

Prospectives **Sciences de l'Ingénierie 2030**



Préface

Initiée à l'automne 2022 par l'Institut CNRS Ingénierie, la réflexion sur la prospective de la recherche dans les sciences de l'ingénierie aboutit à la parution de ce document en 2025. Entre temps, ce sont plusieurs dizaines de chercheurs du CNRS, d'enseignants-chercheurs des universités et des grandes écoles, de chercheurs d'autres organismes et d'ingénieurs de l'industrie qui se sont mobilisés durant plusieurs mois à raison de réunions bimestrielles pour consulter largement la communauté et proposer une vision partagée. Quatre comités d'experts avaient été constitués dont trois couvraient les thèmes scientifiques des sections principales de notre institut et un était transverse sur la santé. Nombre de ces experts disposaient d'une expérience actuelle ou passée de membre de section du Comité National de la Recherche Scientifique ou de Comité Scientifique d'Institut. Ils avaient carte blanche sur la modalité de fonctionnement mais avaient pour consigne de se projeter au-delà des programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR) en cours, c'est-à-dire après 2030. En toute indépendance, tous les comités d'experts ont choisi d'auditionner des personnalités provenant du monde académique mais aussi des acteurs de la sphère socio-économique et de disciplines différentes. A l'issue de ce processus de dix-huit mois environ, quatre rapports ont donc été produits et les présidents de chaque comité ont présenté la synthèse de leurs travaux devant les directions d'unité en mai 2024 afin de recueillir leurs suggestions d'amélioration et leurs commentaires généraux. La seconde phase, impliquant également l'équipe scientifique de l'institut, a pu alors débuter. Elle a permis aux comités de dialoguer ensemble, compléter et d'ajuster leurs propositions.

L'institut CNRS Ingénierie dispose maintenant d'un document de prospective élaboré au terme d'une large consultation de notre communauté scientifique et qu'il considère comme un élément décisionnel de sa politique scientifique. C'était là l'un des objectifs affichés, à savoir d'être capable d'étayer nos orientations scientifiques en capitalisant sur les recommandations émanant de notre communauté élargie à des disciplines connexes et aux attentes de nos partenaires intéressés par les éventuelles applications de nos travaux. Un second objectif était de rendre à l'institut son rôle programmatique et cela ne pouvait se concevoir qu'en ayant une vision à long terme déclinée sous la forme de feuilles de routes proposées par chacun des quatre comités d'experts. Enfin, un dernier objectif était destiné à pouvoir proposer des choix stratégiques lors des dialogues que nous menons avec les agences de moyens, au premier rang desquels l'Agence Nationale de la Recherche.

Plus concrètement, pour nos unités de recherche et nos chercheurs, l'institut les accompagnera dans leur engagement vers les thèmes scientifiques issus de cette vision prospective. Pour cela, différentes voies sont envisagées parmi lesquelles le fléchage d'une partie de la subvention d'état versée en début d'année aux laboratoires qui sera conditionnée à leur contribution aux feuilles de route identifiées. Davantage de concours permettant le recrutement de jeunes chercheurs et les chaires de professeur junior verront leurs intitulés coloriés selon les domaines scientifiques à prioriser ou à renforcer. L'institut ménagera cependant un volume de concours destiné à favoriser l'émergence de nouveaux sujets de recherche originaux.

Ce premier exercice de définition de la prospective de l'institut s'est déroulé sur un temps long; près de deux années en tout auront été nécessaires à son aboutissement et à la rédaction de ce document. Cette ligne directrice dont nous disposons désormais pour afficher notre politique scientifique ne peut pas, ne doit pas être un cadre rigide privé de l'imagination de nos chercheurs et de l'apport de nouveaux talents. La recherche fondamentale menée dans nos laboratoires et la créativité qui en découle imposent à l'institut CNRS Ingénierie de conserver de l'agilité pour faire face à des évolutions scientifiques de plus en plus rapides.

Finalement, indépendamment de l'institut, les comités d'experts ont proposé une prospective scientifique qui est la projection future des transitions et transformations sociales actuelles auxquelles les sciences de l'ingénierie apportent une contribution essentielle : il s'agit de l'environnement, de l'énergie, de la santé et du numérique. Ils ont en outre mis en exergue l'importance capitale des sciences de l'ingénierie dans la conception des matériaux de demain, ainsi que leur contribution essentielle à l'avancement des connaissances et au progrès des sciences fondamentales.

Aux comités d'experts et à l'ensemble des contributeurs à ce document, pour la très grande qualité du travail qui a été accompli, l'Institut CNRS Ingénierie tient à leur exprimer sa profonde reconnaissance et sa sincère gratitude pour l'engagement sans faille dont ils ont su faire preuve avec constance.

Nous vous en souhaitons une bonne lecture.

Lionel BUCHAILLOT

Directeur d'Institut
CNRS Ingénierie

Karam SAB

Délégué Scientifique en charge de la
coordination de la démarche prospective de
CNRS Ingénierie

Sommaire

Introduction générale	6
I. Ingénierie pour l'environnement et le développement durable	9
1. Cycle de vie et des structures	10
2. Vieillessement et durabilité des matériaux et des structures dans leur environnement	10
3. La construction du futur	12
4. Prévention, gestion et évaluations des risques	12
Sur le risque incendie	
Sur "Prévoir l'imprévisible"	
Risques liés à la dispersion d'agents nocifs, pathogènes et/ou polluants	
Risques climatiques	
5. Géomécanique pour l'environnement	14
6. La recherche en acoustique face aux enjeux climatiques, environnementaux et sociétaux	14
II. Ingénierie pour la transition énergétique	15
1. Défis de l'électrification	16
Contexte sociétal	
Enjeux scientifiques	
2. Nouveaux carburants	17
Contexte	
Enjeux par vecteur	
Nouveaux risques	
Vers la neutralité carbone	
3. Défis de la récupération et du stockage de l'énergie	20
Récupération / intégration	
Stockage en EnR	
Géomécanique pour l'énergie	
4. Approches multi-échelles, multiphysiques	22
5. Défis socio-éco-environnementaux	22
III. Ingénierie pour la transformation numérique	23
1. Sobriété numérique	24
Contexte sociétal - Enjeu scientifique - Contexte international - Contexte national	
2. Souveraineté numérique	25
Contexte sociétal - Enjeu scientifique - Contexte international - Contexte national	
3. New Space	26
Contexte sociétal - Enjeu scientifique - Contexte international - Contexte national	
4. Environnement intelligent	27
Contexte sociétal - Enjeu scientifique - Contexte international - Contexte national	
5. Nouveaux outils numériques pour la conception de composant, de circuits et d'architectures intégrées	29
Contexte sociétal - Enjeu scientifique - Contexte international - Contexte national	
6. Mécanique, modèles et données : richesse et sobriété	30
7. Dynamique des fluides, thermique, IA et jumeaux numériques	32

IV. Ingénierie pour la santé	33
1. Modélisation du vivant	34
Contexte et enjeux - Défis scientifiques et technologiques	
2. Les nouvelles approches pour le dépistage et le diagnostic	34
2.1 - Capteurs implantés et portatifs	34
Contexte et enjeux	
Défis scientifiques et technologiques	
2.2 - Imagerie médicale	35
Contexte et enjeux	
Défis scientifiques et technologiques	
3. Les nouvelles approches thérapeutiques	36
3.1 - Dispositifs thérapeutiques implantés	36
Contexte et enjeux	
Défis scientifiques et technologiques	
3.2 - Robotique médicale	37
Contexte et enjeux	
Défis scientifiques et technologiques	
3.3 - Thérapie par effet physique	38
Contexte et enjeux	
Défis scientifiques et technologiques	
3.4 - Thérapie par effet physique	38
Contexte et enjeux	
Défis scientifiques et technologiques	
V. Ingénierie pour le développement des connaissances et des sciences fondamentales	41
1. Imagerie optique aux limites	42
Contexte sociétal - Enjeu scientifique - Contexte international - Contexte national	
2. Visualiser l'invisible	43
3. Les fluides à l'ère de la révolution neuro-morphique	44
4. Instrumentation aux limites	44
Contexte sociétal - Enjeu scientifique - Contexte international - Contexte national	
5. Plasmas	45
Contexte sociétal	
Enjeu scientifique	
VI. Matériaux du futur	45
1. Matériaux et micro/nanotechnologies, micro/nanosystèmes, photonique, électronique, électromagnétique, et énergie électrique	46
Un focus appuyé sur les matériaux et surfaces architecturés, les métamatériaux et métasurfaces	
2. Matériaux et mécanique des solides, des structures, biomécanique et acoustique	47
Du procédé aux propriétés mécaniques du produit	
Matériaux architecturés et métamatériaux	
3. Matériaux et milieux fluides et réactifs pour les transports, les transferts et procédés de transformation	49
Nouveaux matériaux sous hauts flux	
Nanomatériaux et nano/micro dispositifs dans le domaine de l'énergie	

Introduction générale

La recherche en sciences de l'ingénierie est par essence une recherche à vocation appliquée et habilitante, dont la finalité est de faire progresser les connaissances et technologies pour accompagner les transformations annoncées ou à venir de la société. Elle est à ce titre en prise directe avec les enjeux sociétaux et socio-économiques, et revêt naturellement un caractère hautement trans- et pluridisciplinaire en synergie avec tous les acteurs de la recherche, en parallèle d'un partenariat omniprésent avec le monde industriel. L'évolution considérable de ces sciences a profondément contribué à façonner les modes de vie au fil des décennies. C'est pourquoi, tout en veillant à ce que des recherches amont les enrichissent, il est important de situer les sciences de l'ingénierie par rapport aux enjeux sociétaux auxquels elles se rattachent. Parmi ces enjeux, la lutte contre le réchauffement climatique et la préservation des ressources et de la biodiversité s'imposent comme des priorités absolues, appelant une réponse collective à la hauteur de l'urgence. Pour en illustrer l'ampleur, rappelons qu'au niveau mondial le secteur de la construction génère à lui seul 10 % des émissions de gaz à effet de serre (GES), tandis que les technologies de l'information et de la communication sont responsables d'environ 4 % de ces émissions - un chiffre en hausse et comparable à l'empreinte de l'aviation civile.

La prospective « sciences de l'ingénierie 2030 » s'inscrit pleinement dans le cadre de la transition écologique et du développement durable en préconisant des recherches capables de faire émerger des technologies moins polluantes, moins consommatrices d'énergie et de ressources, et d'imaginer des solutions efficaces pour leur recyclage.

Cette prospective est également motivée par l'enjeu de la compétitivité. Les thèmes de recherche qui y sont décrits visent à maintenir notre position vis-à-vis des autres puissances scientifiques et industrielles, afin de ne pas perdre la valeur ajoutée technologique et économique qui en découle. Cependant, il est crucial de trouver un équilibre entre compétitivité et durabilité. Une focalisation excessive sur la compétitivité, comme cela a été le cas dans nos sociétés depuis des décennies, entretiendrait une fuite en avant incompatible avec la préservation de notre planète. Cette problématique difficile, qui met en tension le développement durable et la compétitivité, dépasse de loin le cadre des sciences de l'ingénierie et questionne l'ensemble de la société. Pour demeurer pertinentes et utiles, les sciences de l'ingénierie doivent intégrer ces préoccupations dans le développement des innovations qui répondent aux défis de notre temps. Elles devront le faire en intégrant les apports des autres sciences et en suivant utilement les recommandations du Comité d'éthique du CNRS dans son avis "Intégrer les enjeux environnementaux à la conduite de la recherche - Une responsabilité éthique. Dans cette optique, il sera crucial d'optimiser l'ensemble du cycle de vie des systèmes, technologies et produits issus des sciences de l'ingénierie. De l'extraction des matières premières aux procédés de fabrication, jusqu'au recyclage et au réemploi en fin de vie, chaque étape devra être repensée pour minimiser les impacts environnementaux et la consommation de ressources. Par ailleurs, l'élaboration de projets de recherche d'envergure en sciences de l'ingénierie devra intégrer une mesure la plus objective possible de l'impact environnemental des innovations visées. Cette évaluation doit prendre en compte l'usage effectif de ces innovations, notamment dans le domaine numérique où l'effet rebond lié aux nouvelles technologies peut être significatif. Il est donc essentiel de développer des outils permettant d'anticiper ces usages afin d'estimer précisément leur empreinte écologique.

Enfin, la conduite même de la recherche au sein des unités devra adopter une approche responsable et frugale. Cela impliquera probablement une mutualisation accrue des ressources, telles que les équipements expérimentaux, les codes numériques et les méthodes d'analyse. La mise en place de bases de données en accès ouvert sera également un élément clé de cette démarche, favorisant une recherche plus collaborative et efficiente. Ce document de prospective propose de décliner pour les sciences de l'ingénierie les thématiques de recherche stratégiques à l'horizon 2030. Il s'articule autour de six chapitres, dont les quatre premiers sont consacrés aux enjeux sociétaux majeurs (environnement, énergie, numérique, santé) tandis que les deux derniers sont focalisés sur des problématiques amont (développement des connaissances, des sciences fondamentales et des matériaux du futur).

I. Ingénierie pour l'environnement et le développement durable

Dans le contexte de la crise environnementale actuelle et de la recherche d'un mode de développement humain respectueux des équilibres de la planète et de sa finitude, les sciences de l'ingénierie devront faire leur aggiornamento en intégrant les notions de cycle de vie des objets innovants qu'elles inventent. Il faudrait aussi favoriser les recherches sur le vieillissement et la durabilité des matériaux et des structures existants et futurs, afin de rallonger leur durée de vie. Dans le secteur de la construction, grand émetteur de gaz à effet de serre (GES), la forme des structures, le choix des matériaux, les procédés constructifs et les méthodes de dimensionnement devront être repensés. Il est par ailleurs nécessaire de développer des recherches sur la prévention, la gestion et l'évaluation des risques liés au changement climatique, la réduction des nuisances sonores, dans un environnement impacté par ce changement.

Les enjeux environnementaux et de durabilité s'étendent également au domaine des capteurs et systèmes de mesure. L'accent est mis sur la miniaturisation, la connectivité, la mise en réseau, la sobriété énergétique et la soutenabilité. La métrologie dans des conditions extrêmes et complexes pose de nouveaux défis, notamment en termes d'accessibilité, d'environnements sévères et de problématiques multi-échelles temporelles et spatiales. Le déploiement à grande échelle des capteurs soulève des questions cruciales de gestion des données, incluant leur production, leur analyse, l'amélioration de leur qualité métrologique, leur robustesse, ainsi que l'exploitation de nouveaux types d'informations. Ces aspects, intrinsèquement liés aux enjeux du numérique, seront approfondis dans les chapitres suivants du rapport, offrant ainsi une vision complète des défis et opportunités de l'ingénierie pour l'environnement et le développement durable.

II. Ingénierie pour la transition énergétique

Pour lutter efficacement contre le réchauffement climatique, il est impératif d'optimiser voire diminuer l'énergie consommée (sobriété) et de la décarboner, l'objectif étant d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050. Cette transition énergétique nécessite une transformation massive de nos modes de production et notre consommation d'énergie. Il faudra développer de nouveaux procédés de stockage, récupération, intégration et conversion de l'énergie, de nouveaux matériaux et carburants. Il faudra aussi savoir gérer le sous-sol de manière éco-responsable (géothermie, stockage d'énergie, séquestration de déchets...) pour réussir cette transition. Ceci va également conduire à une profonde mutation dans le domaine de l'énergie électrique, à la fois pour satisfaire les nouveaux besoins (véhicule électrique, production de chaleur utile...), mieux gérer la production diffuse et intermittente des sources renouvelables,

minimiser les pertes à la conversion, et maintenir la stabilité et la qualité du réseau électrique. Ce changement majeur devra notamment être soutenu par la recherche en électronique de puissance et par le développement des réseaux électriques et des sources d'énergie renouvelables comme le photovoltaïque, aussi bien au niveau des technologies, des composants et des systèmes.

III. Ingénierie pour la transformation numérique

Dans tous les domaines, nous assistons à l'accélération de la révolution numérique. L'acquisition de données massives et leur traitement par des algorithmes sophistiqués, notamment grâce à l'Intelligence Artificielle (IA), prennent une importance sans précédent. Cette évolution a d'ailleurs été reconnue au plus haut niveau, comme en témoignent les deux prix Nobel en lien avec l'IA décernés en 2024. Dans ce contexte de transformation numérique accélérée, CNRS Ingénierie est appelé à jouer un rôle essentiel. Déjà très présent dans les domaines clés des technologies des semi-conducteurs, des composants et des circuits électroniques, sa position en tant qu'acteur majeur de cette mutation technologique doit maintenant être renforcée.

Il devra favoriser le développement de nouveaux outils numériques pour la conception de matériaux, de systèmes, de composants, de circuits et d'architectures intégrées. Par ailleurs, la crise récente de la pénurie des semi-conducteurs et la question de la disponibilité des ressources ont rappelé que la maîtrise des filières technologiques au sens général est plus que jamais un enjeu de souveraineté nationale et européenne. Dans ce contexte, il apparaît essentiel que CNRS Ingénierie intègre cet enjeu dans ses recherches. En particulier, concernant la transformation numérique, qu'il continue d'intervenir avec force dans les technologies de cybersécurité, les technologies quantiques ou la maîtrise de l'intégration hétérogène. Et qu'il intervienne de manière déterminante dans le domaine du spatial, où ont émergé une multitude de concepts et technologies de rupture, notamment pour la couverture Internet planétaire via les méga-constellations de satellites. Dans ce contexte, les nouvelles technologies de communications à longue distance, radiofréquences et optiques, sont clairement stratégiques et doivent être soutenues.

Il faudra explorer les possibilités offertes par l'IA et les jumeaux numériques pour mieux maîtriser les systèmes tout au long de leur cycle de vie, pour augmenter notre connaissance de ces systèmes et ouvrir un large champ de prédictions, tout en étant vigilant sur le potentiel risque numérique associé. Et d'un point de vue plus fondamental, les nouvelles possibilités numériques devront interroger les relations au sein du triangle « théorie physique / expérimentation / données » qui est au cœur des sciences de l'ingénierie. En particulier, il sera important d'acquérir de nouvelles données expérimentales, fiables et pertinentes (de nouvelles métrologies devront voir le

jour), mais aussi de pouvoir réinterpréter des données existantes. Pour ce faire, il faudra privilégier la mise en place de plateformes mutualisées, expérimentales et de données, qui soient pilotées par des algorithmes adaptés.

IV. Ingénierie pour la santé

CNRS Ingénierie est un acteur important de l'ingénierie pour la santé qui regroupe les activités de recherche visant l'amélioration de la santé humaine en agissant à la fois en amont de la maladie (prévention, dépistage) et lorsque la maladie est déclarée (diagnostic, thérapie, suivi). Ce domaine de recherche bénéficie généralement d'un soutien public appuyé car il répond à une attente sociétale forte, qui se décline à travers le concept de médecine 6P : prédictive, préventive, personnalisée, participative, fondée sur les preuves et intégrée au parcours de vie. Le vieillissement de la population, le développement des maladies chroniques et les maladies émergentes renforcent cette attente de la société. CNRS Ingénierie dispose des expertises nécessaires au développement de technologies de rupture performantes, flexibles et repositionnables, déployables à grande échelle.

Dans les années qui viennent, il devra développer la modélisation du vivant pour ouvrir des perspectives disruptives pour la compréhension des maladies et pour l'innovation thérapeutique. Par ailleurs, il faudra faire émerger de nouvelles technologies pour le dépistage et le diagnostic reposant sur de nouvelles générations de capteurs implantés ainsi que sur des concepts innovants d'imagerie médicale portable et hybride. Mais aussi de nouvelles technologies pour la thérapie issues des nouveaux dispositifs biologiques/technologiques implantés, de l'intégration de robots miniaturisés, sûrs et autonomes, des thérapies physiques permettant un traitement local optimisé et de nouvelles stratégies de production et de délivrance des médicaments.

V. Ingénierie pour le développement des connaissances et des sciences fondamentales

L'ingénierie joue un rôle central dans l'évolution de la recherche scientifique, servant de catalyseur pour le développement des connaissances et l'avancement des sciences fondamentales. Parmi les nombreux axes où l'ingénierie s'avère être un levier essentiel pour l'innovation et la découverte, cinq domaines sont soulignés dans cette prospective pour leur potentiel transformateur : l'imagerie optique aux limites, la visualisation de l'invisible, la technologie neuromorphique, l'instrumentation aux limites, et les plasmas. Ces domaines, qui illustrent la convergence entre ingénierie de pointe et sciences fondamentales, montrent comment les avancées

technologiques peuvent repousser les frontières de notre compréhension, de l'infiniment petit à l'infiniment grand.

L'imagerie optique aux limites s'appuie sur des expertises larges en photonique, électromagnétisme, micro-électronique, et traitement du signal pour développer des systèmes d'observation toujours plus performants. Ces avancées trouvent des applications dans des domaines très variés comme l'astronomie, la biologie, la défense, et la médecine. Parallèlement, la visualisation de l'invisible, notamment à travers le développement de particules traceurs fonctionnalisées, ouvre de nouvelles perspectives pour l'étude des fluides et des phénomènes complexes.

La technologie neuromorphique promet une véritable révolution dans notre approche de l'acquisition et du traitement des données, avec des implications majeures pour ce type de métrologie et au-delà. Par ailleurs, l'instrumentation aux limites, illustrée par des projets ambitieux comme les interféromètres pour la détection d'ondes gravitationnelles, repousse les frontières de la précision et de la sensibilité des mesures. Enfin, le domaine des plasmas soulève des questions fondamentales nécessitant de nouveaux développements en métrologie et instrumentation, tout en s'appuyant sur la modélisation numérique avancée. Les plasmas offrent des applications prometteuses dans divers domaines sociétaux, grâce à leurs propriétés réactives uniques.

La recherche en ingénierie catalyse à la fois des avancées majeures dans de multiples disciplines et stimule l'innovation technologique. L'approche interdisciplinaire est essentielle pour relever les défis complexes d'une recherche scientifique ambitieuse et pour favoriser le transfert de connaissances vers l'industrie. Le succès de ces efforts repose sur une synergie entre une communauté scientifique dynamique et un tissu industriel innovant, pour laquelle l'Institut CNRS Ingénierie doit jouer un rôle central.

VI. Matériaux du futur

Dans un grand nombre de domaines de l'ingénierie, les matériaux sont essentiels à la tenue mécanique et au contrôle des écoulements de flux, ou à la maîtrise des processus de propagation, de diffusion, ou de radiation, puisque c'est dans leurs volumes ou à leurs interfaces que s'effectuent les interactions. La diversité des matériaux est cependant restreinte, et cela réduit considérablement le nombre de degrés de liberté dès lors que l'on recherche des propriétés physiques particulières (permittivité, perméabilité, conductivité, élasticité, résistance, ténacité, ductilité...), avec le souci additionnel d'en contrôler l'anisotropie, l'inhomogénéité, la non-linéarité et la robustesse aux contraintes d'environnement.

Ce constat motive, depuis de nombreuses années, les efforts intenses consentis pour conférer aux matériaux des propriétés intrinsèques artificielles, grâce à un processus d'homogénéisation multi-échelle induit par une

structuration/organisation imposée en surface ou en volume, de nature aléatoire ou déterministe. On parle de Matériaux Architecturés pour faire référence à des propriétés (thermo) structurales et de Métamatériaux lorsqu'on fait référence à des propriétés ondulatoires (acoustiques, optiques ou électromagnétiques). Dans les deux cas, il s'agit de contrôler la forme et l'arrangement de la matière dans l'espace (et dans le temps) pour répondre à des cahiers des charges de plus en plus complexes, pour obtenir des propriétés nouvelles (dans le sens n'existant pas naturellement) ou pour élaborer des réponses complexes à des sollicitations.

Ces matériaux artificiels, résultant d'une structuration artificielle de la matière, en particulier dans les matériaux semiconducteurs, interviennent dans une majorité de systèmes modernes indispensables aux sciences de l'ingénieur, elles-mêmes omniprésentes dans la quasi-totalité des secteurs (numérique, télécommunications, espace, observation de la terre, défense, IoT, énergie, vivant, environnement...). Leur émergence est récente

puisque'elle s'est appuyée sur le développement des micro- et nanotechnologies, conjointement à la puissance des calculateurs. Malgré ce contexte, les nouvelles possibilités offertes par ces matériaux restent insuffisamment explorées et méritent d'être soutenues.

Quant aux matériaux plus classiques et de grande diffusion (métaux, semiconducteurs, céramiques, polymères...), le principal défi à relever concerne l'optimisation de la chaîne allant du procédé de fabrication du matériau aux propriétés du produit qui l'utilise. Cette optimisation passe par la compréhension, l'identification et la caractérisation aux échelles d'intérêt des phénomènes couplés et complexes se produisant à chaque étape. Ce travail fondamental, qui a déjà commencé il y a une cinquantaine d'années, doit donc être poursuivi en vue de l'amélioration des propriétés visées et de la réduction du coût énergétique des procédés de mise en œuvre. de plateformes mutualisées, expérimentales et de données, qui soient pilotées par des algorithmes adaptés.

I - Ingénierie pour l'environnement et le développement durable

La crise écologique actuelle résulte d'un mode de développement qui ne gère pas suffisamment bien ses effets néfastes sur l'environnement. Qu'il s'agisse des émissions de gaz à effet de serre, de dégradation de la biodiversité, de pollution, d'épuisement de ressources et de bien d'autres impacts, les sciences de l'ingénierie se doivent de les intégrer dans leur démarche.

Dans ce chapitre, on présente six axes de recherche pour avancer dans cette direction. Le premier est consacré à la prise en compte du cycle de vie des matériaux et des structures dès leur conception. Puis le deuxième axe s'intéresse au vieillissement et à la durabilité des matériaux et des structures dans leur environnement dans l'objectif de rallonger leur durée de vie. Dans le troisième axe, on aborde les problématiques de recherche posées par la construction qui a un impact environnemental considérable, avant de s'intéresser dans le quatrième axe à la prévention, gestion et évaluation des risques environnementaux (incendies, polluants...). Enfin, on décrit dans les deux derniers axes les thématiques qu'il faudrait développer en géomécanique et en acoustique. Quant à la transition énergétique (décarbonation, électrification...), elle fait l'objet du prochain chapitre qui lui est entièrement dédié. Enfin, les enjeux environnementaux et de durabilité concernant le développement de nouveaux capteurs et systèmes de mesure, la métrologie, la gestion des données seront abordés dans les autres chapitres, notamment celui sur la transformation numérique.

