).

¹⁷ « [Les trajectoires des scientifiques en exil sont trop souvent mal connues](#) » | CNRS Le journal, juillet 2022

10. Éthique et intégrité : quelles particularités en Chimie ?

Toujours dans le contexte des bouleversements en cours qui changent les conditions d'exercer le métier de chimiste dans un laboratoire de l'INC, les questions éthiques sont devenues depuis plusieurs années une problématique récurrente au centre des débats. « L'intégrité scientifique ne se discute pas, elle se respecte » comme l'écrit l'académicien des sciences Pierre Corvol dans le rapport sur l'intégrité scientifique qu'il a remis au gouvernement en juin 2016.¹⁸ **Si l'éthique nous invite à réfléchir aux valeurs qui motivent nos actes et à leurs conséquences, l'intégrité scientifique n'est pas le même concept, et correspond plutôt au code de « bonne conduite » qui doit gouverner toute pratique de recherche.** C'est une condition indispensable à la crédibilité de la science et à la confiance des résultats produits, à la fois au sein de la communauté scientifique mais aussi vis à vis du grand public. Les écarts à l'intégrité scientifique se caractérisent par une « violation sérieuse et intentionnelle dans la conduite d'une recherche et dans sa diffusion ». Ils peuvent se manifester à différents niveaux : i) Fabrication : Invention de toutes pièces des données d'une recherche, ii) Falsification : manipulation (modification, omission) intentionnelle de données ou de résultats, et iii) Plagiat : utilisation, voire appropriation, des travaux ou des idées d'un autre à son insu et sans le créditer correctement. Sont donc exclues « les erreurs de bonne foi ou les différences honnêtes d'opinion ». Reste néanmoins une « zone grise » de pratiques discutables en recherche avec par exemple l'embellissement des résultats et des interprétations, la signature d'une publication sans justification réelle, les références d'un travail absentes ou erronées, la dissimulation des conflits d'intérêt dans l'évaluation de travaux scientifiques ou le non-respect de la propriété intellectuelle (projet, exposé, dossier candidature, etc.).

Dans ce cadre, et suite à « l'affaire Voinnet » qui avait ébranlé la crédibilité de la recherche française,¹⁹ une procédure de signalement a été mise en place en 2018 au CNRS.²⁰ En pratique lorsqu'une fraude est suspectée, tout membre d'un laboratoire (statutaire ou contractuel) peut faire un signalement en prenant contact avec le Référent Intégrité Scientifique (RIS), le physicien Rémy Mosseri (<https://mis.CNRS.fr>) pour signaler un manquement à l'intégrité scientifique. S'en suit généralement une enquête qui peut (ou non) conduire à une procédure disciplinaire envers les protagonistes incriminés. Le nombre croissant de signalements est possiblement lié à l'évolution des conditions d'exercice de l'activité de recherche. Le poids des indicateurs bibliométriques, la compétition exacerbée entre équipes concurrentes pour publier ou obtenir des financements avant les autres, la mise en avant systématique de l'excellence... sont autant de moteurs pouvant pousser des chercheurs à la fraude. Une sensibilité de la communauté des chimistes aux questions d'intégrité scientifique est donc importante, des cas de manquement à l'intégrité commençant à faire jour dans le domaine de la chimie aussi.

L'équipe du RIS travaille également à une meilleure définition par discipline des « bonnes pratiques scientifiques ». Comme exemple, on citera la mise en place de règles claires d'attribution du statut d'auteur des articles, la correction systématique des articles en cas d'erreur de bonne foi, ou leur rétractation si une fraude manifeste est avérée. Le mouvement actuel d'ouverture des données de la recherche (traçabilité, répétabilité, partage des données...) est de nature à éviter les erreurs sincères dans les publications. Par ailleurs la mise en ligne des rapports des référés en complément des articles des journaux du groupe Springer-Nature est une pratique à généraliser, de même que les sites de type *journal club* (PubPeer.com) ou *post-publication review* (Publons.com), eux aussi de nature à améliorer la transparence du processus de publication des articles. Concernant les conflits liés à la liste des auteurs des articles – qui, d'après les dires du RIS, constitue la majorité des cas traités par son équipe dans les laboratoires de chimie, loin devant les fraudes avérées – **une meilleure définition des règles d'auteurat des articles devrait déjà réduire les causes de conflit, et pourrait être mise à l'ordre du jour de la prochaine mandature du CSI,**²¹ de même que des indications aussi sur la bonne manière de mettre fin à une collaboration (en particulier ce qui concerne l'utilisation des échantillons synthétisés par les chimistes par les partenaires du projet, après la fin officielle de celui-ci). Les chimistes sont enfin incités à publier de leurs côtés les synthèses originales, en accord avec leurs partenaires, mais sans attendre indéfiniment qu'elles soient valorisées par les applications recherchées.