1. Cycle de vie et des structures

De nombreuses problématiques liées à l'objectif d'un développement durable sont englobées aujourd'hui dans le concept de cycle de vie des produits. Cette notion cruciale est définie au niveau international à travers la méthode normalisée d'analyse de cycle de vie, qui vise à effectuer un bilan environnemental des produits, de l'extraction des matières premières nécessaires à leur fabrication jusqu'à leur fin de vie (destruction, recyclage...), en passant par leur production, leur utilisation, les différentes étapes de transport, sans oublier la gestion des infrastructures.

Les sciences de l'ingénieur doivent contribuer encore davantage à l'optimisation des cycles de vie des produits. Il est désormais indispensable, dès l'étape de recherche et innovation, de prendre en compte cette exigence et de coordonner les efforts de tous les chercheurs pour donner l'image la plus complète de tout nouveau matériau. Autrement dit, **il faudra décrire d'emblée l'évolution des propriétés microscopiques et macroscopiques d'un matériau innovant tout au long de la vie du produit industrialisé.** Il ne s'agit cependant pas ici de se substituer aux industriels dans la recherche de matériaux qui pourraient être industrialisés, mais de mener des recherches en amont de l'innovation **pour offrir à la communauté l'ensemble des données nécessaires à la réflexion sur l'utilisation des matériaux développés.**

On propose donc **une rupture dans l'approche scientifique en menant sur tout matériau innovant le plus large travail d'anticipation possible** en tirant profit de l'arsenal de connaissances et de techniques développées sur les matériaux existants. Une réflexion aussi vaste et ambitieuse ne pourra être menée qu'en **coordonnant les efforts de chimistes, physiciens, mécaniciens, écologues..., chercheurs et ingénieurs.** Cela implique **une organisation en réseau avec des compétences bien identifiées dont il faudra pouvoir activer efficacement les différents maillons** à chaque fois que nécessaire ; pour être viable, un tel réseau devra être coordonné à temps plein par plusieurs chercheurs.

Pour comprendre les problèmes auxquels il faudra répondre, prenons quelques exemples concrets, à diverses étapes d'un cycle de vie. Lorsqu'un nouveau matériau émerge, la problématique initiale est celle de la matière première, de son abondance, de son extraction et de son caractère renouvelable. Ici, les sciences de l'ingénieur interviennent déjà par exemple pour les ressources qui impliquent un stockage géophysique et devront être mobilisées avec le savoir-faire déjà développé. S'agissant de matières premières végétales, aujourd'hui privilégiées, les sciences de l'ingénieur ont un rôle crucial à jouer dans l'optimisation de l'extraction des fibres.

En restant à l'échelle du matériau, il faudra d'emblée penser à l'ensemble de sa vie et à son recyclage, et faire appel au savoir-faire en ce qui concerne **le vieillissement, la fatigue, l'usure** des matériaux. Il faudra de plus contribuer aux recherches sur la **réparabilité** de ces matériaux, en lien avec physiciens et chimistes, ou encore spécialistes du génie des procédés pour mettre en œuvre, par exemple,

des méthodes nouvelles issues de la fabrication additive.

Le recyclage des matériaux est dans le meilleur des cas à boucle fermée : on récupère ainsi un matériau « neuf » à l'issue de cette étape. C'est le cas, par exemple, des alliages métalliques de grande diffusion ou encore pour les verres les plus basiques. Pour des matériaux plus complexes, le matériau récupéré à l'issue de cette étape a des propriétés dégradées. Pour des alliages en développement comme les alliages à haute entropie (HEA), la recyclabilité n'est pas encore avérée, sans que cela n'empêche les recherches sur leurs propriétés ou leur mise en forme. Plus généralement, le réemploi sous forme dégradée est le cas le plus fréquent. Différents traitements sont utilisés dans le recyclage, il peut s'agir de **traitements chimiques, thermiques ou encore mécaniques** (notamment le broyage). Là encore, les sciences de l'ingénieur, avec le savoir-faire acquis dans l'impact des modifications chimiques (qu'on pense à la corrosion), thermiques (par exemple en métallurgie), et mécaniques (notamment dans le domaine des composites fibreux), auront un rôle majeur à jouer pour caractériser, comprendre, et prévoir le comportement du matériau sous toutes ses formes. La robustesse de son comportement face aux **défauts et anomalies** devra faire l'objet d'une attention toute particulière, notamment afin de prévoir sa durée de vie sur de longues voire très longues périodes face à de multiples sollicitations (vibratoire, thermique, chimique, mécanique, irradiation).

Les différentes options de mise en œuvre du matériau devront être envisagées sans restriction, avec toute la palette de procédés thermomécaniques et de fabrication additive, dont l'impact sur les propriétés d'usage devra être clairement identifié. L'écologue fera ensuite les bilans écologiques associés.

Enfin l'utilisation du matériau sous toutes formes de structures compatibles avec ses propriétés d'usage devra être envisagée. Ici, un travail avec les mathématiciens et numériciens sera indispensable pour identifier les structures optimales. Dans ce contexte, **l'optimisation couplée de propriétés physiques, chimiques et mécaniques** reste un défi important (par exemple, légèreté et ténacité, ou encore résistance mécanique et résistance au frottement). De plus, on devra songer à innover dans l'établissement de structures démontables, ce qui pourra avoir un impact fort sur le recyclage.

2. Vieillessement et durabilité des matériaux et des structures dans leur environnement

Les composants industriels et les ouvrages d'art sont soumis aux contraintes mécaniques en service et aux agressions de l'environnement. Le vieillissement accéléré sous sollicitations hydro-thermo-mécaniques, notamment en lien avec le changement climatique, doit faire l'objet de diagnostics réguliers grâce aux méthodes de contrôle non destructif et du **"Structural Health Monitoring"**, à partir de données multiphysiques et multimodales. Le contrôle du vieillissement des matériaux et des structures

dans leur environnement nécessite un effort considérable de modélisation et de simulation des couplages entre mécanique et environnement. Les **méthodes de prévision de durée de vie initiale ou résiduelle** en sont encore aujourd'hui à leurs balbutiements. Toutes les classes de matériaux sont concernées : métaux et alliages, polymères, céramiques, génie civil et géo-matériaux, etc.

La prévision de la durabilité des matériaux et structures, systèmes, assemblages, dans leur environnement, sujets aux phénomènes du vieillissement, nécessite la **compréhension des mécanismes élémentaires de déformation et d'endommagement**. Il faut concevoir des essais accélérés, d'une grande complexité de préparation et d'interprétation. La corrosion et l'usure des pièces restent mal comprises, et on ne prend souvent pas le temps nécessaire pour en comprendre les mécanismes. La durabilité ne se limite pas à la prévision de la durée de vie, mais concerne aussi la nécessité **d'utiliser les matériaux le plus longtemps possible** (pour la "soutenabilité", le développement durable) et **l'extension de durée de vie** de certains composants (cas du nucléaire et des transports).

La mécanique de la rupture et de l'endommagement a connu des développements considérables durant les 50 dernières années. Cependant, prévoir la durée de vie des composants demeure un défi majeur aujourd'hui. Les approches expérimentales, théoriques et numériques récentes doivent être mises en œuvre pour tisser des liens plus étroits entre les mécanismes physiques de **rupture fragile, ductile et de fatigue, et la simulation de l'amorçage et de la propagation des fissures**. La **fatigue thermomécanique** doit attirer plus d'efforts en raison de la complexité des mécanismes à l'œuvre à la surface et dans le volume des matériaux et des structures sous chargements multi-axiaux cycliques.

Cela suppose également une connaissance approfondie des **lois de comportement élastoviscoplastique** des matériaux et la compréhension des **effets d'échelle associés aux phénomènes de plasticité, de rupture et d'endommagement** (compétition surface/volume, statistique des défauts, miniaturisation des composants). **Les problèmes de contact, de frottement et d'usure** sont omniprésents dans ce contexte de dégradation de la matière et exigent une attention accrue.

Les phénomènes de rupture et d'endommagement sont intrinsèquement multi-échelles. Observés à l'échelle macroscopique, ils impliquent des processus partant de l'échelle atomique des cœurs de dislocations, en passant par l'échelle du micron des microstructures intragranulaires.

Construire les lois de comportement à l'échelle macroscopique à partir de modèles physiques aux échelles inférieures est l'objet de la **modélisation multi-échelles** qui reste un enjeu majeur dans de nombreux domaines. Un cas emblématique est la prolongation de l'exploitation des centrales nucléaires qui ne pourra être décidée de façon rationnelle que si l'effet de **l'irradiation** est compris et intégré sur les échelles allant de l'atome à la structure. Les progrès constants en **infrastructures de calcul** (développement des cartes GPU pour le calcul scientifique)

et des modèles physiques (faisant appel à l'intelligence artificielle) permettent d'envisager des progrès rapides.

Concernant le **couplage mécanique et environnement**, la corrosion sous contraintes représente une menace insidieuse et omniprésente au fonctionnement des structures métalliques. Sa compréhension fait appel au **couplage de la mécanique avec la chimie et la métallurgie physique**, au travers des processus **d'oxydation**, de réactions électrochimiques et d'endommagement associé. Il n'existe pas aujourd'hui d'approche d'ensemble de ces phénomènes permettant de relier les expérimentations complexes avec des modélisations multiphysiques adéquates. Il est important de coordonner dans une approche transdisciplinaire les efforts nécessaires au sein de CNRS Ingénierie pour lever **le verrou de la simulation de la corrosion sous contraintes**. La compréhension du vieillissement des matériaux passe également par la prise en compte des changements de phase à l'état solide et des évolutions de microstructure sous chargement thermomécanique. Il faut noter que le corpus théorique nécessaire est proche de celui requis pour la **modélisation des batteries de stockage électrique**, domaine de modélisation qui a fleuri récemment, dont le développement est urgent aujourd'hui et à rapprocher des préoccupations précédentes.

La **fragilisation par l'hydrogène** s'appuie également sur le couplage mécanique-diffusion et représente un axe essentiel de l'étude du vieillissement, notamment en raison de l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur de stockage d'énergie. Le transport et le stockage de l'hydrogène s'accompagnent de phénomènes de fragilisation, notamment dans les alliages métalliques, dont la prévision est aujourd'hui délicate. Le vieillissement concerne également les polymères, notamment en vue du recyclage/décyclage, et les composites, en particulier pour l'industrie aéronautique et la production d'énergie renouvelable.

Enfin, le **vieillessement des installations nucléaires (fission, fusion)** exige une analyse, aujourd'hui incomplète, couplant corrosion et irradiation, des mécanismes sévères de dégradation en service. Les progrès récents en modélisation multi-échelles, notamment le développement de **modèles d'interactions atomiques** représentant fidèlement la liaison chimique grâce à des approches d'apprentissage automatique, permettent d'intégrer des aspects de chimie dans des études à la fois multi-échelles et multi-physiques de la plasticité des matériaux. Un objectif dans ce contexte est d'accélérer l'exploration des nouveaux matériaux grâce à des méthodes automatiques de construction et de criblage de vastes bases de données de matériaux.

Prolonger la durée de vie par une meilleure estimation ou/et par des interventions directes de protection ou de réparation s'impose comme une nécessité dans un contexte de développement durable et d'ingénierie frugale. Dans ce domaine, le développement des techniques de simulation numérique du soudage et des procédés rend possible la réalisation de procédés de fabrication et de réparations contrôlés et pilotés par ordinateur (Data Driven Welding).

Ces nouveaux procédés permettront d'accroître la maîtrise de la fabrication et de la réparation des composants des installations industrielles les plus sensibles. **Les méthodes de contrôle non destructif (CND)** mécaniques, acoustiques ou électromagnétiques sont mises à contribution pour mettre en place un **contrôle de santé intégré** (Structural Health Monitoring). Ce dernier requiert le développement et l'intégration de matériaux et structures intelligents : senseurs, matériaux auto-réparateurs, textiles intelligents, CND en temps réel, etc. La démarche concerne aussi bien l'industrie (maintenance des moteurs d'avion, suivi de l'endommagement des matériaux composites) que le génie civil dans le contexte de la ville connectée (smart city) qui intègre les technologies de l'information et de la communication pour les habitants/visiteurs mais aussi pour le suivi des installations. Les techniques de **réparation** passent notamment par la fabrication additive pour les polymères, les métaux ou le béton.

3. La construction du futur

Mondialement, le secteur de la construction génère approximativement 100 milliards de tonnes de déchets et est responsable de 10% des émissions de CO₂ chaque année.

Alors que nous produisons 4 milliards de tonnes de ciment par an, la production d'un kilogramme de ciment représente peu ou prou 2 kg d'émissions de CO₂. C'est dire l'enjeu du domaine de la construction et du génie civil dans la limitation globale des émissions mondiales et plus généralement des impacts environnementaux.

C'est dans cette perspective que bâtiments et ouvrages du génie civil devront s'approprier l'antienne : « le bon matériau au bon endroit pour le bon usage. » Cela passera par l'utilisation renforcée de **matériaux bio-sourcés et géo-sourcés**, ainsi qu'un recours accru à la mixité de matériaux, par une recherche **d'économie de matière et d'optimisation des procédés**, en s'appuyant sur la **bio-inspiration et la construction numérique** (notamment fabrication additive, optimisation topologique, architecturation multi-échelle, etc.).

Pour les ouvrages à haute résistance mécanique tels que les ouvrages de l'industrie nucléaire, les techniques de Steel Concrete Structures (SCS) et la préfabrication en usine pourront permettre des gains substantiels en performance et en coût. Le **recyclage des matériaux** et, mieux encore, des **éléments de construction** en vue de leur réemploi, seront un enjeu majeur de la construction du futur, dans une idée de **circularité**. Les différentes solutions techniques envisagées devront être évaluées dans le cadre générique de l'analyse de cycle de vie qui interrogera continuellement les questions de performance environnementale dans leur globalité, avec toute la complexité des systèmes ouverts. En outre, dans une volonté de zéro artificialisation nette, on cherchera à « construire la ville sur la ville », ce qui passera par un dimensionnement agile d'ouvrages hétérogènes **combinant construction neuve et réhabilitation des bâtiments anciens**.

Ces aspects de maintenance et de réparation des constructions exigent, par ailleurs, un développement de connaissances approfondies sur la **durabilité des matériaux** (endommagement physico-chimique, comportement sous sollicitations complexes et extrêmes...) ainsi que des moyens d'auscultation et de caractérisation performants. La résistance aux phénomènes extrêmes (séismes et autres catastrophes naturelles) et l'adaptation aux évolutions des sollicitations (variation thermique, hydrique ou des charges de trafic, etc.) sont également des préoccupations importantes dans le contexte d'activités humaines changeantes et du réchauffement climatique.

Les études de l'impact du bâti incluront également celui de ses fondations. On cherchera tout autant à améliorer la **conception des systèmes de consolidation des sols** (ciments ou bio-cimentation, morphologie) qu'à introduire une multifonctionnalité des bâtiments et de leurs fondations en **couplant mécanique, géothermie et acoustique**. Enfin, au-delà d'une limitation de l'impact du bâti sur le vivant, on cherchera à inclure le vivant dans le bâti, à penser des ouvrages pour restaurer les continuités écologiques.

Le couplage entre modélisation et expérimentation prendra une part croissante avec notamment la mise en place de **jumeaux numériques d'ouvrages munis de capteurs adaptés et le développement du contrôle actif** tant pour les structures de laboratoire que les constructions civiles. L'objectif fondamental de ces évolutions est de limiter les sur-dimensionnements en accompagnant la pratique et en conservant les fonctionnalités.

4. Prévention, gestion et évaluations des risques

Sur le risque incendie

L'actualité récente a été marquée par des incendies de grande ampleur : les grands feux de végétation dont la fréquence et l'intensité sont favorisées par les changements climatiques (en 2023 en Amérique du Nord et en Grèce notamment), les feux de complexes industriels à l'image de l'incendie de l'usine Lubrizol en 2019, ou encore de biens patrimoniaux comme celui de la Cathédrale de Notre Dame. Les conséquences de ces grands incendies sont particulièrement sévères : destruction de biens et de la biodiversité, pollution atmosphérique dans un rayon de plusieurs centaines de kilomètres (voire au-delà pour les méga-feux de végétation) affectant les populations et les sols.

Le risque associé se situe à deux niveaux (notion d'aléa subi et d'aléa induit). La modification récente de certaines habitudes de conception dans les bâtiments (isolation renforcée, utilisation de matériaux biosourcés) ou dans les transports (moteurs à hydrogène, batteries électriques) induit également de nouveaux risques qu'il convient d'évaluer et prévenir. Ces risques doivent être appréhendés en termes de prévision, prévention, gestion, évaluation et lutte. Les transferts thermiques jouent un rôle clé aussi bien dans les conditions d'ignition, que dans la propagation, y

compris du panache et de ses polluants dans l'atmosphère, ou encore dans la lutte.

La thermique doit être couplée aux autres phénomènes de ce problème spécifiquement multi-physique et combiner méthodes classiques (CFD, métrologie thermique et fluide) avec des solutions en rupture offertes par exemple par l'intelligence artificielle. L'interdisciplinarité doit aller au-delà avec la prise en compte de facteurs climatiques (effet du réchauffement sur la végétation), écologiques (gestion de la forêt), anthropiques (95% des départs de feux est d'origine humaine en France), atmosphériques (génération de pyro-cumulonimbus et dispersion de polluants).

Les enjeux scientifiques associés concernent :

- la métrologie dans des conditions extrêmes et complexes (difficultés d'accès, problème multi-échelles, avec en particulier de grandes échelles de temps et d'espace) pour la caractérisation des matériaux et de la propagation de l'incendie et de ses produits
- la simulation fidèle du problème couplé (matériau, chimie, combustion, thermique, mécanique des fluides) de la petite échelle (dégradation du matériau, ignition) à l'échelle gigascopique pour le suivi du front de flamme et des polluants
- la prévention et la prévision, y compris en temps réel, dans une approche interdisciplinaire

Sur "Prévoir l'imprévisible"

Le monde qui nous entoure et l'essentiel de la matière dans l'univers, sont essentiellement constitués de fluides (gaz, liquide, plasma) et leurs écoulements sont majoritairement turbulents. Ils se caractérisent par une dynamique aléatoire et multi-échelle, à l'origine de fortes intermittences pouvant déclencher des événements extrêmes (tels que des fluctuations hors normes, ou des bifurcations entre états macroscopiques multi-stables) potentiellement dévastateurs et impactant durablement la nature et les activités humaines.

Les fortes canicules et violentes tempêtes (comme l'épisode meurtrier qui frappa la Corse en 2022, ou plus récemment la ville de Derna en Lybie), les pics de pollution urbaine aux particules fines, la crise d'ébullition menaçant la sécurité des installations nucléaires, les instabilités du plasma de fusion dans les Tokamaks, une rafale de vent anormalement intense détériorant une éolienne, la perte soudaine de portance d'une aile, etc. ne sont que quelques exemples marquants de tels événements extrêmes, surgissant subitement parmi les fluctuations turbulentes sous-jacentes, sans que nous sachions les anticiper. D'un point de vue statistique, ces événements sont qualifiés de rares, car ils surviennent sur des échelles de temps longues et imprévisibles par rapport aux échelles caractéristiques des écoulements sous-jacents. Dans le contexte des écoulements naturels, il est devenu flagrant aux cours des dernières années que du fait du réchauffement climatique, ces événements rares et extrêmes sont de moins en moins rares et de plus en plus extrêmes.

Comprendre l'émergence de ces événements, apprendre à les anticiper et à prédire avec suffisamment d'anticipation le lieu et l'instant où ils se produiront, est un enjeu essentiel à la fois pour la gestion des risques sur les installations industrielles et énergétiques que pour notre résilience face aux conséquences du changement climatique. Des avancées théoriques, numériques et métrologiques, couplées à des approches disruptives d'IA (les méthodes d'apprentissage requiert des données importantes pour être entraînées, hors par essence même, nous manquons de données concernant les événements rares, des approches d'IA guidées ou augmentées sont donc nécessaires dans ce cas précis) et de biomimétisme, notamment neuro-morphiques, laissent envisager aujourd'hui des possibles voies de recherche nouvelles pour le diagnostic des événements extrêmes et la détection de signaux faibles (souvent indirects) précurseurs de leur survenue. Des liens peuvent être établis entre les événements extrêmes et leur prévision dans le cas des phénomènes fluides ici développés, et la recherche de précurseurs dans d'autres systèmes, notamment en physique du solide, par exemple pour la prédiction de fractures/ruptures dans les matériaux ou encore la prédiction de séismes.

Risques liés à la dispersion d'agents nocifs, pathogènes et/ou polluants

Parmi les multiples couplages à l'œuvre dans les fluides précédemment évoqués, les propriétés de transport (de champs, phases et particules) des écoulements, notamment turbulents, jouent un rôle crucial dans de nombreux secteurs, et nous manquons encore cruellement de modèles pour être en mesure d'effectuer des prédictions fiables. Cela est particulièrement critique lorsque ces processus de transport sont liés à des risques susceptibles de mettre en danger la santé ou l'environnement. Un exemple emblématique qui a revêtu une importance toute particulière ces dernières années concerne la dispersion d'aérosols physiologiques susceptibles de transporter des agents pathogènes.

La difficulté à maîtriser la propagation fulgurante du Covid et à mettre en place des gestes barrières efficaces, repose en grande partie sur notre incapacité à prédire la dispersion des gouttelettes portant la charge virale. Notre connaissance du phénomène repose en effet grandement sur des modèles développés dans les années 1930, ignorant la complexité des couplages en jeu (transport turbulent des gouttelettes et des champs de température et d'humidité associés, rôle de l'inertie des gouttelettes, influence sur et du taux d'évaporation, effets des collisions/coalescence/fragmentation des gouttelettes, influence des circulations grande échelle et des fluctuations multi-échelles des écoulements sous-jacents, etc.). La prévention future des risques associés, l'établissement de gestes barrières appropriés, de stratégies de ventilation et de distanciation sociales pertinentes permettant de guider les services publics dans leur prise de décision requiert des avancées importantes sur ces questions. Des verrous scientifiques similaires concernent à différents niveaux d'autres situations où des agents potentiellement nocifs et/ou polluants sont dispersés dans les espaces publics

et/ou l'environnement. Ceci implique par exemple, la dispersion de particules radioactives lors d'un accident nucléaire, la dispersion d'OGM, le transport de particules fines dans les zones urbaines et les vallées, la dispersion de micro-plastiques dans les océans, la dispersion de cendres et les écoulements pyroclastiques lors des éruptions volcaniques, etc..

Risques climatiques

Au-delà des événements météorologiques extrêmes et des incendies précédemment mentionnés, qui sont amenés à se multiplier du fait du réchauffement climatique, de nombreux autres risques liés aux conséquences du changement climatique méritent des recherches dédiées et en collaboration avec d'autres instituts (INEE, INSU, SHS). Ceux-ci concernent par exemple l'évolution de la dynamique et de la morphologie côtière sous l'effet de l'élévation du niveau de la mer ; la gestion des ressources en eau, notamment souterraines, sous l'effet des sécheresses ; la gestion des inondations ; la compréhension des processus de fontes des glaces, sous l'effet de leur couplage avec l'atmosphère et avec l'océan ; repenser l'urbanisme pour mieux vivre les canicules ; etc.

5. Géomécanique pour l'environnement

La géo-mécanique sera un élément clé de l'**adaptation au changement climatique**, qu'il s'agisse de la stabilité des versants, ou de la résilience des infrastructures. La géomécanique intervient dans la maîtrise des risques, tant naturels (notamment sismiques) que techniques, par exemple en réponse à la nécessité de construire sur des sols de moindre qualité. Les recherches doivent être multi-échelles, de la microstructure à l'échelle du massif en passant par l'échelle du laboratoire ; multiphysiques ; et combiner des approches expérimentales, numériques et théoriques.

La géomécanique intervient en sismologie pour mieux caractériser les sources sismiques et la **propagation des ondes sismiques** avec les conséquences en termes de sûreté des structures du génie civil. L'échelle spatiale considérée inclut la maîtrise de l'**effet de site**, qui requiert la modélisation du comportement et des incertitudes dans les géomatériaux, en particulier au voisinage des fondations des ouvrages, en **interaction statique et dynamique** avec le sol. Plusieurs verrous subsistent : (1) comment intégrer et valoriser les données de reconnaissance et/ou de surveillance dans les simulations aux différentes échelles, (2) comment s'assurer des capacités de résilience des ouvrages, associées à une meilleure maîtrise des incertitudes. Ces besoins font appel à des méthodes de simulation haute performance, et à des méthodes d'apprentissage.

Un des exemples les plus visibles d'un point de vue géomécanique est celui de la **stabilité des versants naturels** : 250 éboulements dans le seul massif du [Mont-Blanc](#) en 2022, un nombre multiplié par dix depuis 1970... Il est donc nécessaire de mieux comprendre comment les

changements des paramètres climatiques (température, précipitations) impactent les mécanismes d'instabilité dans des massifs de sols et de roches. Il s'agit de définir des directions de recherche pour réduire les risques associés.

En milieu montagnard, l'aléa est accentué par la dégradation du permafrost et des changements dans la fréquence et l'amplitude des cycles gel/dégel, ainsi que par la modification de la nature et de la distribution des précipitations pluvio-nivales. Il est essentiel de mieux comprendre les couplages des **processus thermiques, hydriques et mécaniques** associés à l'eau dans les masses rocheuses fracturées et les sols, et les mécanismes de rupture affectant les versants. Ces édifices constituent des milieux complexes, au sein desquels des mécanismes de rupture catastrophique peuvent survenir en fonction des conditions environnementales.

6. La recherche en acoustique face aux enjeux climatiques, environnementaux et sociétaux

Face à l'impact grandissant des changements climatiques et environnementaux, il est impératif de développer des stratégies d'adaptation pour atténuer les conséquences et construire des sociétés plus résilientes. De par son caractère appliqué et pluridisciplinaire, la recherche en acoustique peut contribuer à cette évolution de plusieurs façons :

- par la conception de systèmes capables de s'adapter aux effets des changements climatiques sans détériorer l'environnement sonore (solutions **d'isolation acoustique** et de conception de bâtiments résilients aux conditions climatiques extrêmes)
- par le suivi des écosystèmes fragiles (méthodes de surveillance des espèces) et la protection de la communication acoustique animale (**réduction des nuisances sonores** d'origine anthropique)
- par la réduction de l'impact acoustique des technologies de production d'énergie (moyens de transport, éoliennes, etc.) durant leur installation et leur exploitation via, entre autres, l'intégration de l'intelligence artificielle à la surveillance acoustique en temps réel et à l'optimisation des systèmes énergétiques

Par ailleurs, les évolutions technologiques de la mobilité (électrification, véhicules autonomes, drones) et l'émergence de nouvelles formes urbaines (villes en hauteur, sur l'eau, végétalisées...) rendent nécessaire la description d'environnements sonores complexes pour permettre de concevoir des espaces sonores harmonieux.

Cette vision implique une collaboration étroite entre les domaines de l'architecture, de l'urbanisme, de l'**acoustique physique**, de l'**ingénierie acoustique**, de la **psycho-acoustique**, soutenus par les technologies issues de la géomatique, des sciences des données et de l'intelligence artificielle. Le développement de structures (GDR, GIS)

favorisant des échanges entre disciplines différentes sur un même sujet d'étude peut s'avérer une solution pertinente.

La lutte contre le bruit implique à la fois le développement de matériaux acoustiques avancés pour l'industrie, les transports, les bâtiments, l'environnement et la mise en place de moyens de **simulation acoustique pour la réalité augmentée et virtuelle** en intégrant des approches issues de **l'électroacoustique**, de la psycho-acoustique et du calcul numérique.

Ainsi, l'accroissement des capacités de calcul numérique associé à l'intelligence artificielle et aux sciences des données permettra de simuler des scénarios complexes

en acoustique, d'optimiser les designs et d'explorer de nouveaux concepts en rupture quels que soient les domaines d'application.

Le partage de données, la mutualisation d'outils de simulation et de calcul, le développement de plateformes communes de simulation, entre les acteurs concernés, semblent des solutions pertinentes, à condition que les procédures associées soient simples (pour faciliter l'accès aux ressources) et que les échanges/outils reposent sur des standards (pour faciliter l'interopérabilité des ressources).

II - Ingénierie pour la Transition Énergétique

L'utilisation d'énergie est une des principales causes du changement climatique. Rappelons que 80 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre associées à l'utilisation de l'énergie proviennent du CO₂ dégagé dans l'atmosphère par la combustion d'énergies fossiles. C'est l'impact principal mais notre consommation d'énergie génère également d'autres types d'émissions de gaz à effet de serre. Les émissions de méthane (CH₄) représentent 10 % des émissions liées à l'énergie. Elles sont notamment dues aux rejets dans les mines de charbon, les sites d'extraction de pétrole et de gaz fossile. Elles sont également émises lors de l'acheminement du gaz fossile, que ce soit par voie terrestre ou maritime. Plus marginalement à l'échelle mondiale, du méthane est émis par la biomasse (combustion incomplète du bois, fermentation au niveau des barrages). Par ailleurs, certains procédés industriels émettent directement du CO₂ comme la production de ciment ou de certains produits de l'industrie chimique. Ces émissions directes représentent 6% des émissions liées à l'utilisation d'énergie. Enfin d'autres sources d'émissions complètent le panorama : l'incinération des déchets, les émissions de protoxyde d'azote ainsi que les émissions de CO₂ dues au torchage du gaz naturel.

Au final, l'utilisation d'énergie a généré en 2023 plus de 75 % de l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre mondiales.

L'atténuation du changement climatique repose donc pour une large part sur la **transition énergétique**, c'est-à-dire l'abandon des sources d'énergie fondées sur le carbone fossile au profit d'énergies « bas carbone ». Cet objectif national et européen majeur suscite des développements technologiques et d'importants investissements. Les grandes orientations de recherche qui vont dans ce sens consistent à :

- *Concevoir des systèmes énergétiques décarbonés*
- *Piloter et optimiser la consommation, la production, le stockage et la distribution des différentes énergie (électricité, molécules, chaleur...)*
- *Transformer les usages de la société dans divers secteurs tels que le bâtiment, le transport, les télécommunications et l'industrie.*
- *Rationaliser l'utilisation de l'énergie à l'échelle individuelle et collective, qu'il s'agisse de l'optimisation des usages et de la réduction des consommations (sobriété)*

Plus concrètement, les recherches sur la transition énergétique dans le domaine de l'ingénierie devront s'atteler à relever plusieurs défis qui sont décrits dans la suite.

1. Défis de l'électrification

Contexte sociétal

L'énergie occupe une place centrale dans le fonctionnement économique et social de nos sociétés modernes, et l'électricité en est un pilier essentiel. Face à l'urgence climatique qui menace notre planète, la décarbonation de l'énergie devient une impérative nécessité, et l'électrification pour nos usages joue un rôle crucial dans cette transition. Selon le scénario proposé par l'Agence internationale de l'énergie pour une neutralité carbone, le secteur électrique devra fournir 37 000 TWh dans le monde en 2030. Cela correspond à une augmentation de 30 % par rapport à la production de 2021. La mutation à réaliser est donc considérable car le mix d'énergie primaire mondial de génération d'électricité est actuellement carboné à 65 %.

La génération d'électricité constitue actuellement le premier contributeur mondial d'émissions de GES d'origine anthropique, devant les transports ou les productions de chaleurs utiles dans l'industrie et le bâtiment. Il est donc évident que cette énorme demande doit être réalisée principalement grâce à l'utilisation de sources bas carbone, en particulier par les énergies renouvelables. Ainsi, la part des éoliennes et des installations solaires photovoltaïques doit au moins quadrupler d'ici 2030, en profitant de leur installation à faible coût et du soutien politique. Cette électrification massive est très attendue pour la décarbonation des secteurs des transports et de procédés industriels, et sera utile pour la production d'hydrogène bas carbone par exemple, vecteur important dans la transition énergétique.

La France, qui bénéficie pour sa part d'une électricité beaucoup moins carbonée grâce à la production électrique d'origine nucléaire (En 2022 : nucléaire 63 %, gaz 10 %, fioul < 1 %, charbon < 1 %, renouvelables 25 %), devra continuer à décarboner ses usages en augmentant la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique conformément à sa Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC 2050) qui fixe l'objectif « zéro émissions nettes en 2050 ».

Toutefois, la part grandissante de l'électricité issue de ce type de sources présente une particularité : elle est intermittente et le mode de production manque d'inertie, ce qui complique la stabilisation des réseaux électriques. L'intégration massive des sources renouvelables requiert des modifications profondes des réseaux et des modes de consommation de l'énergie électrique. Les réseaux doivent évoluer vers plus de flexibilité par l'introduction de systèmes de stockage pour assurer l'équilibre offre/demande et par la gestion fine et optimale des flux d'énergies entre sources, stockages et consommateurs. Ce constat implique une réflexion approfondie sur les réseaux électriques. Ceci a mené à l'apparition du concept de *Smart Grids* (réseaux intelligents), et de *Microgrids* à une échelle plus locale.

Les projections à long terme montrent le nécessaire monté en capacité des sources d'énergies renouvelables, naturellement décarbonées, dont les principales sont d'origine hydraulique, solaire et éolienne. Dans le domaine

de la production d'électricité à partir de l'énergie solaire, le photovoltaïque joue un rôle essentiel.

Les scénarios de transition énergétique qui attribuent un rôle central à l'énergie électrique, avec un mix largement dominé par des sources renouvelables d'électricité, impliquent également une électrification massive de nombreux usages finaux. La révolution de l'électrification touche donc également de nombreux autres domaines. Citons en particulier le secteur du transport et du bâtiment qui contribuent, au sein de l'UE, respectivement à 23 % et 14 % dans la production de gaz à effets de serre. Pour faire face à l'enjeu climatique, l'électrification massive des usages est également à l'œuvre dans ces domaines.

Enjeux scientifiques

Au-delà des événements météorologiques extrêmes et des incendies précédemment mentionnés, qui sont amenés à se multiplier du fait du réchauffement climatique, de nombreux autres risques liés aux conséquences du changement climatique méritent des recherches dédiées et en collaboration avec d'autres instituts (INEE, INSU, SHS). Ceux-ci concernent par exemple l'évolution de la dynamique et de la morphologie côtière sous l'effet de l'élévation du niveau de la mer ; la gestion des ressources en eau, notamment souterraines, sous l'effet des sécheresses ; la gestion des inondations ; la compréhension des processus de fontes des glaces, sous l'effet de leur couplage avec l'atmosphère et avec l'océan ; repenser l'urbanisme pour mieux vivre les canicules ; etc.

Notons particulièrement l'intégration du stockage massif dans une perspective système à travers les concepts V2G (*Vehicle-to-Grid*), V2H (*Vehicle-to-Home*) et V2B (*Vehicle-to-Building*). Ils permettent aux véhicules électriques et à leurs batteries de devenir une composante essentielle du réseau électrique, jouant un rôle actif dans son optimisation.

Plus globalement, les aspects de résilience et de cybersécurité des infrastructures électriques doit être renforcée pour garantir la fiabilité et la sécurité des réseaux électriques intelligents et des systèmes d'électrification avancés. L'utilisation de l'IA dans ces systèmes (et tout système) devra compenser la surconsommation électrique qu'elle génère, et s'appuyer sur la recherche vers des solutions d'IA 'verte' basée sur des nouveaux concepts de circuits intégrés (de type 'in-memory computing', logique non-volatile ou pour l'IA embarquée) et sur des technologies de rupture intégrant tous les aspects de la problématique: composants, circuits, architectures (notamment 3D), intégration et compatibilité avec les plateformes technologiques existantes.

Concernant certaines briques technologiques, l'amélioration des convertisseurs électroniques de puissance utilisés de plus en plus massivement dans les réseaux électriques, les sources, les éléments de stockage et les usages est un enjeu très important. Ces dispositifs sont en effet essentiels pour l'électrification car ils permettent d'adapter la forme de l'énergie électrique, d'adapter les niveaux de tension et de courant et de gérer les flux d'énergie. Concernant ces systèmes, les challenges scientifiques restent nombreux s'agissant, entre autres, d'augmenter les puissances massives et volumiques,

en d'autres termes, la compacité et le poids à puissance donnée, l'efficacité énergétique de la conversion, la fiabilité, la résilience aux pannes et la maîtrise des perturbations électromagnétiques conduites et rayonnées générées, en particulier, lors des commutations très rapides des composants à semi-conducteur de puissance. Un enjeu de taille concerne également l'impact environnemental de ces équipements avec des problématiques liées aux matériaux utilisés pour leurs fabrications, aux procédés de fabrication, au recyclage, à la réparabilité, au désassemblage, à la réutilisation de manière à insérer ces dispositifs dans une économie circulaire vertueuse. Une avancée majeure dans le domaine des convertisseurs réside dans l'utilisation de composants à semi-conducteur à large bande interdite ou grand gap.

Ces composants, tels que les transistors en nitrure de gallium (GaN) ou en carbure de silicium (SiC), offrent des propriétés uniques qui les rendent particulièrement adaptés à la conversion de l'énergie électrique dans de très nombreux domaines. Ils se distinguent par la capacité à fonctionner à haute tension, à haute fréquence tout en maintenant des pertes réduites, ce qui contribue à une meilleure efficacité énergétique et à une diminution des coûts d'exploitation. Au-delà de l'efficacité, le fonctionnement à haute fréquence permet d'augmenter très significativement la compacité, ce qui est crucial pour les applications nécessitant des installations dans des environnements contraints, comme les systèmes liés à la mobilité, l'alimentation de l'électronique embarquée, ou difficiles d'accès, comme les parcs éoliens en pleine mer ou les lignes HVDC longue distance. Des activités de recherche plus prospectives se concentrent sur l'utilisation de matériaux à ultra-large bande interdite (Diamant, Ga₂O₃, AlGaN,...). Les performances théoriques de ces composants pourraient engendrer une avancée technologique majeure dans le domaine de la conversion électronique de l'énergie électrique, similaire à l'impact actuel des composants à semi-conducteur à large bande interdite.

En ce qui concerne la production photovoltaïque, les efforts de recherche sont concentrés sur l'amélioration de l'efficacité de conversion dans le but de réduire la superficie nécessaire pour atteindre une puissance crête donnée et/ou de diminuer les coûts de ces dispositifs. Il existe donc un intérêt croissant pour le développement de nouveaux matériaux ou de nouvelles associations de matériaux, tels que les pérovskites, les cellules tandem pérovskite/silicium et les cellules organiques. Les travaux de recherche visent à comprendre et à améliorer leurs propriétés afin de permettre une fabrication et une utilisation à grande échelle à la fois efficaces, écologiques et économiques. De plus, un enjeu important dans ce domaine est d'accroître la durabilité, la fiabilité et la recyclabilité des cellules et des modules photovoltaïques.

Concernant les énergies marines renouvelables, de nombreux verrous scientifiques, très interdisciplinaires, freinent encore leur mise en œuvre. L'éolien en mer, très en avance, illustre la très grande interdisciplinarité des sujets actuels (couplages hydrodynamiques, aérodynamiques, ancrages, câbles dynamiques, maintenance, impact

environnemental, analyse des cycles de vie, ...). De très nombreux sujets, futurs, permettront de développer d'autres types d'énergies marines renouvelables (hydroliennes, houlomoteur, thermique, photovoltaïque flottant). Par ailleurs, le caractère intermittent de ce type d'énergies pousse à relever de nombreux challenges, en matière de stockage/conversion d'énergie en mer (production d'hydrogène, stockages gravitaires, ...)

Enfin, la manipulation des hautes tensions et hautes puissances lors de la génération, du transport, de la conversion et du stockage s'accompagne d'enjeux liés à la sécurité et à la fiabilité. Ainsi, les décharges qui se forment dans les dispositifs de courts-circuits, lors de foudroiements, mais aussi pour le développement de l'avion électrique, des panneaux photovoltaïques ou de la soudure, nécessitent des études avancées de caractérisation et de modélisation des phénomènes à l'œuvre pour assurer efficacement la sécurité des installations industrielles et des personnes, tout en diminuant la consommation énergétique des procédés. Ces approches sont aujourd'hui couplées de manière originale à des intelligences artificielles permettant de prédire avec un haut niveau de confiance la réalisation d'un événement fondamentalement stochastique, ce qui offre la possibilité d'anticiper les formations d'arc jusque-là non prédictibles.

2. Nouveaux carburants

Contexte

Maintenir l'équilibre entre l'offre et la demande dans l'équation énergétique sera compliqué par les variabilités quotidiennes de la production des énergies renouvelables. De plus, de nombreux sites très consommateurs d'énergie ont un potentiel d'expansion limité, conduisant à une séparation géographique entre les lieux de production et de consommation. Les pays à forte demande énergétique et disposant de ressources renouvelables limitées devront s'appuyer sur le commerce à longue distance des énergies renouvelables, qui doivent être transformées en vecteurs énergétiques transportables, stockables et recyclables. Le stockage d'énergie sera essentiel pour rendre le système flexible.

Le stockage à long terme nécessite des vecteurs énergétiques qui offrent les performances similaires aux combustibles fossiles — réactivité élevée, facilité d'utilisation, transportabilité et densité énergétique (volumétrique) élevée — mais ne produiraient aucune émission de CO₂ à aucun stade de la chaîne énergétique. La plupart des efforts actuels se concentrent sur les batteries et les piles à combustible d'une part, et sur l'hydrogène d'autre part. La contribution des carburants issus de la biomasse renouvelable est aussi à considérer de par leur flexibilité, leur intérêt écologique et la possibilité de les employer dans des systèmes de combustion existants. Les différents carburants compatibles avec une neutralité carbone sont identifiés : hydrogène, ammoniac, métaux et biocarburants.

Enjeux par vecteur

Hydrogène : L'hydrogène est actuellement considéré comme un carburant prometteur pour contribuer à la décarbonation des processus industriels. Bien que l'hydrogène puisse être produit de différentes manières, la technologie prédominante pour obtenir de l'hydrogène « vert » sera l'électrolyse de l'eau, induisant une réduction significative des émissions de CO₂ (jusqu'à 90 %) en 2050. Mais brûler du H₂ soulève plusieurs défis technologiques et scientifiques en raison des spécificités de la molécule H₂ par rapport aux hydrocarbures standards. Même si l'hydrogène peut être utilisé aussi bien dans les moteurs à combustion interne que dans les turbines à gaz, l'hydrogène comme carburant pour la production d'électricité représente jusqu'à présent moins de 0,2 % de l'approvisionnement en électricité. Comme le résume l'European Turbine Network, les valeurs typiques de teneur en hydrogène actuellement tolérées par différentes classes de turbines à gaz atteignent jusqu'à 30 à 50 % vol. pour les moteurs lourds, 50 à 70 % vol. pour les petits moteurs, 20% vol. pour les micro turbines à gaz. En effet, certaines caractéristiques particulières du H₂ nécessitent une refonte totale des chambres de combustion pour fonctionner à 100% H₂ GT : l'auto-allumage, le retour de flamme, les effets thermo acoustiques, la température de flamme plus élevée sont quelques différences fondamentales par rapport aux hydrocarbures. Ces facteurs limitent la flexibilité du carburant pour brûler à la fois 100 % de gaz naturel et 100 % d'hydrogène en utilisant le même système de combustion, comme l'envisagent divers projets européens (HYFLEXPOWER, FLEX4H2). De plus, des températures de combustion plus élevées pour augmenter l'efficacité du moteur peuvent entraîner une augmentation des émissions de NO_x, nécessitant éventuellement un système de réduction catalytique sélective, une injection d'eau ou des systèmes de combustion spéciaux à faibles émissions. Ainsi, les unités fonctionnant actuellement au gaz naturel s'appuient sur des technologies basées sur Rich-Quench-Lean (RQL) ou « Lean Burn » (également appelé « Premixed » ou « Dry Low Emissions (DLE) ») pour réduire les NO_x. Ces technologies peuvent être convenablement modifiées pour fonctionner à l'hydrogène.

Ammoniac : Une autre alternative est l'ammoniac (NH₃), qui peut être considéré comme un « simple » vecteur d'hydrogène (H₂) (comme le reconnaît l'AIE (<https://www.iea.org/workshops/joint-workshop-by-the-iea> et [the-european-commission-on-electrofuels.html](https://www.european-commission-on-electrofuels.html))). L'ammoniac présente certains avantages par rapport à l'hydrogène, tels que sa densité énergétique volumétrique plus élevée, sa production plus facile et plus répandue, une infrastructure déjà existante, bien établie et fiable, pour le stockage et la distribution de l'ammoniac. Par contre, l'ammoniac ne possède pas les propriétés de combustion requises pour une utilisation directe extensive dans les systèmes industriels en raison de sa faible réactivité et de sa faible vitesse de flamme. De nos jours, le NH₃ est principalement considéré comme un co-carburant des combustibles carbonés afin de réduire l'empreinte carbone globale des applications (telles que turbines à gaz, fours industriels ou moteurs à combustion interne). Il est néanmoins

nécessaire d'aller plus loin pour décarboner complètement les émissions. L'ammoniac ayant besoin d'un promoteur de combustion, on peut le craquer partiellement pour garantir l'initiation de la réaction ainsi que la stabilité et l'efficacité de la combustion. Des études récentes montrent que le craquage partiel de l'ammoniac en ses composants élémentaires, à savoir H₂ et N₂, est intéressant. Le manque de connaissances concernant la chimie d'oxydation de tels mélanges et le processus de combustion lui-même limite actuellement l'optimisation de la combustion de NH₃/H₂. Les problèmes identifiés sont principalement liés à la stabilisation et à l'allumage de la flamme, à l'optimisation de la flamme pour augmenter l'efficacité globale et réduire les émissions de polluants (NO_x et N₂O comme deuxième gaz à effet de serre (GES) après le CO₂ et le NH₃ imbrûlé) pour différents systèmes énergétiques (moteurs à combustion interne, turbines à gaz ainsi que chaudières et fours). Des solutions plasmas sont également à l'étude avec des perspectives prometteuses, en particulier sur H₂ et NH₃. Elles visent à la fois à améliorer la combustion des vecteurs d'énergie au moyen d'une assistance plasma mais aussi à proposer des voies alternatives de productions de nouveaux carburants.

Métaux : Les métaux sont récemment apparus comme vecteurs énergétiques alternatifs. La haute densité énergétique inhérente aux métaux, qui motive leur utilisation comme additifs aux propulseurs et aux matériaux énergétiques, ou comme anodes dans les batteries, incite également à explorer leur utilisation comme carburants électriques recyclables. L'énergie excédentaire issue de sources renouvelables peut être stockée dans des combustibles métalliques (grâce à leur réduction), avant d'être expédiée aux consommateurs. L'énergie chimique stockée est ensuite libérée par la combustion des particules métalliques, délivrant une puissance élevée, tout en ne produisant que des oxydes métalliques solides. Ces particules métalliques, naturellement recouverte d'une couche d'oxyde garantissant un stockage sûr, doivent être de taille micrométrique afin de réduire l'énergie nécessaire à leur mise en forme. Les oxydes métalliques solides sont collectés, renvoyés et réduits en combustible métallique sans émissions de carbone, fermant ainsi le cycle du combustible métallique.

Cette boucle peut être réalisée efficacement un nombre infini de fois tout en évitant la perte de matière dans l'environnement. Des évaluations préliminaires du cycle de vie et du coût économique ont déjà été réalisées pour certains combustibles métalliques potentiels, les résultats indiquant généralement qu'ils peuvent constituer des options compétitives par rapport aux batteries métal-air ou à l'hydrogène sur la base de leurs coûts et de l'efficacité de leur cycle énergétique. Bien qu'étudiée depuis très longtemps, la combustion des poudres métalliques reste un domaine relativement peu documenté par les diagnostics récents, tant numériques qu'expérimentaux. En plus de la diversité chimique, la combustion des combustibles métalliques est compliquée par diverses transformations de phases, telles la fusion, l'ébullition, la sublimation du combustible lui-même, ainsi que la fusion, l'évaporation, la dissociation et la condensation des produits de

combustion. Il est désormais essentiel de mettre en place une approche scientifique générale permettant d'aborder avec rigueur un certain nombre de questions scientifiques ouvertes, parmi lesquelles : 1) La production des particules métalliques et leur stockage ; 2) Le transfert de chaleur et de masse des flux chargés de particules, prenant en compte le rayonnement ; 3) La dynamique et l'interaction turbulence-particules des écoulements sous haute pression en gardant à l'esprit que l'objectif final est de produire de la chaleur de manière contrôlée tout en favorisant la filtration et la recyclabilité des oxydes produits.

Biomasse ; Les carburants directement issus de la biomasse (type lignocellulosique ou oléagineuse) sont déjà synthétisés et utilisés. Différentes formes existent : pellets, gaz ou encore carburants liquides de synthèse. Cependant, tous les verrous scientifiques permettant un déploiement sûr de ces carburants ne sont pas encore levés : synthèse efficace, combustion sécurisée en termes de pollution et d'encrassement des systèmes. La maîtrise de la neutralité carbone du cycle total de la production à l'utilisation n'est pas totale. La crainte d'une production de biomasse pour la production d'énergie au détriment de la sécurité alimentaire est toujours d'actualité. Par contre, l'utilisation de la biomasse dans la production de l'énergie est flexible permettant une utilisation dans l'industrie, la production de chaleur centralisée ou en chaudière domestique ainsi que la propulsion. S'assurer de leur efficacité énergétique, de leur faible impact environnemental en termes de gaz à effet de serre et de polluants tant au niveau de leur utilisation que de leur production, est essentiel dans un contexte de grande urgence.

Plasmas pour l'énergie : Les plasmas froids ont un rôle déterminant à jouer dans la transition énergétique. Leur développement peut permettre d'envisager de nouveaux procédés à faible coût énergétique et environnemental pour des applications comme la production et le stockage d'hydrogène, la production d'ammoniac ... Les plasmas offrent ainsi d'intéressantes perspectives dans toutes les technologies en lien avec le « Power-to-X ». L'ensemble de ces applications fait appel directement à des sources plasmas ou nécessite l'utilisation de matériaux avancés qui sont conçus et fonctionnalisés par des procédés plasmas comme par exemple les matériaux à base de graphène dont l'utilisation couvre de nombreux domaines dans le stockage et la conversion d'énergie ou l'électronique pour favoriser la dissipation thermique. L'utilisation des plasmas trouve également un intérêt pour assister la combustion et augmenter les rendements des moteurs. Cela concerne les combustibles de type hydrocarbures actuels mais également la combustion d'autres sources d'énergie comme l'hydrogène, l'ammoniac ou encore la biomasse. Les plasmas permettent ainsi de stabiliser la flamme en régime pauvre et de réduire la quantité de combustible nécessaire. La généralisation de ces procédés nécessite des efforts de recherche encore conséquents.

Nouveaux risques

La transition énergétique ouvre de nouveaux champs de recherche en particulier pour introduire de nouveaux vecteurs énergétiques pour remplacer les carburants

fossiles. Comme on vient de le voir, l'hydrogène, l'ammoniac, les poudres métalliques ou carburants de synthèse à partir de biomasse sont autant de solutions à l'étude. Chacune de ces filières ne peut faire l'économie de l'évaluation des nouveaux risques engendrés que ce soit au niveau de la production, du stockage, du transport et de l'utilisation. La grande réactivité de l'hydrogène, les propriétés corrosives lors de la transformation de l'ammoniac, ou la gestion d'une alimentation sous forme de poudres fines sont des exemples de problématiques qui devront s'appuyer sur une communauté interdisciplinaire impliquant des chercheurs en combustion (transition déflagration-détonation) en mécanique, en thermique et en génie des procédés.

Vers la neutralité Carbone

Les carburants ont un rôle essentiel à jouer dans la transition vers la neutralité carbone que ce soit comme vecteurs de stockage d'énergie renouvelable telles le solaire ou l'éolien ou encore comme produits direct de la biomasse. Ils sont flexibles et peuvent permettre l'adaptation de systèmes de production d'énergie déjà existants. S'assurer de leur efficacité énergétique, de leur faible impact environnemental en termes de gaz à effet de serre et de polluants tant au niveau de leur utilisation que de leur production, est essentiel dans un contexte de grande urgence.