¹⁸ [Pierre Corvol a remis à Thierry Mandon son rapport : Bilan et propositions de mise en œuvre de la charte nationale d'intégrité scientifique | Académie des Sciences, 29 juin 2016](#)

¹⁹ [AFFAIRE VOINNET - Encyclopædia Universalis](#)

²⁰ [Éthique, déontologie, intégrité scientifique et lancement d'alerte | CNRS](#)

²¹ [Qui est auteur d'une publication ? Les quatre conditions / Définir les auteurs d'une publication scientifique | CIRAD](#)

E. Horizon à court et moyen termes de l'institut : de l'INC à « CNRS-Chimie » !

11. Evolutions des rôles attribués au CNRS : quelles conséquences pour les laboratoires de l'INC ?

Malgré son statut d'organisme national de recherche (ONR), le CNRS dispose de crédits limités (moins de 20% de son budget) pour financer la recherche (hors salaires). Cependant ses instituts et en particulier l'INC ont décidé de consacrer une partie de cette enveloppe sous forme d'appels à projets (AAP). Dans ce domaine l'INC a été particulièrement proactif, avec l'AAP **Emergence@INC** et son volet **Emergence@International** visant à permettre à des chimistes de faire une "tournee" à l'international. Même si elle n'est pas à proprement parler un AAP, l'opération **Ambassadeurs@INC** pour accueillir des chercheurs étrangers pendant un court séjour dans plusieurs laboratoires de l'INC témoigne de ce volontarisme de l'institut à exercer – avec ses moyens propres – une véritable politique scientifique, reconnu car l'idée des Ambassadeurs a été reprise à l'échelle du CNRS tout entier. Pour promouvoir l'interdisciplinarité, l'INC et la Mission pour les Initiatives Transverses et Interdisciplinaires (MITI) du CNRS ont lancé en 2023 un nouvel AAP **Itinérance@INC** qui vise à faire venir pendant plusieurs mois des chercheurs d'autres instituts dans ses laboratoires et y développer des projets interdisciplinaires. Soulignons que le programme **Emergence@INC** a été créé en 2018 pour faire suite à un workshop sur l'émergence organisé conjointement par l'INC et par le CSI lors de sa précédente mandature, faisant suite à une recommandation de ce dernier.²² Cet AAP s'adresse aux chercheurs et enseignants-chercheurs – durant 5 à 10 ans après leur recrutement sur leur poste – qui souhaitent développer un projet novateur par rapport à l'état de l'art et vise à encourager la prise de risque en finançant un contrat de chercheur(e) postdoctoral. A noter qu'il n'est pas nécessaire d'avoir été lauréat de l'AAP Emergence pour candidater à l'appel international. Relativement « légers » pour y répondre, ces appels constituent des outils intéressants pour que les jeunes collègues assoient une nouvelle activité dans leur unité, et peuvent aussi s'avérer être des tremplins pour candidater ensuite à des AAP plus conséquents. Il reste néanmoins de portée très modérée, et de nouveaux AAP parus récemment, et dans lesquels le CNRS s'est fortement engagé, risquent d'induire d'importants changements à court terme de l'organisation de la recherche au sein des laboratoires de l'INC.

Les programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR)

En effet dans le cadre des 3^{ème} et 4^{ème} Programmes d'investissement d'avenir (PIA), le gouvernement a décidé en 2021 d'affecter 20 milliards € sur cinq ans à la recherche et l'innovation, dont 11 milliards € affectés au plan France Relance 2030, afin d'en accélérer la dynamique. La fin des « laboratoires d'excellence » (LabEx) créés en 2009 (PIA1 et PIA2, suite à la mission dite « Juppé et Rocard ») étant programmée pour 2024, il a décidé de créer à la place les programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR) qui sont des sources de financement basées aussi sur un emprunt d'État, mais aussi de nouveaux modes de pilotage de la recherche. A la différence des LabEx, les PEPR sont des programmes nationaux pilotés par les ONR comme le CNRS, et dont les financements sont gérés par l'ANR. Ils sont de deux natures : les PEPR des stratégies nationales (2 milliards €) et les PEPR exploratoires (1 milliard €). Ces PEPR offrent une large diversité structurelle selon les domaines de recherche abordés, et leur classification relève essentiellement de leur niveau de maturité technologique. Les PEPR sont présentés comme une stratégie d'investissement dirigée en vue d'accélérer des filières critiques. Ils visent à construire ou consolider un leadership français dans des domaines scientifiques considérés comme prioritaires aux niveaux national ou européen et susceptibles d'être liés à une transformation de grande ampleur, qu'elle soit technologique, économique, sociétale, sanitaire, environnementale, etc.

Les PEPR des stratégies nationales

Le plan « **France 2030** » se décline en dix objectifs constituant l'ensemble des stratégies nationales d'accélération. Ainsi, dix PEPR des stratégies nationales ont été lancés en septembre 2021 pour un total de 702 M€, deux de ces PEPR relèvent de l'INC : 1/ Hydrogène décarboné (80 M€) co-piloté par le CNRS et le CEA. Il couvre les problématiques de production, stockage, transport de l'hydrogène dit « vert », et son utilisation pour la mobilité lourde. Des travaux seront également menés pour accompagner le déploiement

²² [Recommandation du CSI de l'INC du 4 décembre 2017, Soutien aux recherches en émergence \(cnrs.fr\)](#)

des systèmes hydrogène à travers des analyses de cycle de vie, des études technico-socio-économiques et des aspects de sécurité ; et 2/ Recyclabilité, recyclage et réincorporation des matériaux recyclés (40 M€) piloté par le CNRS. Ce programme est centré sur cinq matériaux utilisés quotidiennement : les plastiques, les matériaux composites, les textiles, les métaux stratégiques et les papiers/cartons, afin de relever un certain nombre de défis écologiques, économiques et technologiques nécessaires à la transition vers une économie circulaire, compétitive et respectueuse de l'environnement.

Les PEPR exploratoires

Les PEPR exploratoires visent quant à eux des secteurs encore en émergence avec des travaux de recherche dont les domaines d'applications peuvent, pour certains, relever encore d'hypothèses de travail. Il s'agit d'explorer des champs scientifiques dont les retombées espérées peuvent être multiples. A la différence des PEPR des stratégies nationales qui sont issus d'une décision gouvernementale, les PEPR exploratoires alimentent des AAP gérés par l'ANR et orientés sur des priorités. Quatre premiers PEPR exploratoires ont été retenus en septembre 2021 dont un pour l'INC comme institut principal : **DIADEM** : « Dispositifs intégrés pour l'accélération du déploiement de matériaux émergents » (80 M€), co-piloté par le CNRS et le CEA, qui vise à accélérer la conception et l'arrivée sur le marché de matériaux plus performants et plus durables, notamment grâce à l'intelligence artificielle. Lors de la vague 2 en 2022, treize PEPR ont été lauréats dont le programme « Lumière et Matière » (**LUMA**) (40 M€) co-piloté par le CNRS (avec l'INC comme institut principal) et le CEA qui vise à étudier, comprendre et développer la lumière comme moyen d'explorer et de contrôler des systèmes physico-chimiques et biologiques, afin de favoriser l'émergence de « technologies vertes », de systèmes de protection, la compréhension et le contrôle de systèmes physico-chimiques et biologiques, aux échelles ultimes d'espace et de temps.

Il existe également des **PEPR de stratégie d'accélération** dont l'objectif est de *booster* la recherche et l'innovation sur des sujets prioritaires pour la France, en termes d'emploi, d'activité ou de souveraineté (par exemple, les technologies quantiques ou les nouveaux matériaux). Parmi ceux-ci, deux autres PEPR concernent les chimistes. Le **PEPR SPLEEN** (Soutenir l'innovation pour développer de nouveaux procédés industriels largement décarbonés) copiloté par le CNRS et l'Institut français du pétrole et énergies nouvelles (**IFPEN**), il vise à mettre en œuvre des actions de recherche permettant de rendre les procédés industriels moins émetteurs de gaz à effet de serre, d'une part en introduisant des vecteurs énergétiques décarbonés, d'autre part en favorisant les procédés de stockage, de séparation et de conversion du CO₂ en molécules d'intérêt. Le **PEPR TASE** (Technologies avancées des systèmes énergétiques), copiloté par le CNRS et le CEA, a quant à lui pour objectif de lever les verrous technologiques pour développer des réseaux d'énergie flexibles et résilients ainsi que des cellules photovoltaïques à haut rendement et à impact environnemental minimisé.

Pilotage de la recherche par les PEPR

Quels que soient les types et tailles des PEPR existants ou à venir, les PEPR représentent un outil puissant de pilotage de la recherche, du fait de leur dotation financière des thématiques de recherche retenues. Cependant, les orientations prioritaires du plan **France 2030** n'ont pas été discutées au sein de la communauté scientifique à travers leurs instances représentatives que sont les conseils scientifiques des ONR ni les Sections et CSI du Comité National de la Recherche Scientifique (**CoNRS**). Il est clair que les priorités retenues pour les PEPR des stratégies nationales ou d'accélération visent avant tout à soutenir la Recherche et Développement (**R&D**) ou Recherche et Innovation (**R&I**) des entreprises. Il s'agit d'enjeux d'avenir sur le plan économique, essentiellement industriels, pour notamment contribuer à (re)constituer des filières industrielles stratégiques pour l'État. Les PEPR risquent ainsi d'amplifier les situations d'inégalités dans les laboratoires en augmentant les différences de financement entre les équipes qui sont incluses dans un PEPR et les autres.

Dans le cas des PEPR des stratégies nationales, le CSI regrette la procédure *top-down* fortement critiquable du fait de l'absence d'une expression collective des personnels de la recherche sur la définition des thématiques de recherche prioritaires. Dans le cas des PEPR exploratoires, les AAP mis en place annuellement vont sans doute permettre un fonctionnement plus *bottom-up*. La direction politique gouvernementale en matière de recherche de ce quinquennat n'étant pas encore claire, la Ministre n'ayant

pour l'heure pas encore officiellement donné de réponse au rapport de la mission Gillet qui lui a été remis,²³ et même si la direction du CNRS en a déjà donné son interprétation,²⁴ l'incertitude demeure sur les modes de financement de la recherche qui seront mis à l'œuvre. Le CSI est donc en position légitime de s'interroger si le développement actuel des PEPR comme moyen privilégié de financement de la recherche publique, et des « projets de rupture » (PR) amenés semble-t-il à prendre leur suite,²⁵ ne risque pas à terme d'induire la **stagnation du budget national dédié aux ONR, et d'assécher le financement récurrent des laboratoires du CNRS et le renouvellement de ses postes d'agents titulaires**, les tâches des PEPR étant confiées principalement à de jeunes chercheurs post-doctorants contractuels.