Il est difficile d'imaginer une société moderne sans émission de carbone, et au-delà de la neutralité carbone, la capture du CO₂ peut contribuer à envisager aussi des émissions nulles, voire négatives. Si l'on ne peut éliminer totalement les émissions de carbone, ces émissions résiduelles doivent pouvoir être capturées pour envisager en transition, la séquestration, et au-delà la valorisation. La capture pour la séquestration est déjà actée comme une étape à minima de transition pour les industries fortes émettrices : aciéries, verreries, cimenteries, ...

La valorisation du CO₂ regroupe différents usages : e-carburants (carburants alternatifs produits à partir d'hydrogène et de CO₂), production de plastiques, production de microalgues, ou encore la carbonatation du béton. La capture demande des adaptations des procédés, pour de nouvelles installations ou le « retrofit », stimulant des recherches : exemple l'oxycombustion. Sur des mêmes sites où des émissions de CO₂ persisteront et où de l'hydrogène sera produit, l'hydrogénation du CO₂ pour la synthèse de matériaux ou carburants pourra être envisagée.

L'émergence de projets sans cloisonnements incluant production et utilisation vertueuses, intérêt économique et acceptabilité est à favoriser par les actions classiques telles des projets financés par l'ANR, les PEPR. Des PEPR (Stratégies nationales d'accélération) sont déjà lancés sur l'hydrogène (H₂) et les carburants durables (B-Best). Ces initiatives seront à poursuivre et devront inclure l'ammoniac et les métaux afin de se reposer sur un socle large de vecteurs énergétiques.

La cellule Energie et ANCRE sont déjà des relais efficaces. Néanmoins, la création d'un GdR 'Nouveaux carburants' avec une ouverture plus large permettrait de booster l'émergence de projets apportant des réponses à la fois originales et concrètes. Le périmètre de ce GdR devrait inclure : la synthèse de ces nouveaux carburants, leur utilisation et leur impact durant leur cycle de vie complet. Les thématiques suivantes devraient a minima s'y retrouver : chimie, génie des procédés, combustion, écologie, économie.

3. Défis de la récupération et du stockage de l'énergie

Récupération / intégration

Le contexte énergétique nécessite une meilleure gestion et récupération de l'énergie, des matériaux, le remplacement des matières premières critiques, la suggestion de matériaux verts et non écotoxiques, et enfin la découverte de nouvelles façons de récupérer l'énergie perdue (chaleur fatale) ou l'énergie non-exploitée jusqu'à présent et de la rendre utile.

La récupération d'énergie non exploitée doit ainsi être recherchée dans tous les domaines, et son utilisation ou conversion sous une autre forme d'énergie maximisée. Par exemple, la valorisation des excédents électriques peut être assurée par des procédés plasmas permettant la synthèse de vecteurs d'énergie directement exploitables. Le grapillage d'énergie sur les systèmes de production d'EnR où la gratuité de l'énergie compense les faibles rendements peut être développé. Plus des deux tiers de l'énergie sont perdus dans la chaîne de conversion énergétique, depuis la capture, la conversion, le transport, la production, la distribution, le stockage jusqu'à l'utilisation finale. Le stockage d'énergie et son intégration dans les procédés, les systèmes de conversion énergétique améliorent l'efficacité énergétique, la fiabilité, la disponibilité et réduisent le coût opérationnel. Selon l'application visée, le développement d'échangeurs de chaleur dynamiques pourra être nécessaire en aval de la décharge pour fournir la quantité, et souvent la puissance nécessaire à l'utilisation de l'énergie stockée.

L'intégration du système de stockage dans les procédés où se trouve le siège de la source et aussi son utilisation, est un vrai problème d'optimisation. Le niveau thermique de la source de stockage et les besoins de l'application devront être raccordés. En tout cas, une approche thermodynamique énergétique sur l'ensemble du procédé sera nécessaire pour l'optimisation de l'intégration et pour maximiser l'efficacité énergétique globale. Elle nécessitera une communauté renforcée dans le domaine de la thermodynamique, et le développement de formation traitant de ce sujet. L'intégration devra aussi être multi source et multi type de stockage, y compris stockage électrique, ce qui impliquera de se connecter au réseau électrique intelligent (smart grid), d'associer des objets de recherche complémentaires (industrie, bâtiment, transport) et de considérer des approches pluridisciplinaires.

Stockage des EnR

Un des verrous majeurs des prochaines années est la maîtrise du stockage de l'énergie sous différentes formes, car il y va de la soutenabilité de certains systèmes énergétiques. L'intégration massive des énergies renouvelables variables (ERV) ainsi que le besoin de renforcer la flexibilité du réseau, sont aujourd'hui reconnus comme des préoccupations stratégiques majeures. Afin d'éviter l'abatement d'électricité issue de ces énergies renouvelables et de renforcer la flexibilité du réseau, les technologies Power-to-X ont été identifiées comme des solutions à fort potentiel. Parmi celles-ci, le Power-to-heat (P2H) associé au stockage de l'énergie thermique (TES) présente le CAPEX le plus bas. La chaleur à haute température (HT) produite par le P2H-TES pourrait également offrir au secteur industriel un potentiel élevé de décarbonisation, contribuant ainsi aux objectifs nationaux. Pour relever correctement ces nouveaux défis, des innovations sont nécessaires, en particulier pour les HT-P2H-TES avancés, et les systèmes de stockages thermiques HT afin de répondre aux besoins de valorisation des chaleurs fatales industrielles, stockages statiques ou mobiles. Enfin, le développement du stockage thermique du froid va être lui aussi un enjeu économique et énergétique très important.

De nombreux verrous apparaissent à différentes échelles. Le coût des matériaux de stockage en chaleur sensible HT disponibles devra être réduit ainsi que leur empreinte environnementale, sans impacter notablement les ressources minérales encore disponibles ni induire de conflits d'usages. Le développement de matériaux alternatifs issus de coproduits ou déchets industriels sera une autre alternative. De nouveaux matériaux de stockage à chaleur latente aux plus hautes températures et avec de meilleures propriétés (stabilité, conductivité, réduction de la surfusion) devront être trouvés. Il sera également nécessaire de mettre au point des techniques de mesure et suivi de vieillissement *in situ* sous contraintes de cyclage thermique en conditions opératoires industrielles.

Les effets de vieillissement thermomécaniques et de corrosion induits sur les enveloppes de stockage au cours des cycles thermiques sont encore mal maîtrisés. Les systèmes de stockage thermiques émergents en réponse au P2H sont pour l'heure composés de convertisseur électrothermiques *ex situ* (en amont du stockage) responsables de pertes thermiques supplémentaires, de manque de puissance de charge thermique et d'inhomogénéité en température au sein du stockage.

Des approches innovantes de conversion électrothermique *in situ* au sein du stockage sont tout juste amorcées et présentent encore de nombreux défis. Ces approches offrent des intensifications de puissance de charge dynamiques d'un facteur 100 à 1000 adaptées aux opportunités de valorisation des productions électriques VRE ou aux périodes de faibles demandes sur les réseaux. Les stockages thermiques de transition sont également destinés à répondre à des contraintes de charges dynamiques intermittentes et parfois imprédictibles (VRE) ou d'interfaçage entre des sources et besoins énergétiques déphasés et/ou à niveaux de puissances très différents.

Les stockages thermiques mobiles (M-TES) sont eux aussi en émergence. Pour finir, à l'échelle macro système des réseaux, des travaux sont encore nécessaires pour optimiser la distribution des systèmes de stockage thermique (nature du stockage, taille, lieu...).

Le choix de technologie de stockage dépend aussi de nombreux critères, comme la nature de la source, son niveau thermique et son éventuelle intermittence ou pas. Il faut densifier les capacités de stockage en utilisant tous les modes de stockage de l'énergie thermique (latente, fatale, thermochimique). Un système de stockage en multi source avec des technologies bien adaptées demande la maîtrise du transfert de la chaleur et de la matière, par une conception innovante (multi-échelle ou modulaire pour des grandes puissances).

Géomécanique pour l'énergie

L'utilisation du sous-sol, et donc la géomécanique, peut être un élément clé de la transition énergétique : **exploitation de l'énergie géothermique, stockage d'énergie en souterrain, séquestration des déchets** et du CO₂, identification et exploitation des sites d'hydrogène natif, etc. Les approches doivent être multi-échelles, de la microstructure à l'échelle du réservoir en passant par l'échelle du laboratoire ; multiphysiques ; et combiner des approches expérimentales, numériques et théoriques.

D'un point de vue « source d'énergie » géologique, la géothermie peut jouer un rôle significatif dans la transition énergétique. Il en existe deux grands types : **la géothermie de surface et la géothermie profonde**. Cette dernière présente un avantage certain, puisqu'elle peut être utilisée pour alimenter des réseaux de chaleur, mais aussi pour produire de l'électricité.

L'enjeu est de maîtriser cette technologie tout en contrôlant l'énergie des séismes induits. D'un point de vue fondamental, il s'agit de mieux comprendre le lien entre l'injection/prélèvement de fluide, l'état de contrainte in situ, les propriétés et l'altération des roches, la température et les éventuels mouvements sismiques ou aismiques de failles induites ou préexistantes. Une autre limite actuelle de l'énergie géothermique profonde est la réalisation et la stabilité des puits profonds. Le coût des forages profonds représente une part importante de tout projet et l'amélioration de l'efficacité des méthodes de forage est indispensable pour rendre la géothermie économiquement possible. Une autre approche, dans le cadre de la géothermie de surface, consiste à donner une fonction géothermique aux fondations et aux structures géotechniques (géo-structures). Elles sont en contact direct avec le sol dont la température oscille entre 10 et 15°C à 20 m de profondeur. Dans ce type de géothermie de surface, il s'agit d'extraire de la chaleur ou du froid. Si les pieux énergétiques se sont développés dans les dernières années, il est désormais nécessaire de s'intéresser de manière plus importante aux autres types de structures souterraines (parois, tunnels). L'évaluation du fonctionnement mécanique et énergétique sur le long terme de ces géo-structures nécessite d'identifier et de quantifier correctement les impacts et contributions des

différents éléments : sols, structures, écoulement de l'eau ; et de mieux comprendre le comportement des interfaces sol-structures sous contraintes thermiques induites par le fonctionnement saisonnier (cycles chaud-froid).

Par ailleurs, **l'intermittence de sources d'énergie** telles que le solaire et l'éolien nécessite le stockage temporaire d'énergie qui peut être réalisé par électrolyse et **stockage de l'hydrogène** produit dans des cavités salines, des réservoirs d'hydrocarbures déplétés ou des aquifères salins. L'efficacité de ce type de stockage, sa sûreté et sa durabilité sont des questions ouvertes en raison du caractère multiphasique de l'écoulement, du piégeage possible du gaz dans le réservoir poreux, de l'évolution de la perméabilité et de la capacité d'emmagasinement du milieu poreux sous sollicitations cycliques, de l'intégrité de la roche de couverture. Une autre singularité de la géomécanique qui peut aider à atteindre la neutralité carbone est de **séquestrer le CO₂ dans le sous-sol**, qui est l'une des solutions avancées dans le dernier rapport du GIEC. Les roches sont des milieux poreux et le CO₂ y est injecté dans des conditions supercritiques. Les sites d'injection sont actuellement d'anciens réservoirs d'hydrocarbures, mais d'autres sites sont à l'étude, comme les aquifères salins et les basaltes. L'objectif est de comprendre le comportement hydromécanique à long terme de ces roches, la qualité de leur couverture et la durabilité des puits d'injection (ciment). Le CO₂ acidifie l'eau et peut donc altérer les roches/le ciment de forage. De plus, l'injection peut induire une sismicité, et l'objectif est alors d'éviter toute fuite de gaz. Les basaltes sont particulièrement intéressants, car le CO₂ est transformé en phase minérale. Là aussi, il s'agit de comprendre le comportement mécanique à long terme de la roche encaissante et d'évaluer le risque de fuite, car les couches de basalte ne sont pas naturellement recouvertes d'une couche imperméable.

A noter que **les lois de comportement du sous-sol** peuvent être déterminées par méthodes inverses grâce à des **mesures géophysiques** de plus en plus précises : on peut citer l'évolution temporelle de la surface à l'aide de mesures satellitaires (InSAR), GPS, ou le suivi du réservoir par mesures acoustiques (sismique 4D). Enfin, le sous-sol est également considéré comme une possibilité à long terme pour les **déchets nucléaires** (projet Cigéo dans les argilites du Callovo-Oxfordien). Les formations argileuses offrent des conditions de confinement très favorables (faible conductivité hydraulique, faible diffusion moléculaire, forte capacité de rétention des radionucléides, etc.). En particulier, il s'agit de mieux caractériser **le comportement thermo-hydro-mécanique** à moyen et long terme autour des galeries : évolution de la pression interstitielle et des déformations différées, pressurisation thermique, contraintes in-situ, anisotropie élastique/plastique de la roche et variabilité spatiale de ses propriétés, phénomène de fracturation et couplage avec la diffusion des radionucléides, auto-cicatrisation, interaction roche argileuse/structure, etc. Il s'agit *in fine* de réduire les incertitudes sur le comportement thermo-hydro-mécanique pour optimiser la conception du stockage pour la phase d'exploitation (typiquement 150 ans) et accroître les marges de sûreté à long terme.

4. Approches multi-échelles, multi-physiques

Les approches multi-échelles (phénomènes de transfert, opérations de transformation de la matière et de l'énergie), s'appuient globalement sur trois niveaux d'analyse des phénomènes :

- échelle moléculaire, avec l'essor des outils de dynamique moléculaire, en particulier dans des milieux complexes (solides, polymères, fluides)
- échelle des milieux continus (CFD), avec des défis à relever pour les systèmes réactifs ou les milieux non newtoniens par exemple
- échelle système, permettant de simuler/optimiser des ensembles de briques technologiques pour les opérations de transformation de la matière et de l'énergie (avec des suites logicielles du type Aspen, Proll, Prosim, GProms...), mais pour lesquelles les simulations en régime transitoire et l'optimisation d'architectures de procédés (synthèse automatique de procédés) présentent encore des limitations.

Ces 3 échelles sont utilisées par des communautés scientifiques distinctes, avec un nombre très limité de travaux associant ces différents niveaux, que ce soit sur la partie modélisation ou la partie expérimentale. Pour répondre aux futurs enjeux en matière de décarbonation, de la production d'énergie, et de développement durable, il est nécessaire d'aborder la recherche avec un continuum entre l'échelle nano/micro/ macro et système, et d'avoir une modélisation multi-échelle, multi-physique, accompagnée de données expérimentales à toutes les échelles de temps et d'espace. Les problématiques de recherche nécessitant une approche multi-échelle sont multiples, et concernent presque tous les domaines de recherche en ingénierie. On peut citer par exemple la modélisation et les expériences de transport thermique et d'énergie de la nano-échelle au dispositif, le captage du CO₂ avec l'identification d'une structure moléculaire idéale, la conception d'une brique technologique à haute efficacité énergétique, la synthèse d'un procédé à l'échelle industrielle associant les différentes opérations. Cette multi-physique est aussi prégnante sur les plateformes avec la présence en plus d'une problématique supplémentaire liée au changement d'échelle.

5. Défis socio-éco-environnementaux

Le premier défi à relever reste de consommer moins. L'intensification des transferts, l'efficacité et l'optimisation énergétique sont des challenges à relever dans tous les domaines, que ce soit dans les transports de demain, les procédés unitaires (échangeurs, mélangeurs, réacteurs...), mais aussi sur l'ensemble du site industriel, ou dans la thermique de l'habitat. Pour les usages, de nombreuses problématiques liées à l'objectif d'un développement durable sont englobées aujourd'hui dans le concept de cycle de vie des produits. Cette notion cruciale est définie au niveau international à travers la méthode

normalisée d'analyse de cycle de vie, qui vise à effectuer un bilan environnemental des produits, de l'extraction des matières premières nécessaires à leur fabrication jusqu'à leur fin de vie (destruction, recyclage...), en passant par leur production, leur utilisation, les différentes étapes de transport, sans oublier la gestion des infrastructures.

Les sciences de l'ingénieur doivent contribuer encore davantage à l'optimisation des cycles de vie des produits. Il est désormais indispensable, dès l'étape de recherche et innovation, de prendre en compte cette exigence et de coordonner les efforts de tous les chercheurs pour donner l'image la plus complète de tout nouveau matériau, procédé ou système. Autrement dit, il faudra décrire d'emblée l'évolution des propriétés microscopiques et macroscopiques d'un matériau innovant par exemple tout au long de la vie du produit industrialisé. Il ne s'agit cependant pas ici de se substituer aux industriels dans la recherche de matériaux qui pourraient être industrialisés, mais de mener des recherches en amont de l'innovation pour offrir à la communauté l'ensemble des données nécessaires à la réflexion sur l'utilisation des matériaux développés.

D'une manière générale, concernant la **production** d'électricité, il faudra investir dans la recherche pour des matériaux, consommables et procédés avec impact environnemental réduit, il faudra baisser la pression sur les ressources et les matériaux critiques, identifier des substitutions/alternatives, biosourcées et biodégradables, renforcer l'exploitation de l'hydrogène natif, tout en favorisant le recyclage, la réparation, le désassemblage et la réutilisation des composants et systèmes. Dans le domaine du **stockage** de l'énergie électrique, cela nécessite des avancées dans les technologies de batteries, couplage véhicule-to-grid, piles à hydrogène, stockage gravitaire et mécanique, ce qui permettra la gestion de la variabilité des sources renouvelables.

Il faudra également concevoir des **systèmes** plus durables et plus performants (production, distribution et consommation). On peut envisager comme axe de recherche le développement de modèles prédictifs et l'association avec l'intelligence artificielle pour la gestion des données.

III - Ingénierie pour la Transformation numérique

L'organisation des 'Nations Unies' décrit comme suit l'impact des technologies numériques : 'Les technologies peuvent contribuer à promouvoir la justice et la paix dans le monde. Les progrès du numérique peuvent favoriser et accélérer la réalisation de chacun des 17 [objectifs de développement durable](#), qu'il s'agisse de mettre fin à l'extrême pauvreté, de réduire la mortalité maternelle et infantile, de promouvoir l'agriculture durable et le travail décent ou encore de parvenir à l'alphabétisation universelle. Toutefois, les technologies peuvent aussi menacer le droit à la vie privée, compromettre la sécurité et creuser les inégalités. Elles ont des incidences sur les droits de l'homme et l'action humaine. Comme les générations précédentes, nous — les autorités, les entreprises et les particuliers — devons choisir comment nous souhaitons exploiter et gérer les nouvelles technologies.'

Par son positionnement, à l'interface entre recherches fondamentales et transfert de résultats vers le secteur industriel, CNRS Ingénierie se doit de produire des concepts et technologies innovantes, et d'éclairer ces autorités, entreprises, particuliers dans leur choix.

Ce chapitre est organisé dans ce contexte en 7 axes.

Les 2 premiers décrivent des champs de recherche visant à réduire les menaces que représente le déploiement de ces nouvelles technologies :

- Les technologies de l'information et de la communication sont responsables d'environ 4 % des émissions de gaz à effet de serre au niveau mondial. Ce niveau est en augmentation et d'une ampleur comparable aux émissions générées par l'aviation civile. Il est donc indispensable de s'inscrire dans des recherches capables de *faire émerger des technologies moins polluantes, moins consommatrices d'énergie et de ressources, et d'imaginer des solutions efficaces pour leur recyclage.*
- La crise récente de la pénurie des semi-conducteurs a rappelé que la maîtrise de ces filières technologiques au sens général est plus que jamais un enjeu de souveraineté nationale et européenne. CNRS Ingénierie doit contribuer à la démarche soutenue par France 2030 pour produire des technologies identifiées comme étant stratégiques dans l'espace européen.

Les 2 axes suivants visent à produire des recherches pour accélérer la diffusion des technologies numériques :

- La contribution de CNRS Ingénierie doit s'avérer déterminante dans le domaine du spatial, où ont émergé une multitude de concepts et technologies de rupture, notamment pour la couverture Internet planétaire via les méga-constellations de satellites.
- Les conditions environnementales doivent être surveillées, analysées et optimisées en permanence, par exemple dans les villes et les agglomérations. L'objectif est ainsi de développer un système de surveillance intelligente de l'environnement.

Enfin, ce chapitre souligne l'importance de trois autres axes essentiels, liés à la simulation et à la modélisation de systèmes complexes en intégrant en particulier des techniques d'IA, dans 3 domaines :

- Les composants, circuits, systèmes électroniques et photoniques
- La mécanique
- La dynamique des fluides et la thermique

1. Sobriété numérique

Contexte sociétal

Le secteur du numérique au sens large est souvent perçu comme positif car créateur de croissance ou porteur de solutions pour répondre au défi climatique, mais il est aussi responsable de 2,5 % de l'empreinte carbone de la France, valeur en forte augmentation². Ce sont les terminaux (téléviseurs, écrans, ordinateurs, tablettes, smartphones, consoles...) qui sont à l'origine de 65 à 90 % de l'impact environnemental du numérique. Sur le cycle de vie complet d'un appareil électronique, la phase de fabrication est la principale source de l'empreinte carbone (78 %), suivie de la phase d'utilisation, concentrant souvent à elles deux jusqu'à 100 % de cette empreinte.

De manière générale, l'épuisement des ressources énergétiques fossiles, l'empreinte carbone, la consommation énergétique, ainsi que l'épuisement des ressources (eau, minéraux et métaux) ressortent comme les impacts environnementaux prédominants du numérique.

Enjeu scientifique

La recherche académique menée par le CNRS et les universités peut et doit contribuer à proposer des solutions innovantes pour accompagner les industriels dans leurs démarches et préparer l'avenir en envisageant d'autres voies plus exploratoires, en particulier sur les axes suivants.

Imaginer de nouveaux matériaux, de nouveaux consommables, de nouveaux procédés permettant de réduire l'impact environnemental des technologies existantes du numérique et proposer des solutions de recyclage (par exemple nouvelles technologies de réparation, matériaux plus faciles à séparer lors du recyclage...), qu'il s'agisse des technologies microélectroniques, photoniques, photovoltaïques, quantiques, appliquées aux domaines des télécommunications, de l'énergie, de la robotique, Les moyens expérimentaux utilisés par les équipes académiques pour conduire des recherches dans ce domaine, comme par exemple les salles blanches du réseau RENATECH+, pourraient servir d'exemple et devenir des lieux d'expérimentations grandeur nature pour imaginer et tester ces solutions technologiques plus frugales et constituer à l'horizon 2030 un réseau RENATECH+ durable.

Soutenir l'émergence de technologies numériques alternatives plus soutenables, comme par exemple l'électronique imprimée (à base de substrat papier, organique ou pérovskite) lorsqu'il est démontré qu'elle utilise des procédés moins consommateurs d'énergie, plus propres et plus recyclables, mais aussi le développement de composants et circuits (dans tous les domaines des technologies du numérique) optimisés pour réduire leur impact (par exemple des circuits basse consommation).

En outre, il paraît souhaitable de mettre en œuvre les méthodologies de l'analyse du cycle de vie dès les premières étapes de la recherche, y compris les plus

exploratoires, dans tous les domaines du numérique.

Par ailleurs, l'émergence et la diffusion massive des technologies d'Intelligence Artificielle (IA), extrêmement consommatrices d'énergie, constituent de véritables défis pour limiter l'empreinte environnementale future des technologies numériques. Dans ce contexte, il apparaît indispensable de mener des recherches pour imaginer et développer des circuits intégrés spécifiquement conçus pour l'IA, si possible reconfigurables, et limitant le recours au *cloud computing* (*Edge AI*). Une étude a estimé que les puces conçues spécifiquement pour l'IA pourraient réduire la consommation d'énergie des centres de données de 50 à 75 %.

Enfin, la recherche académique doit poursuivre l'exploration de solutions technologiques permettant de réaliser de véritables circuits neuro-inspirés, plus performants et plus économes en énergie. Cette recherche de longue haleine se doit d'intégrer tous les aspects de la problématique : composants, circuits, architectures notamment 3D, intégration et compatibilité avec les plateformes technologiques existantes. Il convient d'envisager aussi bien les solutions relativement proches des applications (mémoires à changement de phase à base de chalcogénures, Resistive RAM, OxRAM, Oscillateurs Spin Torque, Jonction magnétique Josephson ...) que des solutions plus exploratoires (solutions photoniques, à base de matériaux 2D...).

Contexte international

De nombreuses initiatives privées ont déjà vu le jour pour chercher à réduire les impacts environnementaux des technologies numériques. Le *Circular Electronics Partnership* (CEP - <https://cep2030.org>) réunit des géants comme Dell, Google et Microsoft qui s'engagent à évaluer leurs matériaux et leurs produits en utilisant une analyse du cycle de vie et en réduisant les déchets dès la phase de conception jusqu'à l'utilisation et au recyclage. Un projet Européen, EECONE (*European ECOsystem for green Electronics*), vient d'ailleurs de démarrer sur ces thématiques.

Contexte national

Leader national de l'industrie des semi-conducteurs, STMicroelectronics s'est engagé à atteindre la neutralité carbone d'ici 2027, à optimiser sa gestion de l'eau (réduction de la consommation d'eau par tranche de 20 % par rapport à 2016, recyclage de l'eau utilisée), et à promouvoir l'économie circulaire avec un objectif de réutiliser ou recycler 95 % des déchets.

Plusieurs études et rapports d'association ou d'organismes nationaux, alimentés par des travaux de recherche, encouragent le développement d'une électronique soutenable (GreenIT, ADEME, The Shift Project, *NEED for IoT* ...).

² Evaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective, rapport ADEME janvier 2022

2. Souveraineté numérique

Contexte sociétal

Le numérique est présent à tous les niveaux dans le fonctionnement et l'organisation de notre société. Les enjeux sociétaux associés sont considérables à la fois pour leur impact dans la vie privée des citoyens mais aussi pour la garantie d'une gouvernance démocratique. Le développement de l'environnement numérique est également un enjeu stratégique majeur à forte incidence pour le secteur économique : dans un contexte de désindustrialisation à l'échelle Européenne dans ce segment industriel, des stratégies nationales et Européennes doivent être mobilisées pour construire l'émancipation de l'Europe et pour garantir une indépendance dans la conception de puces, l'approvisionnement en matériaux stratégiques, la fabrication de composants électroniques, photoniques, et radio-fréquence et l'utilisation de toute la palette des moyens logiciels et matériels offerts.