12. De l'importance des instances du Comité National de la Recherche Scientifique (CoNRS) dans la politique de l'INC et en particulier du CSI

La mission majeure du Conseil Scientifique d'Institut de l'INC est de conseiller et d'assister par ses avis et ses recommandations la direction de l'institut. Par ailleurs, deux points réglementaires annuels sont soumis au CSI : la validation du jury d'admission des concours CR, CID et DR, et la consultation sur les possibles divergences (suppression et création d'unités) entre l'INC et les Sections du Comité National associées (S11-S16). Enfin, chaque CSI doit rédiger un rapport de prospective (et potentiellement de réflexions) à l'issue de son mandat (5 ans), décalé de 2 ans vis-à-vis des rapports de conjoncture établis par les Sections et les CID. Compte tenu des décalages calendaires, le **présent rapport du CSI ne s'appuie que sur ses réflexions propres et non sur les rapports des sections de la mandature en cours, qui ne seront publiés qu'en 2024.**

De par son expertise scientifique en chimie et la diversité de ses membres (élus et nommés), le CSI constitue une force de propositions sur différents aspects de la politique scientifique l'INC mais aussi d'évaluation de la pertinence et de l'opportunité de ses projets et ses activités. Dans l'absolu, cela devrait impliquer un dialogue constant, interactif et constructif, combinant qualité d'écoute mutuelle et confiance réciproque.

A la fin de sa mandature, l'actuel CSI de l'INC (comme le CS sortant au niveau du CNRS tout entier) s'est interrogé sur son rôle effectif et son apport concret à la direction de l'INC. Ces interrogations multiples portent à la fois sur son mode de fonctionnement actuel (4 réunions annuelles sur une seule journée, complétées par l'activité de groupes de travail), sur les moyens financiers alloués par le Secrétariat Général du Comité National (SGCN), sur les disponibilités contraintes de la direction de l'INC, ou encore sur le type de sollicitations du CSI par la direction dans le cadre d'un agenda raisonnable ou d'une programmation pluriannuelle. Pour maximiser l'efficacité des activités du CSI, nous **proposons la mise en place de quatre sessions de deux jours**, comme le CSI de l'institut CNRS nucléaire et particules (IN2P3), dont au moins une séance publique accessible à tous les membres des laboratoires de l'INC par visioconférence.

A l'heure d'un « écosystème » de l'Enseignement supérieur et la recherche (ESR) en pleine évolution dans un contexte structurel en mutation où le rôle des CSI est parfois remis en cause, des améliorations peuvent et doivent être fortement envisagées pour redynamiser le rôle du CSI et de ses acteurs vis-à-vis de l'institut. On pourra ainsi mentionner une plus grande implication du CSI dans la préparation des différents appels à projets (programmes Emergence@INC et Ambassadeurs@INC, les relations de l'INC avec la MITI, le montage des PEPR ou des « projets de rupture » (PR) qui leur succéderont, ainsi que le choix des thématiques des chaires de professeurs juniors (CPJ).²⁶ On pourra également mentionner l'importance des recommandations écrites et votées par le CSI, dont le rôle est justement d'inciter à des réflexions constructives « alternatives » à celles de la direction, qui soit issues de la communauté des chimistes, de manière *bottom-up* au lieu de *top-down*.

²³ <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/remise-du-rapport-de-la-mission-gillet-sur-l-ecosysteme-de-la-recherche-et-de-l-innovation-91274>

²⁴ <https://www.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/rapport-gillet-la-vision-dantoine-petit>

²⁵ [A-t-on perdu l'amour du risque ? — TheMetaNews](#), 6 septembre 2023 (connexion avec une adresse @cnrs.fr)

²⁶ [INC Recommandation du CSI sur les chaires professeurs juniors.pdf \(recommandation du 11 mai 2022\)](#)

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS FINALES DU CSI

Si l'on considère les grandes missions du CNRS et de ses instituts que sont l'avancée et la valorisation des connaissances, la médiation scientifique, la formation et la contribution à la politique scientifique, le CSI doit pouvoir contribuer à leur réalisation à travers les activités des laboratoires de l'INC. En tentant d'établir l'état de l'art et la frontière actuelle des différentes sous-disciplines et des objets de recherche de la chimie, le présent rapport de prospective a dégagé de grandes thématiques qui peuvent structurer les recherches dans les années à venir. On peut citer, par exemple, la massification des données (analytiques, structurales, constantes cinétiques, etc.) permises par les approches et méthodes à haut débit, comme la chimie en flux et leur traitement automatisée avec les outils de l'IA.

Depuis toujours, la chimie a prouvé qu'elle pouvait s'adapter aux demandes de la société et répondre rapidement aux grandes questions telles que celles de ce début de siècle (santé, climat, environnement, durabilité...). On ne doit cependant pas oublier de conserver des compétences méthodologiques indépendantes de la finalité appliquée des recherches, notamment en synthèse des architectures moléculaires, en chimie analytique, en science des matériaux ou en génie des procédés.

Représentant la communauté des chercheurs et personnels d'accompagnement de la recherche des laboratoires de l'INC, le CSI s'est fait l'écho, au moyen de ses recommandations émises au cours du mandat, des inquiétudes des acteurs de la recherche quant aux évolutions récentes de leur travail. On peut citer par exemple la recommandation sur la baisse des budgets annuels des laboratoires de l'INC en janvier 2020,²⁷ ou celle en juillet 2023 sur le livre blanc du Conseil scientifique du CNRS sur les entraves administratives,²⁸ incluant les nouvelles applications de gestion des missions inopérantes.²⁹

Le CSI s'est avéré être un lieu de dialogue franc et ouvert entre ses membres, mais aussi avec la direction de l'INC. Néanmoins, la méthodologie et le mode de fonctionnement actuel n'apparaissent pas optimaux que ce soit dans la communication avec le CSI et son implication dans les prises de décision de politique scientifique qui le concernent : choix des thématiques des chaires de professeurs juniors, de l'ensemble des appels à projets de l'INC (Emergence@INC et autres) ou des personnalités invitées ambassadrices, etc.

Pour pallier ces difficultés, le CSI propose que l'INC communique mieux sur l'existence du CSI et de ses missions, par exemple en lui consacrant une page sur son site web. Le CSI est aussi preneur d'une lettre de mission annuelle comportant les questions que la direction souhaite qu'il examine, avec des dates limites à respecter pour rendre ses travaux, et un retour sur l'utilisation et la prise en compte de ceux-ci. La question du rôle et du poids du CSI peut aussi se poser. A cet égard, il est manifeste de constater que le regard externe et la motivation de ses membres étrangers, qui peuvent nourrir les réflexions par des expériences différentes, s'estompent au fil du temps au cours du mandat. Cet état de fait doit interroger la place du CSI, « coincé » entre la direction de l'INC et les sections du Comité national. Pour sortir de cette ornière et outre le rapport de prospective qui fournit une vision globale des avancées et du futur de la chimie, **il est important que le CSI puisse s'autosaisir de sujets importants non traités par les autres instances ni par la direction.** Sans prétendre à l'exhaustivité, on peut citer par exemple : aller plus loin dans l'analyse de l'interdisciplinarité et interroger des carrefours émergents de rencontre comme chimie et droit, chimie et économie, chimie et philosophie, réfléchir sur la chimie et le genre et bien sûr, promouvoir la réflexion sur le lien entre la chimie et la gestion durable des ressources en effectuant la cartographie des pratiques actuelles et des recherches des laboratoires dans ce domaine.

A l'issue de la réflexion menée par les membres du CSI, il apparaît essentiel que cette instance prenne toute sa place dans la politique scientifique de l'institut. **Le CSI doit s'inscrire plus clairement dans une démarche de conseils et de propositions auprès de la direction d'institut.**

Texte adopté par vote électronique du 20 novembre 2023 à l'unanimité des 19 votants membres du CSI

²⁷ [Recommandation CSI-INC baisse-des-financements.pdf \(recommandation du 28 janvier 2020\)](#)

²⁸ [CSI-INC Recommandation Livre-blanc.pdf \(recommandation du 4 juillet 2023\)](#)

²⁹ <https://www.nextinpact.com/article/72455/cnrs-gestion-missions-completement-buguee>

ANNEXE 1 : Signification des sigles

AAP	Appel À Projets
ACV	Analyse de Cycle de Vie
ADN	Acide DésoxyriboNucléique
AID	Agence de l'Innovation de Défense
ANR	Agence Nationale de la Recherche
APC	<i>Article Processing Charges</i>
CANs	<i>Covalent Adaptive Networks</i>
CC-BY	Licence Creative Commons Attribution
CD	Contrats Doctoraux
CEA	Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives
CID	Commisson InterDisciplinaire
CIFRE	Convention Industrielle de Formation à la Recherche
CIRAD	Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CNES	Centre National d'Études Spatiales
COF	<i>Covalent Organic Framework</i>
CoNRS	Comité National de la Recherche Scientifique
COVID-19	<i>COronaVirus Disease of 2019</i>
CPER	Contrat de Projets Etat-Région
CPJ	Chaire de Professeur Junior
CR	Chargé de Recherche
CRAC	Compte Rendu Annuel d'Activité Chercheur
CSC	<i>China Scientific Council</i>
CSI	Conseil Scientifique d'Institut
DAS	Directeur Adjoint Scientifique
DDOR	Direction des Données Ouvertes de la Recherche
DIADEM	Dispositifs Intégrés pour l'Accélération du DÉploiement de Matériaux Emergents (PEPR)
DNP	<i>Dynamic nuclear polarisation</i>
DOAJ	<i>Directory of Open Access Journals</i>
DR	Directeur de Recherche
EDSC	École Doctorale de Sciences Chimiques
ENS	École Normale Supérieure
ENSMA	École Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique
ERC	<i>European Research Council</i>
ESR	Enseignement Supérieur et Recherche
FEDER	Fonds Européen de Développement Régional
FFP2	<i>Filtering FacePiece respirator of class 2</i>
GT	Groupe de Travail
HAL	Hyper-Articles en Ligne
HDR	Habilitation à Diriger les Recherches
HR-MAS	
NMR	<i>High-Resolution Magic Angle Spining Nuclear Magnetic Resonance</i>
IA	Intelligence Artificielle
IFPEN	Institut Français du Pétrole et des Énergies Nouvelles