Ces stratégies doivent également tenir compte des enjeux de sécurité et des enjeux climatiques. La souveraineté dans les technologies numériques est ainsi un engagement stratégique. Elle est un des piliers pour permettre d'affronter en position de force les défis géopolitiques et garantir un développement soutenable à l'échelle du continent.

Enjeu scientifique

La recherche académique menée par les organismes de recherche et les universités doit contribuer à cet effort national autour de la souveraineté numérique et ses composants. Le domaine de l'ingénierie porté par CNRS Ingénierie peut en être le fer de lance, à la fois dans la maîtrise des nouvelles ruptures technologiques et la démonstration de preuves de concept. La capacité à co-développer avec les entreprises et faire des transferts d'innovation réussis est également essentielle. CNRS Ingénierie doit naturellement continuer à jouer un rôle majeur dans les domaines stratégiques déjà identifiés qui ont vocation à être soutenus sur le long terme, que ce soit pour l'électronique et la photonique au sens large, ou les technologies quantiques dont l'un des enjeux forts du moment est le transfert à grande échelle des preuves de concept déjà démontrées. Plusieurs défis pour asseoir la souveraineté numérique et dans lesquels les rôles du CNRS, de l'INSIS, de RENATECH+ demeurent essentiels et doivent être adressés, peuvent être listés comme suit :

- L'élaboration des matériaux et la capacité à concevoir des matériaux de substitution ou de nouveaux matériaux, afin de maîtriser la dépendance vis à vis des ressources rares et stratégiques ou vis à vis des ressources et solutions maîtrisées par des puissances en concurrence avec l'Europe. Les restrictions d'exportation pour certains types de substrats, de matériaux élémentaires (gallium, germanium ...) ou de composants avancés militent pour le renforcement de notre autonomie stratégique.
- La capacité à concevoir des puces électroniques et photoniques complexes où l'hétéro-intégration de matériaux, composants et fonctionnalités, demeure

un objectif majeur. La convergence entre l'optique et l'électronique à haute densité doit permettre l'ingénierie de composants intégrés à hautes performances permettant un packaging avancé multi-niveaux et l'intégration de chipelets multifonctionnels, l'émergence de nouveaux paradigmes de calcul et une mise en boîtier ouvrant la voie à une nouvelle génération de puces. L'hétéro-intégration s'inscrit dans une nouvelle feuille de route internationale. Elle constitue une ressource majeure pour l'innovation.

- Le maintien de l'excellence dans le développement de sources lasers en complément des lasers pour la photonique intégrée. Ces sources multispectrales à base de semi-conducteurs, de fibres ou de cristaux non-linéaires trouvent des applications pour les communications, la métrologie, y compris avec la génération de peignes de fréquence, la fabrication industrielle, l'imagerie et les domaines de la santé.
- Le développement de puces quantiques à grande échelle avec un nombre croissant de qubits s'appuyant sur les technologies électroniques et photoniques, ce qui implique notamment la capacité à adresser et manipuler massivement en parallèle les qubits et des capteurs quantiques, ainsi que de développer toute la chaîne des technologies habilitantes pour le quantique.
- Le développement de l'authentification hardware pour la cyber-sécurité, de composants pour la défense, l'intelligence artificielle et le calcul haute performance.

Contexte international

L'Union européenne a pris un virage important dans le renforcement de sa souveraineté numérique autour des composants en lançant le programme European CHIPS ACT. Cette initiative est en miroir de celle prise en 2022 par les États-Unis avec le CHIPS and SCIENCE ACT. Leur objectif est de réaliser la production des puces les plus avancées sur le territoire des États-Unis, renforcer les chaînes d'approvisionnement et la sécurité nationale, et d'investir massivement dans la recherche et le développement en science et technologie. Cet investissement massif (50 milliards rien qu'aux États-Unis) vise à consolider une avance dans les domaines comme les nanotechnologies, l'énergie propre, les technologies quantiques, l'informatique et l'intelligence artificielle. Des entreprises comme TSMC ont ainsi lancé en Arizona la construction d'usines visant les nœuds les plus avancés (3 nm). Même si les investissements sont prioritairement orientés vers les nœuds avancés pour l'électronique, il est anticipé que ces investissements vont renforcer l'innovation autour des composants photoniques et de la photonique intégrée qui enrichissent les fonctionnalités des puces.

Contexte national

Au niveau national, le Plan France 2030 vise à construire notre souveraineté et consolider notre avance technologique dans des domaines clefs en soutenant la recherche et le développement dans des domaines prioritaires où les composants jouent un rôle majeur. Des

programmes d'équipements prioritaires de recherche (PEPR) d'accélération qui s'inscrivent dans la stratégie nationale, ou à caractère exploratoire, ont ainsi été mis en place autour de l'électronique, le quantique, la 5G, la cyber-sécurité, la spintronique, les matériaux émergents et le stockage sur ADN.

D'autres actions prioritaires soutiennent les développements autour de l'architecture et des logiciels pour l'intelligence artificielle, le *cloud computing*, le numérique à haute performance exascale, ou les outils numériques collaboratifs. La présence en France de filières industrielles intégrées ainsi qu'une dynamique d'implantations de centres de recherche et développement et de nouvelles usines offrent la possibilité d'un fort retour sur investissement via le transfert d'innovation pour ces programmes phare de recherche amont.

3. New Space

Contexte sociétal

Le domaine du spatial a été dominé historiquement par des acteurs institutionnels (agences gouvernementales type l'ESA en Europe ou la NASA aux Etats-Unis) et de grands groupes industriels (Thales, Airbus, Mitsubishi, Lockheed Martin, Boeing, etc...). Depuis quelques années, de nouveaux acteurs émergent et prônent innovation, agilité et privatisation de l'accès à l'espace, tout en introduisant des concepts et technologies de rupture : lanceurs ré-utilisables, micro-lanceurs pour orbite basse, nano-satellites, méga-constellations de satellites, couverture Internet planétaire, tourisme spatial, nouveaux carburants.... Ce mouvement constitue le *New Space*, très largement dominé par les Etats-Unis, et qui oblige les acteurs traditionnels à réviser leurs stratégies.

Le *New Space* a déjà conduit à des évolutions technologiques considérables, flexibles et nettement moins onéreuses, et a permis l'apparition de services entièrement nouveaux. A titre d'exemple, on peut citer la miniaturisation des dispositifs et des satellites, l'utilisation de nouveaux matériaux, l'exploitation d'algorithmes d'intelligence artificielle embarqués, le développement d'applications centrées sur les données satellites (agriculture de précision, navigation, surveillance, monitoring du trafic aérien et routier, IoT...). Enfin, la dépendance grandissante à ces technologies de l'espace amène de nombreux enjeux stratégiques nouveaux en termes de souveraineté et de sécurité.

Enjeu scientifique

Les méga-constellations de satellites défilants révolutionnent le secteur des télécommunications spatiales. Doter les satellites de liaisons inter-satellites directes (ISL, Inter Satellite Links) permet de contourner la contrainte de visibilité permanente avec une station sol. Ainsi les satellites en visibilité de stations sol redescendent le trafic des utilisateurs sous leur couverture, mais également celui reçu des satellites adjacents par ISL. A ce jour, il est envisagé d'établir les liens ISL en bande millimétrique et/

ou en optique. En bandes millimétriques, il convient de développer de nouvelles générations d'antennes miniatures et de l'électronique associée, à très faible profil et masse, à fort gain et à dépointage de faisceau inter-plan et intra-plan, pour une intégration sur plateformes de nano-satellites 3U à 12U ($1U=10\times 10\times 10\text{ cm}^3$). Parallèlement, l'optique/photonique doit permettre d'améliorer la compétitivité des systèmes embarqués, grâce à des gains d'antennes très importants et en assurant les liaisons très haut débit des ISL. On attend également des solutions plus performantes en termes de puissance et de rendement pour l'amplification optique, ainsi que le développement de technologies pour les têtes optiques compatibles d'une production en grande série et faible coût. Enfin, l'optique intégrée permettra de simplifier les architectures des terminaux optiques, et la détection optique devra être améliorée en travaillant sur les techniques d'amplification des signaux faibles.

L'espace permet aussi l'observation de la terre et de son environnement. La compréhension du système terrestre est une nécessité pressante pour mieux analyser le changement climatique et les impacts associés. Pour ce faire, il convient de soutenir tous les aspects des recherches en lien avec l'observation de la Terre : atmosphère, océans et surfaces continentales. En ce qui concerne les moyens d'observations hyperfréquences et optiques, il est essentiel de soutenir des projets de recherche dans les domaines de l'instrumentation et des capteurs associés (systèmes d'imagerie radar/optique aéroportés et satellitaires, sondeurs micro-ondes et infrarouges, radiomètres, LIDAR...), des techniques de traitements du signal radar, de l'imagerie radar SAR, de l'imagerie hyperspectrale et optique et de signaux LIDARs . On peut citer à titre d'exemple et de façon non exhaustive : les sondeurs atmosphériques pour la mesure de profil d'humidité de l'atmosphère, les systèmes antennaires quasi-optiques associés, le radar Doppler de mesure de la vitesse du vent en bande W, et les LIDAR pour l'altimétrie, la mesure des gaz à effet de serre, la mesure des aérosols et la mesure des vents. Dans ce domaine des LIDAR, il sera important de simplifier l'embarquabilité des émetteurs lasers via une meilleure amplification optique et la mise en cohérence de faisceaux laser pour utiliser des solutions fibrées. De même, la détection de signaux faibles tirera profit de l'amélioration du filtrage optique et de la détectivité des capteurs dans l'infrarouge proche ($1,5\ \mu\text{m} - 2\ \mu\text{m}$).

Dans le domaine de l'imagerie hyperspectrale et de la spectrométrie, il convient d'augmenter la résolution spatiale en conservant un nombre très important de canaux spectraux. Les solutions de sélection spectrale intégrée au détecteur doivent encore permettre une simplification des instruments. La structuration des filtres couches minces, les technologies nano-photonique et photonique intégrée sont des solutions à investiguer pour obtenir une réduction forte en volume et masse des futurs instruments pour les nano-satellites.

La radiométrie embarquée à bord d'une constellation de nano-satellites constitue aussi un enjeu du futur, compte tenu des avantages procurés (résilience, fréquence de mise à jour des observations). Les nouvelles générations

d'instruments embarqués devront ainsi être de taille et masse réduites (antennes déployables, antennes multi-fonctions /multi-fonctions, formateurs de faisceaux, technologies quasi-optiques, surfaces sélectives en fréquences (FSS) ultra faibles pertes). Les plateformes de caractérisation des briques technologiques (antennes, miroirs, FSS...) devront être consolidées et soutenues sur le long terme.

L'espace permettra aussi la réduction de la fracture numérique. Les communications en mobilité, la gestion des situations d'urgence, ou encore la couverture radio-électrique de zones blanches ou faiblement peuplées imposent le recours aux réseaux de télécommunications non terrestres. L'un des enjeux majeurs de recherche concerne les terminaux antennaires terrestres répondant à ces problématiques. Dans ce contexte, les communications par satellites en mobilité (SOTM, *Satcom on the move*), entre un utilisateur (segment terrestre, aéroporté ou maritime) et les satellites défilant en orbite basse ou moyenne des méga-constellations en pleine expansion, constituent un enjeu sociétal et de souveraineté majeur. La recherche d'architectures antennaires ultra-plates, large bande (ou multi-bande), à dépointage de faisceau (mécanique, électronique, ou hybride électromécanique) sur un large champ de vision, à agilité de polarisation et à faible consommation énergétique, constitue un défi de toute première importance, aussi bien pour les panneaux rayonnants que pour les front-ends radio (intégration de fonctions actives à ultra basse consommation, numérisation). La compatibilité avec les réseaux terrestres dans les futurs réseaux 6G constitue aussi une exigence opérationnelle. La recherche aux interfaces entre les nouvelles architectures antennaires en hyperfréquence (millimétrique et sub-THz) et la photonique intégrée est aussi une voie prometteuse à explorer, avec des enjeux liés à la fiabilité et à la tenue aux radiations dans des environnements sévères.

Enfin, il convient de souligner que plasmas sont à la base des systèmes de propulsion actuels des engins spatiaux, principalement pour des poussées faibles ou de longue durée. De nouvelles solutions sont actuellement proposées pour envisager l'utilisation de nouveaux "combustibles" ou de nouveaux designs de moteurs. Ainsi, les gaz comme le Xénon, le Krypton, l'Iode sont actuellement proposés. Il serait particulièrement intéressant d'optimiser leur utilisation pour des raisons de coût et de limitation du stockage. Il s'agit ainsi d'optimiser les régimes de fonctionnement de ces moteurs en appréhendant mieux les processus fondamentaux de ces plasmas froids magnétisés qui sont le siège de nombreuses instabilités responsables de la diminution des performances et de la durée de vie du moteur. L'optimisation de ces procédés passe par un effort conséquent en modélisation et diagnostic de ces plasmas sur de larges échelles de temps et d'espace.

Contexte international

Dans le domaine des SOTM et des liaisons ISL, la domination est très clairement nord-américaine, avec une implication forte et déterminante des nouveaux acteurs industriels.

Contexte national

Dans le domaine des antennes et de la photonique, la communauté française est bien structurée et en lien étroit avec le monde industriel. Il est essentiel de développer non seulement des solutions souveraines dans les domaines précités, mais aussi de conforter des expertises existantes et parfois déjà au meilleur niveau dans leur domaine (sachant que ces dernières peuvent souffrir d'une masse critique insuffisante, en particulier pour les antennes). Le soutien aux plateformes mobilisables pour conduire ces recherches est indispensable.

4. Environnement intelligent

Contexte sociétal

L'environnement intelligent (ENVI) se réfère à un écosystème où les individus, les objets, les infrastructures et les services sont interconnectés, de manière transparente et omniprésente, pour créer des solutions dites intelligentes et durables aux besoins individuels et aux préoccupations sociétales. Les technologies de l'information et de la communication y jouent un rôle central, et fin 2022, on estime à plus de 4,5 milliards le nombre d'utilisateurs de smartphones, avec un nombre d'objets connectés de plus de 14 milliards, en croissance de 18 %. Les bénéfices sont multiples et couvrent la santé, la mobilité, la qualité de l'environnement, ou encore la gestion des ressources. Les dispositifs connectés offrent au quotidien des services personnalisés et adaptés, par exemple pour la localisation et les déplacements, ou encore pour l'accessibilité, en permettant aux personnes handicapées d'interagir plus facilement avec leur environnement. Les dispositifs de santé, portés ou intégrés aux vêtements, permettent le suivi d'indicateurs améliorant le bien-être et la santé globale, à la fois en matière de prévention et aussi pour les traitements thérapeutiques. A un niveau plus large, les technologies de l'ENVI concourent à l'amélioration des services tels que les transports, l'alimentation, l'éducation, les secours, la santé ou l'énergie, offrant ainsi une meilleure expérience aux citoyens. La gestion intelligente des ressources est consubstantielle à cette approche, réduisant coûts et impacts environnementaux en optimisant l'utilisation des ressources comme l'eau ou l'énergie, et la production de déchets. L'utilisation de capteurs connectés disséminés dans le milieu est un atout précieux pour prendre des décisions éclairées pour la préservation et la gestion durable de l'environnement.

Il faut noter l'existence d'enjeux aux effets potentiellement adverses induits par les technologies de l'ENVI. Certains sont de nature éthique et sociale et concernent la collecte massive de données personnelles, le consentement éclairé, ou encore la transparence des algorithmes employés. Il est primordial de garantir la sécurité et la confidentialité des informations des citoyens par des mécanismes de protection et des normes. Il est par ailleurs tout aussi primordial de considérer l'impact environnemental induit par le cycle de vie des dispositifs de l'ENVI. Dès la conception doivent être pris en compte la durabilité et le

recyclage des composants, ainsi que l'empreinte carbone globale, afin de minimiser l'impact sur la planète².

De manière connexe, les technologies de l'ENVI utilisent massivement les communications sans fil aux fréquences radio. Cela interpelle les citoyens et la société sur les effets des ondes électromagnétiques sur la santé et l'environnement, interrogations sur lesquelles la recherche scientifique doit continuer à apporter son éclairage.

Enjeu scientifique

La recherche scientifique dans le domaine de l'ingénierie est au cœur des technologies de l'environnement intelligent.

La collecte des données requiert des nœuds de capteurs autonomes et communicants, opérant sur le temps long dans des environnements variés, et au sein desquels des microsystèmes assurent la mesure fiable et précise des grandeurs. On y trouve particulièrement des capteurs dans les domaines mécanique, inertiel, acoustique, électrique, magnétique, optique, chimique ou encore biologique. Dans ce cadre, il convient de soutenir de nouveaux paradigmes de microsystèmes, en particulier les solutions de détection capables de mesurer simultanément des grandeurs multiples, avec un haut niveau d'intégration et sans compromis sur les performances.

Pour ces nœuds de capteurs, la gestion de l'énergie à la micro-échelle est cruciale. Les efforts concernent le grappillage, la télé-alimentation et le stockage miniaturisé à haute densité pour pallier l'intermittence de la production et répondre au profil de la consommation du système communicant. Réduire la consommation est tout aussi essentiel. Dans cette perspective, l'exploitation du calcul au niveau du nœud de capteurs (*edge computing*) permet de diminuer la quantité des données à transmettre, entraînant ainsi une dépense d'énergie plus faible. Cette efficacité est encore accrue lorsque des architectures dédiées et spécifiques, par exemple sous la forme de circuits neuro-morphiques, sont employées. Cette intelligence artificielle de proximité, ou *edge AI*, permet d'effectuer des opérations de classification, la prédiction de tendances ou la détection d'événements à un moindre coût énergétique.

En outre, ces approches renforcent la confidentialité des données en minimisant les transferts, tout en améliorant la résilience des systèmes en cas de défaillance du réseau de communication. La sécurité et la résistance aux cyberattaques sont des aspects critiques nécessitant une prise en compte aux multiples niveaux : programmes logiciels, conception des circuits, et dispositifs de communication sans fil. Ces derniers constituent le maillon clef de la connectivité ubiquitaire des capteurs, des objets, des infrastructures et des services de l'ENVI.

La couverture sans fil étendue, incluant la localisation précise des dispositifs connectés, et les communications radiofréquences fiables dans des environnements complexes et denses, requièrent des antennes agiles et des surfaces rayonnantes actives. Elles s'intègrent avantageusement au sein même de l'encapsulation (ou

packaging) des dispositifs connectés, qui devient de ce fait une technologie habilitante. Au-delà de la protection des circuits et systèmes, le packaging permet en effet l'exposition des nœuds de capteurs aux grandeurs à mesurer et intègre des fonctions avancées. Il doit également se conformer à l'utilisation des technologies souples et des matériaux bio-sourcés, non seulement dans le cadre de l'éco-conception de composants durables mais également pour les besoins croissants de dispositifs flexibles destinés à s'intégrer facilement dans l'environnement ou sur l'individu.

Contexte international

L'environnement intelligent est une réalité ancrée et tangible dans nos sociétés depuis l'avènement des réseaux informatiques, des terminaux mobiles connectés, en particulier les smartphones, puis de l'loT et de l'loEE (*Internet of Things et Internet of Everything Everywhere*). Le domaine est ainsi fortement orienté par les acteurs socio-économiques, qu'ils se situent au niveau de la production des composants ou du développement des couches applicatives, mais aussi par les agences de normalisation et de régulation. Il n'en demeure pas moins un champ fertile pour la recherche scientifique et l'innovation dans le domaine de l'ingénierie. Historiquement, le projet Smart Dust, conçu en 1998 par K. Pister à BSAC (Berkeley, USA) et visant à réaliser un nœud de capteur communicant dans un volume de moins de 1 mm³ a été pionnier en son genre et a stimulé à l'international les recherches dans la communauté des microsystèmes. Les défis étaient multiples et nombre d'entre eux restent d'actualité : miniaturisation des composants, performances des capteurs, gestion de l'énergie, communications sans fil et protocoles, intégration, encapsulation...

Ces travaux ont largement contribué à la connaissance d'aujourd'hui. Plus récemment, les programmes de « Villes Intelligentes » ou *Smart Cities* (par exemple le projet européen STARDUST) permettent de confronter les technologies de l'ENVI aux défis posés par la transition énergétique et l'utilisation frugale des ressources, invitant à nouveau à repousser les limites des connaissances et des technologies pour y répondre. D'autres programmes pourraient être cités dans le domaine de la préservation de l'environnement terrestre et océanique ou dans celui de la mobilité électrique autonome, par exemple.

Contexte national

La communauté académique nationale est présente sur tous les aspects cités précédemment. La recherche en microsystèmes, incluant les capteurs, les dispositifs de grappillage d'énergie et les dispositifs de stockage, micro-batterie et micro-super-condensateurs, s'appuie en particulier sur les ressources technologiques du réseau RENATECH+ qui sont du meilleur niveau international. Les recherches liées aux nouveaux paradigmes du traitement de l'information, au niveau des composants, des architectures et des circuits, font l'objet d'activités de recherche importantes dans les instituts CNRS Ingénierie, CNRS Physique et CNRS Sciences Informatiques du CNRS. Il en va de même pour les travaux liés à la sécurité des dispositifs communicants (CNRS Ingénierie et CNRS

2 Voir également la partie traitant de la Sobriété Numérique

Sciences Informatiques), pour laquelle les solutions ciblées au niveau du matériel s'avèrent particulièrement adaptées. Celles-ci doivent être développées dans la perspective de la cryptographie post-quantique. Les aspects concernant les antennes et les surfaces rayonnantes sont traités dans les laboratoires bien identifiés du domaine, et ce sujet est également à rapprocher des activités du PEPR réseaux du futur. Dans ce tableau national, le packaging représente un enjeu scientifique et technologique crucial pour la transition de la puce au composant final malgré un nombre limité de chercheurs impliqués. Il redevient un levier d'innovation stratégique, tant pour l'intégration hétérogène à forte densité que pour l'ajout de fonctionnalités différenciantes. Le PEPR Électronique a initié une action transverse qui a recensé les forces vives en recherche sur le *packaging* en France, soulignant son importance stratégique. Pour capitaliser sur cette dynamique, une *Initiative Packaging*, co-portée par le CNRS et le CEA, est proposée au SGPI-France 2030 par l'Agence de Programme ASIC (du composant aux systèmes et infrastructures numériques). Cette initiative vise à stimuler l'activité scientifique autour du packaging en France, et sera soutenue par une infrastructure nationale ReNaPack. ReNaPack coordonnera les moyens et compétences, faisant le lien entre le monde académique et les acteurs industriels nationaux. Cette approche favorisera l'innovation, le transfert de technologies et la compétitivité de l'industrie française dans ce secteur stratégique.

De manière générale, les communautés impliquées sont structurées par des réseaux et des GDR. On note toutefois l'absence d'un GDR Micro-Nano-Systèmes dont la (re) création est appelée par les chercheurs concernés.

5. Nouveaux outils numériques pour la conception de composants, de circuits et d'architectures intégrées

Contexte sociétal

Depuis plus de quarante ans, la conception des composants, circuits et architectures intégrés s'appuie sur des outils de simulation d'aide à la conception (« EDA » *Electronic Design Automation*). Il s'agit d'un outil essentiel pour le développement des semi-conducteurs, permettant d'accélérer le processus de développement et d'améliorer la qualité et la fiabilité des produits d'une part, et de gérer efficacement la complexité croissante des systèmes électroniques d'autre part. A titre d'exemple, le plus grand nombre de transistors dans un microprocesseur aujourd'hui est de 134 milliards, dans le M2 Ultra (2023) d'Apple basé sur l'architecture ARM et utilisant le processus de fabrication FinFET 5nm de TSMC.

Alors que la réduction des dimensions des transistors était auparavant le seul vecteur permettant d'augmenter le nombre de transistors par puce, aujourd'hui cette augmentation s'appuie également sur l'empilement 3D. Cette tendance s'accroîtra dans les années à venir.

Ainsi l'augmentation de la complexité à l'horizon 2030 dépend de l'empilement 3D monolithique, en plus des changements profonds d'architecture des transistors FinFETs (actuellement 2D) aux structures à grille entourante (*Gate-All-Around*).

Au niveau des technologies, même si les modèles physiques sont loin d'être parfaitement prédictifs, les outils de simulation aident à identifier les architectures et les paramètres des procédés permettant d'atteindre les performances visées, à anticiper le vieillissement, et donc à économiser du temps et des ressources lors du développement industriel. Ils permettent également d'interpréter a posteriori les résultats expérimentaux.

Au niveau de la conception de circuits, la simulation est plus importante encore car la complexité des circuits intégrés et le coût prohibitif du prototypage expérimental imposent une conception assistée par ordinateur uniquement. Conception de composants et conception de circuits sont reliées par la « modélisation compacte », qui vise à générer des modèles efficaces et complets pour chaque composant électronique afin de prédire le plus fidèlement possible son comportement au sein du circuit complet.

Au niveau de la conception architecturale, d'autres outils (*floorplanning*, vérification, extraction...) sont nécessaires pour maîtriser l'interface entre le circuit et l'architecture, sous la forme de bibliothèques de circuits exprimant les caractéristiques géométriques et électriques (consommation, vitesse...) à exploiter.

Enjeu scientifique

Les progrès rapides de la technologie et l'émergence de nombreuses technologies dérivatives voire non-silicium s'avèrent des défis pour le développement de ces outils de simulation, nécessitant des efforts constants de calibration et de développement de nouveaux modèles, non seulement au sein des fabricants, mais aussi au sein du monde académique. Cet effort de recherche doit se poursuivre et s'intensifier pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, la réduction des dimensions des composants, à l'échelle sub-micrométrique voire nanométrique, a fait apparaître des phénomènes physiques nouveaux, nécessitant une révision et amélioration des modèles.

L'émergence du calcul *ab initio* permet des avancées majeures dans la simulation des procédés (dopage, implantation, génération de défauts...) et des composants, qu'il convient d'exploiter en complément des approches plus classiques utilisées en électronique.

Des phénomènes négligeables dix ans en arrière, comme l'impact des contraintes mécaniques ou l'auto-échauffement des circuits intégrés nécessitent le développement d'approches multi-physiques (simulations thermiques, mécaniques, électriques... couplées) prenant en compte non seulement les composants individuels mais aussi leur environnement.

La multiplication des variantes technologiques (mémoires embarquées, composants analogiques, RF, antennes intégrés, capteurs d'image, circuits photoniques

sur silicium...) au sein des technologies silicium et l'émergence d'autres technologies pour l'électronique de puissance (SiC, III-V), pour l'électronique imprimée (organique, pérovskite) ou pour le calcul neuromorphique (spintronique, ferroélectrique, photonique, matériaux à changement de phase...), nécessitent un effort constant de développement de nouveaux modèles et prise en compte de phénomènes nouveaux (comme par exemple la simulation électromagnétique rapide pour l'optique intégrée ou les capteurs d'image).

La complexité croissante des circuits intégrés, qui atteint des sommets avec des centaines de milliards de transistors sur une seule puce, couplée à l'émergence de l'intégration hétérogène de plusieurs circuits intégrés, nécessite le développement d'approches multi-échelles pour concevoir des architectures aussi complexes, et prendre en compte l'inévitable variabilité technologique ou les problématiques de fiabilité et de vieillissement. En effet, l'intégration 3D monolithique homogène ou hétérogène au niveau de la puce, ou l'intégration 2.5D hétérogène au niveau du packaging (empilement vertical, chipllets) rajoute un levier supplémentaire (et donc un degré de complexité supplémentaire) à la conception de ces systèmes déjà très complexes.

Le développement de nouvelles architectures de circuits intégrés, plus performants, plus sûres et moins consommatrices d'énergie (comme par exemple in-memory computing, logique non-volatile ou circuits pour l'intelligence artificielle embarquée, circuits résistants à la contrefaçon ou aux attaques de sécurité...) décuple les besoins en innovation dans le domaine de la conception de circuits.

L'essor de l'intelligence artificielle comme nouvel outil de conception, ouvre de nouvelles perspectives dans la façon de calibrer les modèles ou de gérer les approches multi-échelles.

L'émergence de transistors verticaux/3D dépasse les capacités des outils de placement et de routage conventionnels, et nécessite également de déporter une partie des éléments parasites associés dans un modèle compact plus agile du transistor.

Contexte international

Tous les grands fabricants de circuits intégrés investissent pour maîtriser ces technologies de simulation et de conception, voire les développer en interne. Les équipes d'INTEL, SAMSUNG ou TSMC sont particulièrement actives dans la recherche internationale sur le sujet et contribuent par ailleurs à l'élaboration de la feuille de route internationale du domaine. Un ensemble de sociétés développe également des logiciels pour les fabricants, notamment Cadence Design Systems, Synopsys, Silvaco, Mentor Graphics (Siemens).

Un grand nombre d'initiatives en Asie ou aux USA visent à favoriser les synergies entre la recherche académique et l'industrie dans ce domaine. Ainsi par exemple, l'université de Purdue a mis en place le *Network for Computational Nanotechnology* (NCN) financé par la NSF et le portail

nanoHUB.org comportant 100 000 utilisateurs. TSMC finance plusieurs programmes de recherche dans ce domaine avec les universités de Stanford, Berkeley ou Purdue.

Enfin, le développement et l'utilisation d'outils de conception fait partie des actions du futur *National Semiconductor Technology Center*, financé par le programme américain « *CHIPS and Science Act* ».

A l'échelle européenne, le "EU Chips Act" met en place une plateforme de conception : un environnement virtuel qui sera mis à disposition dans toute l'Union, intégrant un large éventail de services, de bibliothèques IP et d'outils d'automatisation de la conception électronique (EDA). La plateforme sera accessible de manière ouverte, non discriminatoire et transparente, stimulant une large coopération entre les utilisateurs et les acteurs clés de l'écosystème tout en renforçant la capacité européenne en conception de circuits intégrés.

Contexte national

Leader national, STMicroelectronics est un acteur majeur de la conception de technologies et produits électroniques et collabore avec de nombreux laboratoires dans ce domaine, notamment à travers CIME-P (anciennement CMP (Circuits Multi-Projets®)) et le CNFM, fournissant des outils de conception, des design kits et l'accès à la technologie. Développant un large éventail des technologies variées et produisant une partie de sa production en fonderie, STMicroelectronics est de par sa nature même très impliquée dans la recherche en conception électronique et modélisation compacte. Il existe par ailleurs de nombreux autres acteurs industriels dans ce domaine (Thales Research & Technology, Thales Avionics, Menta, Cadence, Continental, GreenWaves Technology, Kalray, IC'Alps, NanoXplore, Prophesee, Safran, Siemens EDA, SiPearl, Synopsys ...).

Par ailleurs, la plupart des fournisseurs de solutions logicielles ont des centres de recherche en France : à Sophia-Antipolis (Cadence, Synopsys) et à Grenoble et environs (Cadence, Synopsys, Mentor Graphics). Les équipes de recherche académique nationale dans ce domaine sont particulièrement actives et fédérées au sein du GDR SoC2.

6. Mécanique, modèles et données : richesse et sobriété

Les sciences de l'ingénieur ont acquis une maturité éprouvée en matière de modélisation, simulation et essais, les trois grands piliers de l'ingénierie, qui ont permis un développement technologique sans précédent dans de nombreux domaines : spatial, transports, énergie, machines, infrastructures civiles et industrielles. Les modèles existants, héritage de plusieurs siècles de science, validés et calibrés, se sont montrés précis et robustes, l'incertitude est maîtrisée, les modèles vérifiés et validés. Les exploits technologiques accomplis en sont la preuve. Les modèles ont évolué en étant accompagnés par des

techniques expérimentales avancées et performantes, permettant d'accéder à des échelles de plus en plus fines, de façon de plus en plus précise, pour observer, mesurer, interagir. Les modèles ont également profité des avancées des techniques mathématiques de résolution, plus fiables et plus rapides, capables de résoudre des problèmes de tailles sans précédent quand ils sont associés à des plateformes de **calcul haute performance**. Il est donc possible de concevoir, optimiser, diagnostiquer, pronostiquer et prescrire. L'ère actuelle s'ouvre avec des défis revisités : le besoin de traiter des systèmes de plus en plus larges, souvent incertains et complexes, et de ne pas seulement se contenter de concevoir, mais aussi d'accompagner les objets de l'ingénierie pendant leur vie en service. Plus que jamais, nous nous attaquons à des systèmes et comportements de plus en plus riches, où nous souhaitons décrire avec précision et prédire avec efficacité. Ces modélisations fines servent de base à l'élaboration de modèles réduits, robustes et éclairants pour l'ingénieur. L'utilisation de la donnée, de plus en plus riche, manipulée par des techniques avancées **d'intelligence artificielle et d'apprentissage machine**, et plus encore, la **nouvelle alliance entre connaissance (physique) et données**, s'enrichissant mutuellement, ouvrent de nombreuses opportunités, pour certaines inédites. Depuis le début des années 2000, les avancées en matière de métrologie, de capteurs, de communication, de calcul, de stockage, ont motivé une flambée dans la collecte et l'analyse des données. La donnée en soi (acquisition et utilisation) n'a pas été une révolution, la vraie révolution a été sa démocratisation et la colonisation de la presque totalité des domaines de la science et de la technologie, à commencer par ceux dans lesquels les modèles ne permettaient pas des prévisions rapides ou précises.

D'ores et déjà, les données en ingénierie s'articulent autour des voies suivantes : une première, basée presque exclusivement sur la donnée, son analyse et l'extraction de signatures, avec des accomplissements majeurs pour le **diagnostic, la classification** ; une deuxième où modèle et données dialoguent pour définir des « DDDAS » (ou *Dynamic Data-Driven Application Systems*) où la donnée est assimilée lors de simulations ultrarapides de modèles qui restent continuellement réactualisés et qui vont à leur tour guider l'acquisition des données ; une troisième où la donnée dialogue avec la physique mais avec une finalité au-delà de l'identification continue et rapide, là où la donnée vient enrichir la modélisation, avec une contribution plus ou moins significative de la connaissance physique préexistante. Dans la troisième voie, on pourra nuancer les cas où seulement les premiers principes de la physique sont mis à contribution et le reste (la partie spécifique) est confié à la donnée, approche qualifiée de véritablement «**data-driven**». Un autre cas où la physique est assimilée dans la construction des modèles concerne les PINN (*Physics Informed Neural Network*) et les TINN (*Thermodynamics Informed Neural Network*, aussi connus comme SPNN — *Structure Preserving Neural Network*), techniques regroupées dans la catégorie du **physics-informed learning**. Enfin un dernier cas, au-delà d'informer, vise à enrichir des modèles existants dans

une sorte de **physics-augmented learning**. Dès lors que l'on dispose de nombreuses données expérimentales ou numériques, l'utilisation des méthodes d'apprentissage peut produire des modèles de comportement surclassant les prévisions des modèles plus classiques. Les exigences réglementaires qui pèsent sur les structures mécaniques industrielles demandent cependant à ces résultats à base d'IA **d'être compatibles avec une démarche explicative** ce qui va représenter un grand défi scientifique de ces prochaines années. Ainsi, de façon générale, les avancées dans l'IA et l'apprentissage automatique permettront de créer des **modèles plus précis pour la conception, l'optimisation et la maintenance des machines et des systèmes mécaniques**. Les **données massives** collectées par les capteurs seront utilisées pour former des modèles prédictifs et améliorer l'efficacité opérationnelle. Les **capteurs IoT** (internet des objets) seront largement intégrés aux machines et aux équipements mécaniques pour collecter, en temps réel, des données sur les performances, l'usure, la consommation d'énergie, etc.

Cela permettra une **gestion proactive de la maintenance et de l'optimisation des ressources**. Enfin, les modèles de simulation de pointe seront utilisés pour concevoir et tester virtuellement des systèmes mécaniques avant leur fabrication physique, réduisant ainsi les coûts et les délais. On fera appel aux jumeaux numériques interopérables avec des plateformes et les données, combinant simulation numérique, accélération des calculs par éléments finis, calculs ab initio, simulation de matériaux, études probabilistes de sûreté, ordinateurs quantiques, IA intégrant les enjeux humains et sociétaux dès la conception, aide à la décision s'appuyant sur l'IA, etc. Les grands enjeux scientifiques associés consistent à trouver des solutions technologiques au service de la neutralité carbone, identifier des vecteurs d'énergie alternatifs, renforcer la performance et la sûreté des moyens de production existants, accélérer la transformation digitale en garantissant la **résilience des systèmes**. Dans un environnement où l'accès aux données massives devient de plus en plus routinier, une nouvelle question se pose. A-t-on besoin de toujours plus de données ? La course effrénée aux données est-elle vraiment la seule piste envisageable ? Afin de répondre à cette interrogation, il s'agit d'analyser la valeur de chacune des données disponibles, à savoir son incertitude associée ainsi que sa sensibilité par rapport aux informations recherchées. Ainsi, on peut voir apparaître la notion de **frugalité** « bien pensée » où l'on cherchera à acquérir les données aux moments et endroits propices et en quantité limitée (à budget limité). Cette sobriété assumée nécessite ainsi de nouvelles manières d'envisager d'une part les essais mécaniques et la manière d'acquérir les données, mais également celles avec lesquelles on simule en phase de conception, par exemple. De même, la façon par laquelle les modèles utilisés sont identifiés et validés devra être revisitée.

En résumé, la mécanique du futur sera caractérisée par une utilisation intensive (mais pas limitée) des données, une réflexion poussée sur la sobriété énergétique, d'acquisition et de stockage et une approche globale axée sur la durabilité et l'économie circulaire. Les avancées

technologiques, notamment dans l'IA, l'IoT et la fabrication additive, joueront un rôle clé dans cette transformation.

7. Dynamique des fluides, thermique, IA et jumeaux numériques

De nombreuses situations de dynamique des fluides et thermique impliquent des phénomènes physiques multiples fortement couplés. Cela peut concerner des couplages du fluide avec un champ scalaire (température, concentration, salinité, etc.), un champ vectoriel (magnétique, électrique, etc.), des couplages entre phases (écoulements dispersés, transport de particules, de gouttes, de bulles, etc.), écoulements en milieux poreux, et bien d'autres situations. Ces couplages peuvent être complexes et multi-directionnels ; par exemple, l'écoulement peut transporter un champ de température (scalaire passif) mais la température peut être un scalaire actif (en convection thermique notamment).

La compréhension de ces phénomènes est notamment indissociable de tout progrès à venir dans le développement d'une industrie plus verte, dans les transitions écologiques et énergétiques, dans la compréhension des processus atmosphériques et océaniques impactant le climat et l'environnement. Quelques exemples emblématiques sont les écoulements multi-phases (omniprésents dans l'industrie et les milieux naturels), le transport turbulent et le mélange, les plasmas magnétisés, les écoulements dans les sols et les milieux poreux, la physique des nuages, etc. La compréhension fine de ces couplages requiert des diagnostics complexes, résolus en temps et en espace, et simultanés des différents phénomènes en jeu. Dans la suite nous présentons les nouvelles méthodologies de recherche pouvant révolutionner la recherche scientifique et technologique en mécanique des fluides, thermique et plasmas.

Sur « L'intelligence artificielle, ou le 5e paradigme de la recherche scientifique »

Au cours de la prochaine décennie, l'apprentissage machine (machine learning, ML) devrait avoir un impact transformationnel sur les sciences physiques. Bien maîtrisées dans un contexte scientifique, ces techniques pourraient améliorer considérablement notre capacité à modéliser et à prédire les phénomènes naturels sur des échelles d'espace et de temps très variables. L'arrivée du ML pourrait constituer l'aube d'un nouveau paradigme de découverte scientifique, succédant à la recherche purement empirique (1er paradigme), l'introduction de la méthode inductive/déductive (2e paradigme), l'avènement de l'analyse numérique (3e paradigme) et la révolution du calcul scientifique hautes-performances et de l'analyse de données à très grande échelle (4e paradigme). Le ML peut encore augmenter de façon spectaculaire notre capacité à analyser et exploiter de grandes bases de données issues de simulations numériques intensives (comme les simulations directes ou aux grandes échelles de la turbulence) ou de mesures expérimentales détaillées (comme de la

vélocimétrie laser ou des champs thermographiques résolu en espace et en temps). Il permettra de basculer vers un 5ème paradigme de la recherche scientifique. Le ML peut notamment permettre d'accélérer ou améliorer la résolution et la modélisation de problèmes physiques multi-échelles, remplaçant certaines opérations trop complexes ou coûteuses par des émulateurs ML entraînés sur des données, ou encore aider à reconstruire les échelles les plus fines et difficilement observables d'une expérience physique ou numérique.

Ceci a le potentiel d'accélérer le processus de génération et d'analyse des données de plusieurs ordres de grandeur. La dernière décennie a vu une explosion de l'application d'algorithmes de ML dans le domaine des sciences physiques, sans toutefois que le potentiel de cette technologie soit pleinement exploité. Les limites viennent en grande partie d'une utilisation de type « boîte noire » de modèles ML disponibles via de nombreuses bibliothèques open-source, sans adaptation suffisante aux besoins des sciences physiques. Utilisés tels quels, les algorithmes de ML sont non seulement extrêmement exigeants en données et coûteux à entraîner, mais ils fournissent des solutions (pourtant vraisemblables d'un point de vue qualitatif et en grande partie quantitatif) qui ne garantissent pas le respect exact des principes fondamentaux de la physique. Il est alors essentiel de repenser l'intégration du ML avec les modèles mécaniques et physiques afin d'intégrer dans leur architecture des contraintes (symétries, lois de conservation, conditions d'existence) permettant non seulement d'assurer la validité physique des résultats mais également de réduire grandement le volume de données nécessaire pour l'entraînement et d'améliorer de façon substantielle la capacité de généralisation. Cette intégration du ML aux modèles mécaniques et physiques devrait engendrer des économies en énergie, grâce à des algorithmes moins coûteux en temps, une réduction du nombre de simulations numériques, et un meilleur ciblage des campagnes expérimentales à réaliser. Cette dernière est une condition essentielle afin de pouvoir bénéficier de la puissance déductive du ML dans la modélisation physique. Sur la prochaine décennie, des avancées encore plus impressionnantes pourraient avoir lieu grâce à l'intelligence artificielle dite « générative » et à l'apprentissage par renforcement. La première a déjà montré un énorme potentiel dans la production de modèles de langage ou de son et images, y compris artistiques.

Sa transposition au domaine des sciences physiques pourrait permettre de distiller dans de grands modèles pré-entraînés, dits « de fondation », de grandes quantités de connaissances scientifiques, afin de formuler de nouvelles hypothèses scientifiques à soumettre à la validation. Les algorithmes d'apprentissage par renforcement, quant à eux, sont capables d'apprendre de façon autonome en proposant des modifications d'un système et en adaptant leurs nouvelles actions à la réponse obtenue.

Ces algorithmes peuvent être intégrés à des expériences réelles ou virtuelles afin de mieux comprendre la façon de réagir aux sollicitations d'un système, ou bien d'identifier des stratégies de contrôle.

IV - Ingénierie pour la santé

L'ingénierie pour la santé à CNRS-Ingénierie regroupe les activités de recherche visant l'amélioration de la santé humaine et le parcours du patient en agissant à la fois en amont de la maladie (compréhension, prévention, dépistage) et lorsque la maladie est déclarée (diagnostic, thérapie, suivi).

Ce domaine de recherche bénéficie généralement d'un soutien public appuyé car il répond à une attente sociétale forte, qui se décline à travers le concept de médecine 6P : prédictive, préventive, personnalisée, participative, fondée sur les preuves et intégrée au parcours de vie. Le vieillissement de la population, le développement des maladies chroniques et les maladies émergentes renforcent cette attente de la société. Une autre raison du soutien public tient au potentiel économique de ces activités de recherche, la santé constituant un poste de dépense important dans les pays développés. Il est ainsi probable que des AAP ambitieux soient lancés dans ce domaine à moyen terme.

CNRS-Ingénierie possède de réels atouts pour répondre à ces attentes : l'institut dispose des expertises nécessaires au développement de technologies de rupture performantes, flexibles et repositionnables, déployables à grande échelle et respectueuses de l'environnement.

Ce chapitre présente les 3 thématiques stratégiques à l'horizon 2030 identifiées par le comité « ingénierie de la santé » :

1. La modélisation du vivant : reposant sur des approches multi-échelles in vitro et in silico, la modélisation de l'humain ouvrira des perspectives disruptives pour la compréhension des maladies et pour l'innovation thérapeutique.
2. Les nouvelles approches pour le dépistage et le diagnostic : ces technologies reposent sur de nouvelles générations de capteurs implantés (2.1) ainsi que sur des concepts innovants d'imagerie médicale portable et hybride (2.2).
3. Les nouvelles approches thérapeutiques : les perspectives thérapeutiques les plus prometteuses seront issues des nouveaux dispositifs biologiques/technologiques implantés (3.1), de l'intégration de robots miniaturisés, sûrs et autonomes (3.2), des thérapies physiques permettant un traitement local optimisé (3.3) et de nouvelles stratégies de production et de délivrance des médicaments (3.4).

Si l'ingénierie pour la santé répond à l'attente d'une meilleure prise en charge des patients, elle doit également prendre en compte la demande sociétale d'un impact environnemental maîtrisé. Des propositions **visant une ingénierie pour la santé à faible impact environnemental** sont présentées en **annexe de ce chapitre**.

1. Modélisation du vivant

Contexte et enjeux

Modéliser l'humain à différentes échelles (du corps entier à la cellule, voire la molécule) pour mieux comprendre la physiologie, les pathologies, le vieillissement, l'effet d'une activité physique, ... est un enjeu des recherches en sciences du vivant, qui nécessite des contributions majeures des sciences de l'ingénierie et des systèmes. Ainsi l'imagerie médicale et la microscopie ont contribué à des progrès énormes dans les domaines anatomiques, biochimiques et fonctionnels à l'échelle « macro » jusqu'aux mécanismes moléculaires à l'échelle cellulaire.

Ces progrès ont déjà permis de voir émerger des « jumeaux numériques » d'organes, en particulier le cœur (consortium piloté par Dassault Systèmes) et le cerveau qui est l'objet de nombreux efforts à partir de modèles mécanistiques multi-échelles intégrant l'AI (infrastructure EBRAINS). Ces modèles et les données pour les enrichir sont mis à disposition des cliniciens et de la recherche clinique au niveau européen (The European Health Data Space (EHDS)), déjà testés dans des essais cliniques (par exemple EPINOV pour l'épilepsie).

Concernant les modèles *in vitro*, les études ont longtemps été menées sur des cellules isolées ou cultivées en 2D, et sont pertinentes pour étudier des phénomènes très spécifiques (cytotoxicité, coagulation). Cependant, ces modèles s'avèrent limités si on s'intéresse aux effets sur des tissus, des organes, des systèmes physiologiques ou le corps entier. Ils ne sont pas capables de reproduire les caractéristiques mécaniques des objets d'étude.

Par ailleurs, la **réglementation des dispositifs médicaux (DM)** de classe II ou supérieure demande désormais, comme pour les médicaments, des évaluations précliniques. Pour ces domaines, se posent ainsi les contraintes de réduction de l'expérimentation animale, associées à des questions de pertinence de ces modèles *in vivo*.

Développer et valider **des modèles « fonctionnels » 3D physiologiquement et biomécaniquement fidèles est donc la voie** pour accroître nos connaissances fondamentales et répondre aux attentes sociétales. Représenter la physiologie ou la physiopathologie humaine (à différentes échelles) en identifiant le modèle adapté à la question scientifique ou technologique posée est le défi majeur de cet axe. A noter que les modèles personnalisés et génériques sont tout aussi importants : les modèles de patients "spécifiques" sont une condition préalable à la traduction clinique et les modèles de patients "génériques" sont la base de la découverte mécanistique.

Pour les approches *in silico*, un des enjeux consiste à **intégrer plusieurs échelles dans un même modèle**, mais aussi à **réaliser le couplage mécanique/physique avec la biologie**, ce qui mène vers la mécanobiologie, en prenant en compte les interactions fluide-structure ainsi que le transport de la matière. On peut citer par exemple les phénomènes d'échange dans les tissus lié au système lymphatique, et son contexte de drainage glymphatique dans le cerveau. Les modèles numériques mécanistiques

s'appuient sur différentes techniques (FEM, FVM, CFD, Lattice Boltzmann, ...), mais manquent en général de lois de comportement ou de conditions aux limites « réelles », ou nécessitent des approches de réduction ou d'homogénéisation pour le multi-échelle. A l'inverse, les modèles corps entier sont peu précis et peu prédictifs à l'échelle inférieure.

Défis scientifiques et technologiques

Différentes approches sont possibles pour répondre à ces enjeux : d'une part, s'appuyer sur les évolutions des capteurs (cf. 2.1) ou autres méthodes d'exploration fonctionnelles pour accéder à de nouvelles données d'entrée (caractéristiques) ; d'autre part, profiter de la collecte de ces caractéristiques (mesurées ou calculées à l'aide de modèles) pour alimenter des approches par IA, qui accéléreront les processus (de conception, d'évaluation ou d'aide à la décision) tout en respectant les aspects de la physique nécessaires à la pathologie étudiée.

Pour les approches *in vitro*, l'enjeu est **d'intégrer le respect des propriétés biomécaniques ou/et biologiques dans le cahier des charges pour la construction d'un modèle** (reproduire les propriétés mécaniques d'un tissu/organe à différentes échelles, mimer les forces s'exerçant sur les systèmes étudiés, ...). Les approches peuvent contenir différents niveaux de complexité. Le premier consiste à fabriquer des fantômes anatomiques à l'aide d'ingénierie additive (fabrication, moule, etc), avec différents types de matériaux, en les couplant à des données de l'imagerie médicale ou numériques. Le second passe par des travaux de bioconstruction/ingénierie tissulaire exploitant les progrès du bioprinting ou d'autres méthodes pour fabriquer des objets 3D de structure complexe et de porosité adaptée pour permettre la colonisation cellulaire, avec présence potentielle de néovascularisation ou d'innervation. Dans les 2 cas, une démarche de métrologie intégrant des capteurs dans ces modèles permettra de contrôler leur fiabilité. Ici, les défis en termes de matériaux et fabrication sont très similaires à ceux des dispositifs thérapeutiques implantés (cf. 3.1).

De façon plus globale, cette **vision systémique** devrait permettre de valider la transposition de ces modèles (*in silico* et/ou *in vitro*) vers la prévision des effets observés chez l'Homme. Les répercussions peuvent être envisagées plus largement, pour étudier et prédire l'impact de l'implantation des DM sur le corps entier ou au moins à l'échelle de l'organe, en lien avec l'implantation de capteurs diagnostiques (2.1) ou de dispositifs thérapeutiques (3.1).

2. Les nouvelles approches pour le dépistage et le diagnostic

2.1 - Capteurs implantés et portatifs

Contexte et enjeux

Qu'il s'agisse de diagnostiquer, éventuellement plus précocement, ou de surveiller en temps réel ou sur le long terme des pathologies chroniques ou à prévalence

élevée, le besoin en capteurs implantés ou portatifs est en très forte croissance pour répondre aux enjeux mondiaux de santé publique. Ces capteurs peuvent être physiques (mesure de température, pH, contraintes mécaniques, signaux électriques, ultrasonores, électromagnétiques, ...) ou chimiques et biochimiques (détection électrochimique ou optique essentiellement). Ainsi, les capteurs de glucose portés en continu ont révolutionné la vie des patients atteints de diabète, leur offrant un moyen de mesure rapide et minimalement invasif.

Ces capteurs ouvrent ainsi la voie à une thérapie personnalisée, plus ciblée temporellement et spatialement, notamment lorsqu'ils peuvent être couplés à des systèmes de délivrance (pompes à insuline par exemple) par des boucles de rétroaction. D'autres pathologies telles que les maladies cardio-vasculaires et respiratoires pourraient bénéficier d'avancées similaires en rendant portatifs/implantés des capteurs existants, ou en développant de nouveaux concepts de mesure à domicile, rapides et fiables.