IN2P3	Institut National de Physique Nucléaire et Physique des Particules (CNRS Nucléaire et Particules)
INC	INstitut de Chimie (CNRS Chimie)
INP	INstitut de Physique (CNRS Physique)
INP	Institut National Polytechnique
INS2I	INstitut des Sciences de l'Information et de leurs interactions (CNRS Sciences Informatiques)
INSA	Institut National des Sciences Appliquées
INSB	INstitut des Sciences Biologiques (CNRS Biologie)
ISAE	Institut Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace
ITN	<i>Innovative Training Networks</i>
LabEx	Laboratoires d'Excellence (PIA1 et 2)
LOD	<i>Lower Limit of Detection</i>
LPR	Loi de Programmation de la Recherche
LPR	Loi de Programmation de la Recherche
LRU	Loi relative aux Libertés et Responsabilités des Universités
LUMA	Lumière et MATière (PEPR)
MALDI	<i>Matrix-Assisted Laser Desorption Ionization</i>
MESRI	Ministère de la Recherche, de l'Enseignement Supérieur et de l'Innovation
MITI	Mission pour les Initiatives Transverses et Interdisciplinaires
MOF	<i>Metal Organic Framework</i>
NIPU	<i>Non-Isocyanate PolyUrethane</i>
NS3E	Nanomatériaux pour Systèmes Sous Sollicitation Extrêmes
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Économiques
ODD	Objectifs de Développement Durable
ONR	Organisme National de Recherche
PDT	<i>PhotoDynamic Therapy</i>
PEPR	Programmes et Équipements Prioritaires de Recherche
PFAS	<i>Per- and polyFluoroAlkyl Substances</i>
pH	Potentiel Hydrogène
PIA	Programme d'Investissement d'Avenir
PR	Projet de Rupture
Py-GC/MS	Pyrolyse-Chromatographie en phase Gazeuse-Spectrométrie de Masse
R&D	Recherche et Développement
R&I	Recherche et Innovation
REACH	<i>Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals</i>
REDOX	Réseau des Écoles DOCTORALES en Sciences chimiques
RIS	Référent Intégrité Scientifique
RMN	Résonance Magnétique Nucléaire
RPS	Risques PsychoSociaux
SGCN	Secrétariat Général du Comité National
SNCD	Stratégie de Non-Cession des Droits
SPLEEN	Soutenir l'innovation pour développer de nouveaux procédés industriels largement décarbonés (PEPR)
TASE	Technologies Avancées des Systèmes Énergétiques (PEPR)

ANNEXE 2 : Intitulés et mots-clés de Sections de l'INC

Section 11 (INC/INP) / Matière molle : synthèse, élaboration, assemblages, structure, propriétés, fonctions

Sous disciplines :

- a) Chimie des polymères et des auto-assemblages.
- b) Physico-chimie et ingénierie de la matière molle.
- c) Matériaux supra et macromoléculaires.
- d) Physique (expérimentale, théorique et simulation) de la matière molle et des systèmes biologiques prenant en compte les caractéristiques physico-chimiques des systèmes étudiés.

Champs d'application :

- a) Systèmes auto-assemblés et fluides complexes tels que tensioactifs, polymères, gels, cristaux liquides, colloïdes, films minces, interfaces, mousses, émulsions.
- b) Conception, synthèse, procédés, mise en forme, assemblage, propriétés, durabilité des polymères, biopolymères, biomatériaux et composites.
- c) Systèmes biologiques et systèmes bio-inspirés ou reconstitués aux échelles moléculaires, cellulaire et tissulaire. Gels actifs : émergence de forme, de mouvement, de fonction.