Ces dispositifs implantés/portatifs deviennent également indispensables quand le modèle traditionnel de suivi des patients n'est pas/plus suffisant (déserts médicaux, crises sanitaires, pandémies, délais de traitements). Les enjeux sont alors un suivi plus étroit des patients tout en limitant les flux dans les laboratoires d'analyse, la rapidité et l'efficacité de prise en charge des patients, ou la substitution à des techniques d'imagerie plus complexes, mais sans compromis sur la précision de la mesure. Si la durée de vie fonctionnelle d'un capteur implanté/portatif pour le suivi d'une pathologie chronique doit être prolongée pour limiter les actes chirurgicaux liés au remplacement d'un dispositif défectueux, des capteurs résorbables in situ répondront à de nouveaux usages émergents, tel que le suivi de la réparation osseuse ou la détection précoce d'infection post-opératoire.

Défis scientifiques et technologiques

Ainsi, les défis à relever dans les prochaines années concernent le développement de nouveaux concepts de capteurs permettant la portabilité/implantabilité de la mesure, notamment de paramètres chimiques et biochimiques, et la fiabilité des mesures, de leur traitement et de leur transmission.

La portabilité et l'implantabilité des capteurs reposent tout d'abord sur la miniaturisation des dispositifs (utilisation de micro-nano-dispositifs (NEMS)), leur frugalité énergétique, le développement de systèmes d'alimentation « sans pile » basés sur le transfert d'énergie sans fil et/ou la récupération d'énergie in vivo (énergie électrochimique, conversion triboélectrique, piézo-électrique, électrostatique, etc...), des techniques de communication par conduction intracorporelle à travers les tissus (par ondes mécaniques ou électriques).

Les données de mesure posent également plusieurs défis scientifiques et techniques à relever. Des capteurs compacts et dotés de capacités de traitement des données sont souhaitables pour réduire la masse d'information transmise. Des efforts en standardisation des données de mesure

et de leurs traitements, le développement d'algorithmes avancés, voire personnalisés, par apprentissage, IA, pour l'élaboration de diagnostics fins et pour le couplage de la mesure à un système thérapeutique (boucle de rétroaction), des applications pour un retour d'information personnalisé vers le patient (conseils temps réel, coaching virtuel...) seront requis. La transmission, mais aussi la gestion et le stockage des données recueillies soulèvent également des défis en termes de leur sécurisation et utilisation, en lien avec des questions éthiques. La fiabilité du diagnostic pourrait être renforcée par le couplage de plusieurs modalités de mesure et l'analyse de leurs données croisées.

Enfin, le développement de matériaux innovants est clé dans le domaine des capteurs implantés/portatifs. Ceux-ci nécessitent en effet une interface optimale avec leur tissu hôte, en particulier pour les dispositifs portatifs d'imagerie ultrasonore, électromagnétique, thermique, ou encore pour les dispositifs d'enregistrement de biopotentiels (EEG, EMG, ECoG...). Une meilleure interface peut être obtenue grâce à des couches micro-structurées améliorant l'adhérence à la peau ou aux tissus, ainsi qu'en choisissant des matériaux et des revêtements, éventuellement biomimétiques, plus adhésifs, conformables et étirables, surtout pour une implantation dans des zones soumises à d'importantes contraintes mécaniques (peau, moelle épinière, muscles). Les défis de la biocompatibilité, voire de la résorbabilité, restent parfois à surmonter, notamment pour les matériaux conducteurs et les couches sensibles employées dans les capteurs chimiques. Ainsi, le développement de capteurs innovants conçus par des approches de biologie synthétique et intégrative ouvrent des perspectives prometteuses.

L'évolution des connaissances dans le domaine des biomarqueurs en relation avec le diagnostic précoce et les pathologies, notamment chroniques, devra également être prise en compte pour la mise au point de capteurs implantés/portatifs toujours plus fiables et pertinents.

2.1 - Imagerie médicale

Contexte et enjeux

L'imagerie médicale en France joue un rôle essentiel dans le diagnostic, le guidage de la thérapie, le suivi et la prise en charge des patients. Elle englobe une gamme de techniques d'imagerie qui, au cours des deux dernières décennies, ont bénéficié de progrès technologiques ouvrant de nouvelles perspectives en termes d'efficacité diagnostique.

Certaines innovations nécessitent des infrastructures lourdes, telles que l'IRM haut champ ou la TEP corps entier de nouvelle génération, qui sont aujourd'hui des installations exploratoires pouvant potentiellement devenir partie intégrante de l'arsenal diagnostique de demain. L'imagerie X par comptage de photons, proposée par plusieurs acteurs privés et déjà présente sur quelques sites cliniques, offre des avantages significatifs en termes de réduction de dose et d'amélioration de la qualité des images.

Des systèmes d'imagerie plus compacts sont entrés

dans les blocs opératoires pour accompagner le geste chirurgical. Cette tendance est amenée à se généraliser et les systèmes d'imagerie portables permettront à terme non seulement d'effectuer des examens diagnostiques et de surveillance médicale à des endroits éloignés des centres médicaux traditionnels, afin de pallier les déserts médicaux en France. Par ailleurs, les instruments hybrides tels que les systèmes TEMP/CT, TEP/CT et TEP/IRM commencent à s'imposer, tirant profit des capacités diagnostiques des deux technologies qu'ils intègrent.

Ces évolutions technologiques sont accompagnées, d'une part, d'un développement croissant de produits de contraste et de radiotraceurs, qui renforcent l'idée d'imagerie compagnon pour optimiser l'acte thérapeutique, et d'autre part, par l'utilisation d'outils d'intelligence artificielle qui permettent déjà d'automatiser voire améliorer, la formation et l'analyse des images médicales.

Vu les innovations présentées ci-dessus de manière non-exhaustive, les enjeux des prochaines années concernent principalement le développement de systèmes portables et ultraportables, l'amélioration des biomarqueurs pour une détection plus précoce et précise des pathologies, associée à une meilleure stratification des patients.

Défis scientifiques et technologiques

L'imagerie corps entier à l'étape exploratoire ouvre de nouvelles perspectives, telles que l'analyse des signaux diffus, et nécessitera de nouveaux outils d'analyse quantitative sophistiqués, prenant en considération le corps entier comme un système intégré.

L'hybridation des techniques nécessite le développement de capteurs compacts et compatibles avec leur environnement, ainsi que la recherche des bonnes plateformes chimiques et/ou familles théranostiques afin de minimiser les écarts de sensibilité des différentes techniques d'imagerie.

Poussés à leurs extrêmes limites, les systèmes d'imagerie ultra-portables seront directement portés sur le corps ou intégrés dans des vêtements ou des accessoires. A plus court terme, deux voies de développements de dessinent : permettre la portabilité de systèmes existants, comme l'IRM portable, et offrir de nouvelles fonctionnalités à des systèmes transportables aujourd'hui déjà, comme l'imagerie échographique ou opto-acoustique du cerveau, actuellement limitées par les aberrations induites par la boîte crânienne.

De manière générale, avec l'augmentation et la diversité des données obtenues, la reproductibilité des analyses et la standardisation des protocoles seront des préoccupations majeures, ainsi que la communication, la confidentialité et la sécurité des données. Ces innovations nécessiteront également l'identification d'applications médicales phares pour lesquelles les combinaisons d'imagerie les plus pertinentes seront mises en œuvre, le cas échéant, dans une démarche translationnelle impliquant des étapes précliniques. Par exemple, l'optimisation de l'imagerie « compagnon » dans une approche théranostique sera cruciale pour maximiser l'efficacité thérapeutique.

3. Les nouvelles approches thérapeutiques

3.1 - Dispositifs thérapeutiques implantés

Contexte et enjeux

Les premiers dispositifs thérapeutiques électroniques implantables développés au cours du 20ème siècle tels que les pacemakers, défibrillateurs cardiaques, neuro-stimulateurs ou implants rétiniens, pour ne citer que quelques exemples, ont montré qu'il était possible de restaurer des fonctions complexes du corps humain. Face au vieillissement de la population et au pressant manque d'organes disponibles pour la réalisation de greffes, la fabrication d'organes complets, biomimétiques ou non, susceptibles d'être à moyen terme transplantés chez l'homme est un enjeu de taille et de longue haleine, mais qui devient à notre portée comme démontré par quelques projets précurseurs comme le développement de prototypes de cœur (CARMAT) ou de poumon (BIOARTLUNG) artificiels.

A une échelle plus modeste, les progrès récents en ingénierie tissulaire (i.e. développement de matrices supports pouvant accueillir composés biologiques et cellules nécessaires à la reconstruction d'un tissu), comme les développements technologiques permettant l'impression rapide de prothèses, par exemple par impression 3D, doivent maintenant se généraliser au bénéfice des patients tout en gagnant en fiabilité et performances, et en développant l'approche personnalisée qu'ils peuvent offrir.

Cette approche thérapeutique personnalisée sera également développée grâce aux dispositifs implantés de délivrance de médicaments, offrant un contrôle spatio-temporel par rapport à une administration systémique, notamment lorsqu'ils sont pilotés par des capteurs via des boucles de rétroaction.

Au vu de leurs spécificités, nous distinguerons ici deux familles de dispositifs thérapeutiques implantés : ceux destinés à jouer un rôle fonctionnel sur du court/moyen terme ou être progressivement assimilés aux tissus, et ceux suppléant un rôle fonctionnel vital pour le patient sur le long terme. Les objectifs recherchés ne sont pas les mêmes pour les deux types de dispositifs, et les verrous technologiques à adresser diffèrent en partie.

Défis scientifiques et technologiques

La première famille de dispositifs comprend les substituts tissulaires ou dispositifs « passifs » au sens électronique, comme les prothèses orthopédiques, les stents, les sutures chirurgicales, mais pourra aussi inclure dans l'avenir des dispositifs électroniques actifs résorbables, par exemple pour stimuler électriquement la cicatrisation des tissus, favoriser la récupération et le renforcement musculaire.

A noter que certains de ces dispositifs aujourd'hui « passifs » pourront être équipés de capteurs pour vérification dans le temps du maintien de la fonction remplacée. Outre remplir son rôle thérapeutique fonctionnel, un premier enjeu pour ce type de dispositif réside dans **sa**

colonisation progressive par le tissu reconstruit, voire sa résorption totale si possible. Un deuxième enjeu concerne la **personnalisation des dispositifs** tout en adressant les coûts de production afin de rendre ces technologies accessibles à un grand nombre de patients. Les développements en matériaux innovants et procédés de fabrication associés sont clés pour répondre à ces enjeux.

Des matériaux hautement biocompatibles, éventuellement résorbables, fonctionnels (par exemple conducteurs électriques, activables thermiquement, injectables et à mémoire de forme pour une implantation minimalement invasive) ou des matériaux pour l'encapsulation et la délivrance d'actifs biologiques ou pouvant jouer le rôle de niches pour la croissance cellulaire ou l'établissement de vascularisation (à utiliser comme substituts de tissus mous mais aussi revêtements d'autres matériaux structurants biocompatibles) sont nécessaires. Les **implants combinant matériaux structurants et entités biologiques**, par exemple issus de tissus autologues du patient, sont amenés à se développer. Les procédés de fabrication personnalisés doivent donc être perfectionnés pour être robustes, rapides et sûrs, en tenant compte des contraintes cliniques (coût, mise en œuvre aisée en milieu médical, compatible avec la stérilisation).

Les dispositifs « actifs » suppléant un rôle fonctionnel vital pour le patient et destinés à être implantés si possible à vie répondent à d'autres enjeux. Un des objectifs ultimes pour ces dispositifs est de **tendre vers un organe artificiel complet et autonome**. Là encore, les matériaux et procédés de fabrication jouent un rôle central. De nouveaux procédés de fabrication 3D, multi-échelles, combinant différents types de matériaux et de propriétés, sont nécessaires pour la réalisation de **ces dispositifs médicaux à l'architecture complexe**. Ces dispositifs doivent présenter eux aussi une bonne interface avec les tissus pour limiter leur encapsulation pouvant conduire à une perte de fonctionnalité, et des **propriétés mécaniques adéquates** au site d'implantation en termes de conformabilité. De plus, comme les capteurs implantés qui seront décrit ci-dessous, ces dispositifs requièrent la miniaturisation des systèmes électroniques embarqués, le développement de systèmes d'alimentation basés sur la récupération d'énergie *in vivo*, et, quand nécessaire, des techniques de communication d'information sans fil à travers les tissus par conduction intracorporelle.

3.2 - Robotique médicale

Contexte et enjeux

La robotique médicale est un sous-domaine de la robotique relativement récent avec des tous premiers travaux de recherche dans les années 1980. Aujourd'hui, le domaine a fortement gagné en maturité et de nombreux robots médicaux sont commercialisés depuis le début des années 2000, avec une présence croissante dans les blocs opératoires et dans les hôpitaux pour un nombre de plus en plus important d'indications médicales.

On citera en particulier : le domaine de la chirurgie coelioscopique des tissus mous dans de nombreuses

spécialités comme, par exemple, l'urologie, la gynécologie, la chirurgie digestive, l'ORL, etc ; le domaine de la chirurgie orthopédique pour la pose de prothèses ; le domaine de la neurochirurgie ; le domaine de la radiologie interventionnelle ou de diagnostic, le domaine de la chirurgie vasculaire, le domaine de la radiothérapie ; etc. Malgré le coût très élevé des systèmes robotiques médicaux, on s'aperçoit aujourd'hui qu'il n'y a pas vraiment de domaines médicaux où la robotique est absente.

Ces robots sont souvent conçus comme des assistants du praticien hospitalier avec une autonomie relativement réduite, c'est-à-dire, sous la supervision du praticien, comme, par exemple, dans le cas des systèmes télémanipulés. Ces systèmes robotiques ont pour objectif le plus souvent d'améliorer la précision des gestes et la qualité des procédures, d'améliorer le confort du praticien, et de réduire drastiquement la courbe d'apprentissage pour les gestes techniquement complexes. La supervision par le médecin du fonctionnement du robot est un moyen de réduire l'exposition des fabricants de robots aux aléas thérapeutiques. Depuis quelques années, l'IA est devenue de plus en plus présente dans le traitement des données médicales en préparation des interventions ou dans le traitement des informations per-opératoires que ce soit pour la commande des robots ou pour modéliser et superviser le fonctionnement du bloc opératoire.

Les enjeux actuels portent sur le développement de procédures de moins en moins invasives, l'amélioration de la sécurité et la réduction des aléas thérapeutiques, une meilleure ergonomie permettant de réduire la courbe d'apprentissage, la réduction du coût des dispositifs robotiques médicaux, l'intégration des données de l'environnement du bloc opératoire, une meilleure autonomie et l'intégration des capacités de l'IA.

Défis scientifiques et technologiques

Il y a un nombre important de défis à relever et de verrous technologiques à faire sauter :

- Miniaturiser les dispositifs robotiques pour être de moins en moins invasif, en particulier, en endoscopie interventionnelle ;
- Développer des capteurs pour un meilleur retour vers le praticien, en particulier dans les procédures minimalement invasives ;
- Développer la co-manipulation pour une robotique plus collaborative avec le praticien ;
- Développer des dispositifs de traitement non invasif comme les traitements à base d'ultrasons pilotés par la robotique et les approches radiothérapeutiques robotisées.
- Développer le prototypage rapide de dispositifs médicaux pour les procédures personnalisées ;
- Intégrer l'IA dans le pilotage des dispositifs robotiques (commande et supervision) ;
- Modéliser et superviser le bloc opératoire et la procédure médicale ;

- Développer les procédures d'asepsie des dispositifs en lien avec les objectifs de développement durable.

3.3 - Thérapie par effet physique

Contexte et enjeux

Les traitements médicamenteux ont démontré leur efficacité sur un grand nombre de pathologies et sont généralement proposés en première intention dans l'arsenal thérapeutique, avec des avancées significatives, comme par exemple dans la prise en charge de cancers ayant jusqu'à récemment un pronostic très sombre. Ils connaissent toutefois encore deux limitations majeures : (i) une toxicité liée à une administration systémique qui peut conduire à l'arrêt des traitements et/ou à l'émergence de phénomènes de résistance et (ii) un manque d'efficacité pour cibler les tissus protégés par les barrières spécifiques (le cerveau et sa barrière hémato-encéphalique, les cœurs névrotiques tumoraux) mais également par des barrières physiques à toutes les échelles : au niveau des tissus, au niveau cellulaire, puis au niveau intracellulaire.

Les thérapies physiques visent précisément à réaliser un traitement ciblé de la zone à traiter et/ou à ouvrir les barrières pour délivrer localement des agents thérapeutiques.

L'enjeu des thérapies physiques actuelles est d'optimiser leur précision et leur spécificité envers les cibles à traiter afin d'augmenter leur efficacité et limiter les effets secondaires, avec quatre pistes de développements complémentaires : l'amélioration des capacités des dispositifs physiques eux-mêmes, le développement de nouveaux vecteurs thérapeutiques, la personnalisation des traitements susceptibles d'interagir avec les rayonnements physiques émis, et l'utilisation des plasmas.

Défis scientifiques et technologiques

L'amélioration des dispositifs physiques passe en premier lieu par le développement des techniques de formation de front d'ondes (optiques, acoustiques, électromagnétiques), qui devraient permettre d'améliorer la précision et la profondeur de pénétration des dispositifs physiques existants, et d'ouvrir la voie vers de nouvelles applications, allant de la destruction tissulaire (traitement tumoraux) à des interactions plus transitoires mais bien thérapeutique (neurostimulation des systèmes nerveux centraux et périphériques). Le développement de nouvelles méthodes d'irradiations (photons, hadrons, atomes, méthodes FLASH-RT, mini-beam) va ouvrir la voie vers une plus grande spécificité des traitements. La miniaturisation de tous ces dispositifs et le développement de systèmes transportables, portables, voire ultraportables (porté à même le patient) permettra des traitements en dehors des centres médicaux traditionnels, afin de pallier les déserts médicaux en France.

Le développement de nouveaux vecteurs, comme les nanoparticules théranostiques multifonctionnelles, démultiplieront les progrès réalisés sur les dispositifs, par leur interaction avec les rayonnements produits. Le repositionnement de molécules sensibles à un type d'irradiation mais aussi activables par d'autres types

de rayonnements (comme le 5-ALA) viendra compléter l'arsenal des vecteurs thérapeutiques, grâce à une meilleure compréhension des mécanismes sous-jacents et de leur efficacité.

Le développement de traitements personnalisés permettra de délivrer une dose thérapeutique adaptée à la morphologie et au stade de la maladie. Le développement de méthodes de mesures, de calculs performants et des interfaces homme machines pour la mise en place de systèmes de rétrocontrôles en temps réel augmentera l'efficacité théranostique tout en minimisant les effets secondaires, avec une individualisation du traitement pour chaque patient, en fonction des images radiologiques anatomiques et fonctionnelles, mais également de l'historique des traitements du patients, de toutes les analyses réalisées, qu'elles soient génomiques, protéomiques, ou métabolomiques.

Les recherches sur les applications biomédicales des plasmas ont connu un essor majeur ces dernières années. Une importante partie de la communauté s'est investie dans l'utilisation des plasmas froids à des fins thérapeutiques. Les recherches concernent notamment le traitement localisé et in-vivo de tumeurs cancéreuses en oncologie, le traitement des brûlures et plaies cutanées pour la dermatologie, la décontamination et la stérilisation de surfaces biologiques ou inertes, la préparation et le développement de matériaux biocompatibles pour des implants, les traitements dentaires ... Ces applications utilisent les propriétés synergétiques uniques des plasmas froids qui créent des espèces réactives et génèrent des champs électriques. Dans les applications en oncologie, le traitement localisé ouvre des perspectives thérapeutiques de tout premier plan en permettant d'envisager de réduire les effets secondaires des chimiothérapies non ciblées. De nombreux défis restent encore à relever dans la compréhension de l'interaction plasma/vivant, par exemple sur le rôle des différentes espèces du plasma en interaction avec des matériaux biologiques et le couplage avec les traitements actuels qui tend à renforcer l'action curative.

3.4 - Production et délivrance de médicaments et biothérapies

Contexte et enjeux

Les biothérapies et thérapies innovantes, parmi lesquelles les thérapies géniques, cellulaires, subcellulaires, l'ingénierie tissulaire, et le développement connexe de nanovecteurs viraux et non viraux (synthétique, biogénique, hybride) pour la délivrance d'acides nucléiques (ADN, ARNm, microARN..), de protéines, de nanoparticules activables ou de petites molécules se heurtent encore à des verrous technologiques majeurs.

Ces verrous concernent autant la conception des vecteurs, leur optimisation et la chaîne de production de ces (bio) thérapies (génie des bioprocédés, contrôle qualité, scale-up, production GMP, réglementation, réduction des coûts, réduction de l'empreinte environnementale...) que les conditions et outils d'administration et délivrance au lit du patient (contrôle de la biodistribution, de la réaction

immunitaire, franchissement des barrières biologiques et physiques dans l'organisme (par exemple, atteindre le cerveau), toxicité, effet à long terme, dispositifs/procédés d'administration, stratification des patients et aide à la décision thérapeutique (personnalisation), suivi des traitements (tests compagnon), transfert industriel et clinique ...).

Défis scientifiques et technologiques

Vectorisation et Administration

Le défi de la médecine personnalisée et de précision est de mieux traiter les pathologies (efficacité) en induisant le moins d'effets indésirables possibles à l'échelle de l'individu (effets secondaires, lourdeur et compliance des traitements, qualité de vie), mais aussi des populations et des sociétés (acquisition de résistance, mutation, pollution environnementale, coûts pour les systèmes de santé, accessibilité des soins, acceptabilité éthique...). La précision repose sur l'identification de cibles biologiques et d'un système d'adressage ou d'activation efficace, minimalement invasif, qui doit franchir des barrières physiques et biologiques aux différentes échelles pour atteindre ces cibles (contrôle spatial et temporel).

La personnalisation (« le bon traitement pour le bon patient au bon moment ») repose sur l'identification de biomarqueurs (test compagnon) qui permettront de stratifier les patients pour qui la thérapie peut fonctionner (aide à la décision) ou pour qui elle peut être adaptée à façon et de manière dynamique (adaptation) : elle permettra de délivrer un traitement adapté et asservi au suivi de marqueurs par des dispositifs externes, portables ou implantés (boucles de rétroaction).

L'ingénierie des systèmes devra permettre des avancées de rupture à ces différents niveaux : citons la mise au point de détecteurs miniaturisés (jusqu'à l'échelle nanométrique) et implantables, sensibles à des marqueurs physiques (température, rigidité, pH, cisaillement, viscosité, accélération ...) et/ou biologiques (métabolites, stress oxydatif, particules virales, bactéries, exosomes...), qui, par un boucle de rétroaction ou en réponse à une activation externe (optique, acoustique, magnétique, mécanique...) puissent délivrer un agent thérapeutique ou répondre à une stimulation physique pour corriger in situ la dysfonction. Si ces dispositifs de détection/délivrance peuvent être intégrés dans l'organisme, pour traiter par exemple les pathologies chroniques ou dégénératives, ils peuvent également être portés pour monitorer des comportements (trajectoire, perte d'activité musculaire...) avec une analyse multimodale et multiparamétrique, aidée par l'IA et l'apprentissage automatique.

Outre les défis de sensibilité et de spécificité de ces technologies de suivi/délivrance, se pose les problèmes d'interface du dispositif avec l'environnement biologique qu'il doit monitorer et/ou modifier : comment atteindre les cibles thérapeutiques et ne pas induire d'effets indésirables ou incontrôlés (par exemple au niveau immunitaire) ? On sait aujourd'hui que tout système, au-delà d'une taille de quelques nanomètres, est modifié par les milieux biologiques (notion de couronne protéique, biofilm etc...)

qu'il rencontre, de sorte que l'adressage de type « clé/serrure » ne fonctionne pas. La conception de nanovecteurs et dispositifs de détection/délivrance doit prendre en compte l'ensemble des interactions dynamiques avec l'environnement biologique et en tirer parti.

Citons par exemple des nanovecteurs qui relarguent leur contenu uniquement dans les artères sténosées sous l'effet du cisaillement anormal. Des procédés innovants d'administration, tels que des aérosols sous pression, spray, micro et nanoaiguilles, hydrogels injectables, l'ouverture des barrières tissulaires et cellulaires par sonophorèse, électroporation, iontophorèse, hyperthermie ou encore ultrasons focalisés peuvent permettre d'atteindre des zones peu accessibles aux thérapies, d'augmenter la dose utile, la reproductibilité et le contrôle temporel de l'administration au bénéfice du patient. Une stratégie complémentaire est d'utiliser les composants biologiques endogènes (cellules, vésicules extracellulaires, vecteurs viraux...) qui naturellement protègent, voyagent et délivrent leur cargo et des messages biologiques vers des cibles spécifiques de l'organisme. L'ingénierie d'encapsulation de gènes, de protéines ou d'ARN d'intérêt thérapeutique dans ces vecteurs biologiques ainsi que leur production à grande échelle est un enjeu majeur, tout comme la maîtrise de la réponse immunitaire qu'ils induisent.

L'hybridation de vecteurs biologiques complexes avec des vecteurs synthétiques plus versatiles et contrôlables, tels que les nanoparticules lipidiques aujourd'hui utilisés dans les vaccins à ARN messagers, participe à de nouvelles stratégies biomimétiques ou bio-inspirées qui utilisent les avantages de chaque système. Enfin les recherches vont vers un contrôle encore accru du vivant, en construisant par assemblage de briques élémentaires, des organelles ou des cellules artificielles. Trois fonctions fondamentales doivent être maîtrisées pour reproduire à minima un système vivant : la compartimentation, le métabolisme ou l'autonomie énergétique et enfin le contrôle de l'information.

Le défi sera d'assembler ces fonctions pour construire des entités fonctionnelles capable de reproduire et corriger certaines fonctions cellulaires, ou encore de créer des entités qui non seulement s'autofabriquent et fonctionnent de manière autonome, mais peuvent aussi s'adapter à leur environnement et acquérir des nouvelles fonctionnalités, reproduisant l'évolution adaptative. On imagine également des systèmes artificiels vivants hybrides embarquant par exemple des capteurs ou nanoparticules activables. Les applications en santé sont nombreuses et encore futuristes, aussi bien dans le domaine des biothérapies injectables pour détecter et corriger certaines fonctions dans l'organisme que des biotechnologies pour la stérilisation, la dépollution, la bioproduction etc

Génie des bioprocédés

En matière d'ingénierie des bioprocédés pour la santé, la bioproduction pose des défis majeurs qui requièrent un grand nombre de disciplines aux interfaces afin d'accélérer le développement de nouvelles technologies et méthodologies pour l'industrialisation de biothérapies et biomédicaments innovants. Un premier verrou concerne

le choix et l'optimisation des sources cellulaires et/ou systèmes d'expression afin d'améliorer les rendements, la qualité des produits et réduire les coûts de production, tout en garantissant la sécurité des patients. Un deuxième défi concerne la modélisation au travers de la constitution de jumeaux numériques de bioprocédés innovants (modélisation multiéchelle, de l'échelle subcellulaire au bioréacteur), leur optimisation et leur monitoring afin de pouvoir les piloter en temps réel de manière automatique et intelligente grâce à des algorithmes aidés en cela par l'IA.