Section 12 / Architectures moléculaires : synthèses, mécanismes et propriétés

Sous-disciplines :

- a) Concepts et méthodes pour la synthèse et la caractérisation de molécules et de matériaux hybrides organiques
- b) Synthèses multi-étapes et éco-compatibles
- c) Hétérochimie, chimie organométallique et chimie supramoléculaire
- d) Catalyse et biocatalyse pour la synthèse organique
- e) Physico-chimie et mécanismes réactionnels

Champs d'applications :

- a) Produits naturels et molécules bioactives
- b) Chimie fine
- c) Molécules pour l'environnement, chimie durable, valorisation des ressources naturelles
- d) Molécules et matériaux moléculaires et hybrides pour l'optique, l'électronique et la biologie
- e) Molécules et matériaux moléculaires pour les technologies de l'information et de la communication

Section 13 / Chimie Physique, théorique et analytique

Sous-disciplines :

- a) Chimie, physico-chimie et biochimie théoriques
- b) Electrochimie moléculaire, biomoléculaire, localisée, nano-électrochimie
- c) Radiochimie, chimie sous rayonnements, photochimie, sonochimie
- d) Thermodynamique, cinétique et processus ultra-rapides
- e) Développements méthodologiques en Chimie Analytique et spectroscopies

Champs d'application :

- a) Chimie de l'environnement (dynamique des polluants, spéciation, multi-compartiments)
- b) Chimie du patrimoine
- c) Astrochimie
- d) Capteurs pour l'énergie et la santé
- e) Photovoltaïque, production et stockage électrochimique de l'énergie

Section 14 / Chimie de coordination, catalyse et procédés, interfaces

Sous-disciplines :

- a) Chimie de coordination et Complexes organométalliques
- b) Catalyse homogène et hétérogène, photocatalyse, catalyse assistée, procédés catalytiques
- c) Physicochimie et réactivité des surfaces et des interfaces, électrocatalyse, photoélectrochimie et électrochimie interfaciale
- d) Modélisation des architectures et de la réactivité, ingénierie et modèles cinétiques

Objets et champs d'application :

- a) Systèmes hybrides, modèles bio-inorganiques
- b) Matériaux moléculaires à base de métaux
- c) Nanostructures et nanochimie
- d) Corrosion, traitements de surfaces
- e) Traitement de la biomasse, dépollution
- f) Conversion et stockage de l'énergie
- g) Sondes et capteurs pour la santé et l'environnement

Section 15 / Chimie des matériaux, nanomatériaux et procédés

Sous-disciplines :

- a) Chimie du solide
- b) Chimie de la matière condensée
- c) Science et génie métallurgiques
- d) Thermodynamique

Applications des matériaux et nanomatériaux pour :

- a) l'énergie
- b) le transport et l'environnement, matériaux de structure
- c) l'optique
- d) les technologies de l'information et de la communication
- e) la santé, biomatériaux à base inorganique

Section 16 / Chimie et vivant (INC/INSB)

Sous-disciplines :

- a) Chémobiologie et chimie médicinale : concepts, synthèse et outils moléculaires
- b) Chimie des substances naturelles et des processus biologiques, synthèse, biocatalyse, biologie de synthèse, bioingénierie
- c) Chimie bio-analytique et biochimie structurale, développements méthodologiques, bioinformatique, chémo-informatique et modélisation moléculaire
- d) Chimie biomimétique et bioinspirée

Objets et champs d'applications :

- a) Biomolécules et substances naturelles
- b) Explorer, analyser et soigner le vivant
- c) Cartographies moléculaires du vivant
- d) Aspects moléculaires des questions de santé, sciences végétales, environnement, écotoxicologie et écologie chimique

ANNEXE 3 : Bilan des actions du CSI de l'INC sur le mandat 2019-2023

Le CSI de l'INC s'est réuni 15 fois en 5 ans, la plupart du temps au siège de l'organisme, avec certaines séances en visioconférence, notamment dans la période post-Covid. Comme prévu au règlement intérieur, les ordres du jour des séances ont été préparés par le bureau du CSI deux semaines à l'avance et ont abordé, en plus des points statutaires (le vote des jurys d'admission en janvier, et à l'automne celui des « divergences » éventuelles entre les avis des sections du CoNRS sur le renouvellement des unités), les sujets suivants qui ont été parfois suggérés par la direction, et le plus souvent issus d'une auto-saisine du CSI en lien avec des questions d'actualité concernant les unités de l'INC. Le CSI s'est aussi structuré en groupes de travail, qui ont tenu des réunions par visioconférence afin d'étudier plus en détails certaines questions : GT Devenir des docteurs, GT Science Ouverte, GT Emergence et Prospective. Certains membres ont aussi participé à des GT inter-CSI, en particulier celui sur l'énergie (issue du conseil scientifique) et celui sur les commissions interdisciplinaires (CID 52, 53 et 54) qui ont fait l'objet d'une demande spécifique de la présidence du CNRS en 2021 (en lien avec les décrets d'application de la Loi pour la Recherche et le renouvellement des sections et CID du CoNRS).

Sujets en lien avec « La Science Ouverte »

Séance du 21.5.2019

Marianne Noël (IR CNRS chimiste qui préparait et depuis a soutenu une 2^{de} thèse au LISIS (UMR9003 Université Paris Est)) sur « Historique des politiques éditoriales des journaux de chimie »

Valérie Gabélica (DR INSERM IECB/ARNA spectro masse, UMR5320 INSERM / Univ. Bordeaux) « Expérience personnelle du dépôt de preprints sur chemRxiv.org »

Sylvie Rousset et de Serge Bauin (DDOR) « La Science Ouverte au CNRS » + 3 journées nationales organisées les 16.11.20 « Science Ouverte 2020, où en sommes-nous ? », 15.11.21 « Science ouverte et évaluation » et 30.11.22 « Les données, un enjeu majeur de la science ouverte », auxquelles certains membres du CSI ont participé.

Stéphanie Castex, Chargée de mission IST de l'INC « Point sur l'Open Access dans les journaux de chimie » + Mise à jour sur le guide « Publier en chimie » lors de la séance du CSI du 18.1.23

Séance du 27.09.2021

Les publications en chimie vues par la géographe Marion Maisonobe chercheuse CNRS au Laboratoire Géographie-Cités (UMR8504, Université de Paris, EHESS) : Présentation de l'outil NETSCITY pour cartographier la recherche, Exemple en chimie avec le réseau INCREASE.

Autre sujets : Innovation/Prospective, International, Communication, Éthique...

Séance du 16.09.2019

L'innovation dans un grand groupe industriel : SOLVAY, par Nicolas Roques (plateau des techniques analytiques de Solvay à Lyon)

Olivier Spalla, responsable département physique chimie ingénierie (SPICE) à l'ANR. Scientifique respecté qui faisait un lien entre l'Agence et la communauté scientifique, O. Spalla (brutalement disparu durant l'été 2020) a présenté au CSI le fonctionnement de l'ANR et la place de la chimie dans ses appels à projets (AAP).

Séance du 20.12.2019 :

Les instruments de coopération internationale à l'INC par Pascal Breuilles, DAS INC « partenariat industriels et internationaux »

Séance du 28.01.2020 sur le devenir des docteurs en chimie

Présentation du « réseau national des écoles doctorales de chimie » (REDOX) par Thierry Constantieux, Directeur de l'EDSC d'Aix-Marseille Université puis 27.9.21 Florent Calvayrac, doyen de la faculté des sciences & techniques de l'Université du Mans et ancien directeur de l'école doctorale Matière, Molécules, Matériaux (3M) Bretagne-Loire : Retours sur l'évaluation des Écoles doctorales de chimie et science des matériaux et l'allocation des contrats doctoraux d'établissements (tableau du nombre de CDE vs nombre de titulaires de l'HDR rattachés à l'ED).

Séance du 28.01.2020 sur les infrastructures de l'INC

Mehran Mostafavi (DAS-INC en charge des IR/TGIR) et Stéphanie Lecocq (Responsable opérationnelle des IR)

Séance du 23.09.2020 sur l'intelligence artificielle

Nouvelle CID55 « Sciences et Données » (Alexandre Legris, DAS INC)
 Projet CID « Matériaux » (Serge Simoens, Président CSI INSIS)
 Jean-Hugues Renault et Manuel Dauchez (CNRS / Univ. Reims)
 Projet de criblage virtuel d'inhibiteurs du virus SARS-CoV-2
 Rémi Carles (CNRS / Univ. Rennes), Président du CSI de l'INSMI
 Clotilde Fermanian (CNRS / Univ. Créteil), Projet 80' IA et Chimie.
 Jean-Michel Loubes (CNRS / Univ. Toulouse), membre et responsable du GT IA du CSI-INSMI

Séance du 27.01.2021: la communication de l'INC et l'éthique

Stéphanie Younès et Anne-Valérie Foillard-Ruzette du service de communication de l'INC
 Suivi de l'éthique et l'intégrité : Didier Gourier, chimiste, ancien membre du Comité d'éthique du CNRS

Séance du 18.1.23 : l'intégrité scientifique dans les labos de l'INC

Rémy Mosseri, Référent intégrité scientifique (RIS) du CNRS

Séance du 01.02.2022 sur l'interdisciplinarité

Maguy Jaber, DAS INC « Politique de l'interdisciplinarité à l'INC »

Les recommandations votées par le CSI

Récapitulatif chronologique sur le site : <https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/inc.htm>

21.05.2019 : S'APPROPRIER LA TRANSITION VERS LA SCIENCE OUVERTE EN MATIERE DE PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

<https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/INC/Recommandation.CSINC.pdf>

28.01.2020 : Recommandation du CSI face à la baisse des financements récurrents

https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/INC/Recommandation_CSI-INC_baisse-des-financements.pdf

09.10.2020 : Recommandation du CSI sur la Loi de Programmation de la Recherche (LPR)

https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/INC/Recommandation_CSI-INC_LPR.pdf

27.09.2021 : Recommandation sur le futur des visites d'unités par le Hcéres

https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/INC/Recommandation_CSI_INC_sur_le_futur_de_visite_de_labos_par_HCERES-vf.pdf

11.05.2022 : Sur les chaires de professeurs juniors

https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/INC/INC_Recommandation_sur_les_chaires_professeurs_juniors.pdf

4.7.2023 : Sur le Livre blanc préliminaire sur les entraves à la recherche : Focus sur les entraves administratives

https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/INC/CSI-INC_Recommandation_Livre-blanc.pdf