Les défis ont été identifiés par l'Etat autour de différents programmes de la stratégie d'accélération de France 2030 tels que la création et la mise en réseau d'intégrateurs industriels, le PEPR Biothérapies et Bioproduction de thérapies innovantes, ou encore des regroupements d'industriels et d'institutionnels tels que France Biolead, avec pour objectif le soutien de la filière de bioproduction française de biomédicaments.

Des avancées et ruptures sont attendues sur au moins trois axes connectés entre eux :

- le développement de nouveaux outils de pilotage de bioprocédés de production, en particulier de nouveaux capteurs hardwares et logiciels permettant un interfaçage avec l'IA grâce à la modélisation numérique, ouvrant ainsi la possibilité de prises de décision automatiques tout au long du cycle de vie de la bioproduction (contrôle qualité upstream et downstream pour la qualification et la délivrance de lots de grade clinique répondant aux exigences réglementaires).
- la création de dispositifs robotiques innovants pour offrir plus de flexibilité et de sécurité dans les usines du futur, afin de réduire les coûts et l'impact environnemental, tout en intégrant en amont les possibilités de mise à l'échelle des procédés et l'intégration de systèmes de contrôle des bioréacteurs offrant des environnements réactionnels totalement maîtrisés.
- le développement et l'ingénierie des nouveaux systèmes biologiques qui permettront de produire les biomédicaments du futur avec une qualité, efficacité et sécurité accrues et de meilleurs rendements. Des systèmes de culture non conventionnels sont à développer pour contrôler les conditions environnementales nécessaires à l'amplification cellulaire. Parmi les enjeux les plus importants de cette stratégie on peut citer (1) la préservation des phénotypes et fonctionnalités cellulaires ainsi que leur potentiel de différenciation le cas échéant (exemple des cellules souches adultes, IPS, cellules immunitaires T, NK, beta cell ..., cellules génétiquement modifiées (CAR)...), culture en capsule, sur microporteurs, avec des biomatériaux adaptés...) pour la thérapie cellulaire ; (2) la production d'anticorps monoclonaux de nouvelles générations ; (3) de nouveaux procédés intensifiés de bioproduction de vecteurs viraux pour la thérapie génique ; (4) l'ingénierie et la bioproduction de nanothérapies acellulaires (vésicules extracellulaires,

mitochondries, phages, nanovecteurs hybrides etc...) ; (5) mais aussi les thérapies fondées sur les microbiotes comme systèmes complexes et pour lesquels un focus particulier doit être réservé à la préservation de la diversité microbienne, nécessaire aux interactions fonctionnelles avec les cellules et tissus de l'hôte.

Annexe : vers une ingénierie pour la santé à faible impact environnemental

Pour limiter l'impact environnemental des technologies mobilisées pour la santé, des propositions ont été effectuées pour chacun des 3 domaines stratégiques identifiés.

Pour ce qui concerne la **modélisation du vivant**, les matériaux bio-sourcés ou recyclables seront privilégiés pour les modèles *in vivo*. Le design de plans numériques « frugaux » sera intégré la démarche de modélisation *in silico*. Si les modèles *in vitro* et *in silico* existent pour un processus physiopathologique donné, les impacts environnementaux des deux modèles seront comparés. A noter que l'impact environnemental de la modélisation devra être comparé à celui de l'expérimentation animale qu'elle sera appelée à remplacer.

Dans le domaine des **nouvelles technologies pour le dépistage et le diagnostic**, les capteurs implantés utiliseront des matériaux bio-sourcés, biodégradables, voire résorbables ainsi que des composants micro-électroniques frugaux sans batterie ; les capteurs seront conçus pour être recyclables. L'imagerie médicale s'ouvrira à des systèmes plus légers moins énergivores ; les agents de contraste seront collectés/recyclés et la synthèse des radiotraceurs évoluera vers la micro-fluidique moins pourvoyeuse de déchets.

Enfin, les **nouvelles technologies pour la thérapie** intégreront la contrainte environnementale en privilégiant des matériaux résorbables, bio-sourcés et recyclables pour les dispositifs thérapeutiques implantés (propriétés similaires aux capteurs diagnostics implantés). L'impact environnemental des thérapies par effet physique devra être comparé à l'impact élevé de la chirurgie ou de la thérapie médicamenteuse qu'elles remplaceront. Des dispositifs frugaux seront privilégiés pour les systèmes d'émission de la thérapie physique.

V - Ingénierie pour le développement des connaissances et des sciences fondamentales

L'ingénierie constitue un pilier essentiel de l'avancement scientifique contemporain. À la croisée de multiples disciplines, elle repousse constamment les frontières de l'observation et de la mesure, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour la recherche scientifique. L'instrumentation de pointe et les méthodologies innovantes permettent d'explorer l'infiniment petit comme l'infiniment grand, générant des progrès significatifs dans des domaines aussi variés que l'imagerie optique, la métrologie des fluides, ou la détection d'ondes gravitationnelles.

La recherche dans ce domaine exige une synergie étroite entre différentes expertises, allant de la photonique à l'électromagnétisme, en passant par la mécanique, l'acoustique, les matériaux, la thermique, et l'électronique.

Cette interdisciplinarité est cruciale pour relever les défis complexes liés à la conception et à la réalisation d'instruments scientifiques de pointe. Par exemple, le développement des interféromètres géants comme Virgo a mobilisé des compétences en optique, en mécanique, en électronique, et en traitement du signal, illustrant parfaitement cette nécessité de collaboration multidisciplinaire. L'innovation dans ce domaine s'appuie également sur les mutations technologiques récentes, notamment en imagerie numérique haute résolution et haute cadence, en puissance de calcul, et en intelligence artificielle.

Ces avancées ouvrent la voie à de nouvelles approches, comme l'imagerie computationnelle ou l'imagerie neuromorphique, qui promettent de révolutionner notre capacité à observer et analyser des phénomènes complexes. Ce chapitre explore cinq axes : l'imagerie optique aux limites, la visualisation de l'invisible, la révolution attendue de la technologie neuromorphique, l'instrumentation aux limites, et les plasmas.

À travers ces axes, nous examinerons les enjeux scientifiques, les défis technologiques, et les perspectives futures de ces domaines en constante évolution. Cette exploration met en lumière l'importance cruciale de l'ingénierie pour le développement des connaissances et des sciences fondamentales.

Elle souligne également la nécessité d'une approche intégrée, d'une coordination des efforts et d'un soutien pérenne pour relever les défis scientifiques du XXI^e siècle dans un contexte de forte compétition internationale.

1. Imagerie optique aux limites

Contexte sociétal

L'imagerie optique (au sens large, de l'UV au lointain infrarouge et THz) est un thème de recherche technologique et méthodologique extrêmement actif, au croisement d'expertises variées (photonique, électromagnétisme, micro-électronique, micro-nano-technologies, instrumentation et systèmes, métrologie, traitement du signal et de l'information...) et au cœur d'innombrables applications scientifiques fondamentales et appliquées (astronomie, spatial, biologie, science de l'environnement, vision industrielle/robotique...), d'applications défense (imagerie aéroportée/satellite haute résolution, surveillance, imagerie active, veille panoramique, vision nocturne/brouillard, guidage...) et civiles (bio-photonique, médical et clinique, contrôle non destructif, culture et patrimoine, transports, loisirs...).

Sa polyvalence lui permet d'adresser un champ d'observation multi-échelle allant de l'astronomie à la nanoscopie. Son caractère non-ionisant (contrairement aux rayons X) et sans contact (contrairement aux ultrasons HF), ou sa capacité à sonder des échelles de temps allant de l'atto-seconde jusqu'aux échelles géologiques sont d'autres atouts. Le domaine optique apporte également une information spectrale très riche (composition chimique ou structurale) particulièrement intéressante en biologie et médecine (diagnostic, quantification), pour l'environnement ou l'agriculture (pollution atmosphérique, télédétection), l'industrie (vision industrielle, matériaux innovants...), l'astronomie et la défense (décamouflage, guerre chimique/bactériologique). Elle a enfin un rôle important à jouer dans la future transition énergétique et environnementale, tant pour la surveillance des écosystèmes que pour l'accompagnement de la transition industrielle, agricole, sociale....

L'imagerie optique moderne bénéficie parallèlement des développements scientifiques et instrumentaux récents des sources optiques (LEDs, lasers continus/impulsionnels/super-continuuums), des détecteurs (capteurs CMOS ou CCD haute-résolution et/ou grande dynamique, détecteurs à photons uniques, imageurs rapides, spectromètres compacts), des composants (modulateurs spatiaux de lumière, modulateurs électro/acousto-optique, optique intégrée ...) et des ressources informatiques (capacités de stockage et de calcul) qui sont autant de domaines technologiques clés, à forte valeur ajoutée. Elle profite également de nouvelles méthodologies dans la façon de former des images et d'appréhender l'information, notamment en imagerie computationnelle, bénéficiant de la loi de Moore tant pour les aspects composants semi-conducteurs que pour l'utilisation de la puissance moderne de calcul et d'intelligence artificielle. Enfin, l'imagerie optique permet de développer aussi bien des solutions perfectionnées mais de bas coût (pour les pays en développement, le point-of-care, l'électronique grand public comme les téléphones portables) qu'extrêmement complexes et coûteuses (*James Webb Space Telescope*, ELT).

Enjeu scientifique

Ce domaine de recherche est en plein essor et s'appuie sur de nombreuses mutations technologiques et méthodologiques en cours ou à venir, aux nouvelles frontières de l'imagerie optique. Quelques axes de recherche actuels sont listés ci-dessous, sans caractère exhaustif :

La microscopie et imagerie optique biomédicale : la microscopie pour la biologie adresse de très nombreux champs d'application, des systèmes *in vitro* aux neurosciences. Les techniques de microscopie avancée (non-linéaire, Raman, holographique, polarimétrique, par illumination structurée, à feuille de lumière, à super-résolution) sont des domaines de recherche actifs et féconds en innovations. Pour les applications médicales, on peut citer la tomographie de cohérence optique, l'endoscopie optique, l'imagerie ophtalmique, l'imagerie diffuse pour l'intra ou le peropérateur et les approches multi-physiques couplant optique et autres types d'ondes (par exemple photo-acoustique). Au-delà de la biologie, les nouvelles microscopies trouvent des applications pour la caractérisation de matériaux ou la micro/nano-électronique.

L'imagerie en milieu complexe, avec d'une part l'optique adaptative, c'est à dire la correction des aberrations résultant d'une propagation dans un milieu inhomogène (atmosphère, milieu biologique, laser de puissance, fibre optique), doit encore être améliorée pour des applications en astronomie, spatial, biologie et communication... D'autre part, l'imagerie en milieu diffusant demeure un domaine applicatif extraordinairement vaste, en attente de solutions opérationnelles fiables sur le terrain. Les avancées méthodologiques récentes (approches «matricielles» modales ou itératives) se heurtent dans la pratique à la rapidité des fluctuations des propriétés optiques (des modes de transmission) des milieux. Il reste ainsi à adresser un challenge d'importance pour augmenter significativement la rapidité ou bande passante de ces approches afin de les rendre compatibles avec les applications concrètes notamment longue-portée (sous-marin, transport, biomédical, télédétection, défense...).

Le développement de nouveaux capteurs pour l'imagerie, avec de nouvelles capacités de détection (mesure hyperspectrale, polarimétrique, plénoptique, matrices de capteurs de photons uniques, mesure de temps de vol, détecteurs MIR notamment par conversion de fréquence, détecteurs THz et UV), ou avec de l'intelligence embarquée au plus près du capteur (event-ready, détecteur de forme ou de mouvement...) ou encore de plans focaux courbes, revêt également un caractère stratégique. L'imagerie ultra-rapide constitue également un enjeu crucial au plan international, avec notamment le développement des circuits intégrés photoniques (PICs) pour l'imagerie et des composants optiques multifonctions, comme les méta-surfaces.

Les développements méthodologiques en imagerie computationnelle ou imagerie intelligente, impliquant un traitement original de l'information (statistique, spatio-

temporelle, spectrale...) issue de capteurs optiques non-conventionnels (approches co-conception, imagerie modale, imagerie sans lentille, imagerie compressive, imagerie à faible budget de photons) demeure un sujet porteur pour la conception de systèmes d'imagerie innovants dans tous les domaines d'applications pré-cités.

L'analyse d'image (classification, analyse et reconnaissance pour les applications défense, spatial, télédétection ou médicales...) doit bénéficier de la révolution actuelle en intelligence artificielle, et permettre d'exploiter au maximum la très grande taille et richesse d'information (spatiale, spectrale, temporelle, polarimétrique...) fournie par les systèmes d'imagerie moderne.

Pour finir, on note que l'imagerie est un domaine transverse qui comporte des aspects computationnels et informatiques, technologiques et méthodologiques (traitement de l'information et IA). Ce domaine présente un fort lien avec la physique fondamentale, les sciences de la terre et de l'environnement, la biologie et la chimie, les mathématiques.

Contexte international

L'imagerie optique est extrêmement soutenue au niveau international. Toutefois elle est rarement considérée comme une discipline générique à part entière, sinon en silo dans chaque domaine d'application (par exemple astronomie, spatial, imagerie biomédicale...). Si les USA et le Japon occupent indéniablement une position de leadership, l'Europe demeure également très dynamique (Allemagne, UK, Pays-Bas, Suisse et France...). La Chine a également fortement investi récemment dans la recherche pour l'imagerie, avec une nette croissance des publications dans le domaine, parallèlement à une activité industrielle majeure.

Les pays ayant fourni des progrès majeurs récents, comme les USA, bénéficient notamment d'une culture établie de mixité de disciplines comme la photonique et les aspects computationnels, qui se pratique dès la formation au niveau BsC (Licence).

Contexte national

En France, la communauté de l'imagerie optique est riche et variée, avec une longue tradition académique et industrielle. Dans le domaine industriel, de nombreuses grandes et moyennes entreprises (Thales, STMicroelectronics, Horiba, Essilor, PhotonLines, iXblue...) ont des activités fortes en imagerie. On note également un riche tissu de PME (Imagine Optics, Mauna Kea Technology, Varioptics, Lynred, First Light Imaging, Alpao, Cilas...) et la contribution très active des grands organismes (ONERA, CNES, CEA). Récemment, de nombreuses startups en imagerie optique ont émergé (Abbellight, Inspek, DamaeMédical, LightCore Technologies...).

Dans le domaine académique, l'imagerie optique est omniprésente dans de très nombreux laboratoires, que ce soit en astronomie, dans le spatial, en biologie ou dans les centres hospitaliers. Plusieurs pôles nationaux et régionaux fédèrent cette communauté qui est donc bien répartie sur

le territoire métropolitain. Elle est également bien intégrée, nationalement via des GDRs et réseaux, et localement dans des pôles de compétitivité.

Malgré ces atouts, et bien que de nombreux programmes nationaux (en biologie, spatial) soutiennent une composante d'imagerie optique importante, il n'existe pas à l'heure actuelle de grand programme d'envergure permettant de dynamiser l'imagerie optique dans son ensemble et dans toutes ses composantes, et en particulier de renforcer les liens entre monde académique et tissu industriel/économique.

2. Visualiser l'invisible

La métrologie ultra-résolue des fluides a connu une véritable révolution lors des deux dernières années notamment grâce aux progrès spectaculaires de l'imagerie numérique à haute résolution et/ou haute cadence et de la puissance des calculateurs et des algorithmes utilisés pour l'analyse des images. Une nouvelle révolution pourrait avoir lieu à présent grâce à l'imagerie neuro-morphique (voir plus bas). Pour visualiser les écoulements, ceux-ci sontensemencés de petites particules matérialisant des traceurs de fluide dont le mouvement est capté par les caméras. Afin d'étudier les couplages précédemment mentionnés, des tentatives ont été faites lors de la dernière décennie pour développer des particules instrumentées, embarquant des capteurs et de l'électronique permettant de mesurer toutes sortes de grandeurs physiques en même temps qu'elles sont transportées par l'écoulement. Bien que prometteuse, cette approche n'a connu qu'un succès limité, notamment du fait de la complexité de réalisation des particules instrumentées et du fait de la limitation concernant leur taille : alors que les échelles pertinentes des écoulements étudiés peuvent souvent descendre à des dimensions sous-millimétriques, la taille des particules instrumentées peut difficilement descendre sous le centimètre.

La révolution de l'imagerie numérique pourrait toutefois être étendue à l'étude des couplages à toutes les échelles pour peu que les grandeurs physiques sous-jacentes présentent une réponse optique. Dans cette perspective, la possibilité de créer des particules traceurs fonctionnalisées (« particules intelligentes »), présentant une réponse optique des champs couplés, ouvrirait des perspectives inouïes. Ainsi, disposer de particules répondant optiquement tantôt au cisaillement local, à la vorticité, à la température, salinité, pH, champ magnétique, électrique, etc. permettrait d'étudier en profondeur les phénomènes fluides fortement couplés. Bien que des pistes prometteuses (mais non encore pleinement opérationnelles) existent d'ores et déjà, par exemple via l'utilisation de cristaux liquides thermochromiques (pour une mesure simultanée vitesse/température) ou l'encapsulation de paillettes réfléchissantes dans des micro-sphères (pour une mesure simultanée de vorticité), la généralisation de la fonctionnalisation optique de traceurs reste essentiellement à être développée. Elle pourrait notamment bénéficier de collaboration avec les chimistes et les biologistes.

3. Les fluides à l'ère de la révolution neuro-morphique

L'imagerie neuro-morphique est une technologie bio-inspirée de caméras ayant la capacité auto-adaptative de n'enregistrer que les pixels dont le niveau varie au-delà d'un certain seuil pendant un certain temps. Le potentiel de cette technologie, notamment pour la métrologie des fluides, est immense. La capacité auto-adaptative permet potentiellement de décupler la résolution spatiale et temporelle des acquisitions, tout en permettant des enregistrements ultra-résolus sur des temps longs (indispensables par exemple à l'étude des événements rares (cf. axe 4), et hors de portée des technologies des caméras rapides traditionnelles limitées par la mémoire embarquée), et en augmentant considérablement la sobriété énergétique des futures plateformes expérimentales qui deviendraient des ordres de grandeur moins gourmandes quant aux besoins de stockage et de transfert d'images ainsi qu'en puissance de calcul requise pour leur analyse.

Cela représente une véritable rupture dans notre manière de mesurer les fluides. Au-delà des aspects métrologiques, l'approche neuro-morphique (dans l'idée de s'intéresser aux variations des signaux plus qu'à la globalité des signaux) peut également s'étendre à la simulation numérique et à la modélisation théorique des phénomènes fluides, ainsi qu'à l'analyse des données.

Couplée avec l'IA les perspectives potentielles sont vertigineuses. Le développement de ces approches neuro-morphiques impliquent cependant un changement de paradigme dans notre façon de mesurer les fluides, de coder et de traiter les données, de faire des modèles, et nécessite une approche multidisciplinaire, notamment entre chercheurs de CNRS Ingénierie et de CNRS Mathématiques.

4. Instrumentation aux limites

Le portage de ce thème pourra se faire avec d'autres instituts CNRS (CNRS Nucléaire & Particules, CNRS Terre & Univers et CNRS Physique notamment).

Contexte sociétal

L'instrumentation scientifique est un vecteur indispensable aux avancées de la connaissance. Elle permet de valider les théories en les confrontant à l'expérience, ou de mettre en évidence des phénomènes nouveaux, prémices de nouvelles théories. Par ailleurs, chaque progrès obtenu sur la précision des mesures amène à appréhender les processus physiques, chimiques ou biologiques sous un angle différent.

Dans ce contexte où plusieurs instituts du CNRS sont impliqués, le rôle des instruments scientifiques couvre des domaines allant du nanomonde à l'infiniment grand. Leur conception et leur réalisation font appel à de nombreuses expertises de l'ingénierie. Elles incluent la photonique et l'électromagnétisme, la mécanique et l'acoustique, les matériaux et la thermique, l'approche quantique et

relativiste, l'interférométrie atomique, les mathématiques et leur implémentation numérique, l'électronique et la théorie de l'information. Les performances sont essentielles et les contraintes nombreuses, en particulier lorsqu'il s'agit d'opérer en environnement sévère ou extrême.

Le succès de ces instruments est propice à des développements et des découvertes exceptionnelles qui servent les enjeux sociétaux d'aujourd'hui et de demain. Par exemple, l'émergence des microscopies en champ proche (STM et AFM) dans les années 1980 a révolutionné les nanotechnologies et les nanosciences en permettant l'exploration du nanomonde organique et minéral. Parallèlement, des interféromètres géants, comme Virgo (impliquant étroitement IN2P3), ont été développés pour détecter les ondes gravitationnelles et ouvrir une nouvelle fenêtre d'observation de l'univers. Des performances qui semblaient irréalistes dans les années 1990, notamment la détection d'une variation relative de longueur de 10^{-22} , ont été obtenues. Les projets de grand télescopes (ELT), la mesure du temps avec une précision extrême par les horloges atomiques, ou de la gravité grâce aux capteurs inertiels à interférométrie atomique, sont d'autres exemples de succès en appui direct sur l'instrumentation.

Les laboratoires de recherche se sont ainsi massivement investis dans l'instrumentation scientifique pour une métrologie de premier plan. Il convient de soutenir cet effort de recherche et d'innovation en ciblant les ruptures conceptuelles ou de mise en œuvre afférentes au domaine de l'ingénierie. Cela fournit par ailleurs d'importantes possibilités de valorisation, pourtant insuffisamment exploitées, pour le transfert vers l'industrie et les services.

Enjeu scientifique

L'instrumentation de pointe participe d'une multitude d'enjeux scientifiques parmi lesquels un nombre limité d'exemples est ici présenté, pour illustration.

Dans le domaine de la microscopie à force atomique (AFM), la vitesse d'imagerie dépasse aujourd'hui une dizaine d'images par seconde en liquide, conduisant à l'observation dynamique de molécules biologiques en milieu natif. Cette réalisation a été rendue possible grâce aux progrès des micro-actionneurs piézoélectriques, des systèmes d'acquisition et de traitement des signaux, de l'asservissement, ainsi qu'à la fabrication de sondes cantilevers ultra-miniaturisées. La résolution temporelle actuelle de l'AFM, de l'ordre de la microseconde, ne permet toutefois pas d'accéder à des processus pour lesquels d'importantes questions fondamentales restent ouvertes.

C'est le cas par exemple de la spectroscopie des complexes moléculaires biologiques, où l'accès complet à des processus essentiels comme les transitions de conformation, la formation de liaisons, la création de complexes d'adhésion ou d'états intermédiaires, nécessite une résolution temporelle de l'ordre de la dizaine de nanosecondes. Relever ce défi exige d'augmenter la fréquence de résonance des sondes AFM jusqu'au GHz, ce qui est hors de portée des cantilevers usuels. Pour y parvenir, les technologies des capteurs microsystèmes optomécaniques sont très prometteuses.

De telles sondes au GHz sont également incontournables pour d'autres applications, notamment dans la perspective d'un AFM fonctionnant à la limite quantique à ultra-basse température, avec un potentiel de résolution ultime au niveau du phonon unique.

On note aussi que, à l'instar de nombreuses autres techniques de caractérisation, des avantages et de nouvelles perspectives sont attendus pour le champ proche par l'intégration colocalisée avec d'autres méthodes d'analyse (optique, infrarouge, THz, champ magnétique...)

Dans un tout autre domaine, les interféromètres Virgo et LIGO, proposés dans les années 1990 et opérationnels depuis 2015, ont requis plusieurs décennies de développements expérimentaux extrêmement variés pour la détection des ondes gravitationnelles. Cet objectif ambitieux est encore un moteur d'amélioration de plusieurs technologies, qui peuvent à leur tour être utilisées dans d'autres domaines de la recherche fondamentale ou appliquée (métrologie des distances et des fréquences, technologies quantiques, matériel à faibles pertes mécaniques, isolations acoustiques et sismiques, électronique à bas bruit...). Dans ces interféromètres géants, toute l'instrumentation est isolée de l'environnement grâce à l'utilisation de suspensions sismiques et de systèmes à ultravide, de façon à réduire l'impact des bruits quantique, thermique, optique, sismique et acoustique. L'instrumentation comprend des lasers continus de haute puissance avec une très grande stabilité en fréquence et en amplitude. L'interféromètre nécessite également des miroirs de caractéristiques optiques exceptionnelles (planéité meilleure que le nanomètre, pertes par diffusion et absorption inférieures à quelques ppm), avec un bruit thermique qui reste encore à minimiser. Le développement de ces optiques nécessite non seulement une technologie de fabrication adéquate, mais aussi la métrologie associée.

Cela mobilise des recherches dans la modélisation et la caractérisation des couches minces optiques, et leur fabrication sur de grandes surfaces. D'autres technologies cruciales pour la détection des ondes gravitationnelles comprennent le développement et l'injection d'états de lumière non classiques (*squeezed*) pour réduire le bruit quantique. Le développement d'électronique numérique à grande dynamique et à bas bruit constitue également un facteur crucial pour accroître la sensibilité. Enfin, du point de vue sismique, un système complexe de rétroaction est nécessaire et met en jeu des centaines de boucles numériques fonctionnant en parallèle. De nombreuses améliorations sont attendues pour atteindre les objectifs scientifiques de la prochaine génération de détecteurs d'ondes gravitationnelles, comme Virgo_nEXT (amélioration de Virgo à l'étude pour les années 2030) et Einstein Telescope, le détecteur Européen récemment inscrit dans la feuille de route européenne des grandes infrastructures de recherche (ESFRI).

Un troisième exemple est donné par le développement des capteurs atomiques, horloges et capteurs inertiels par interféromètres atomiques, qui ont déjà démontré leur supériorité dans les domaines des mesures de précision du temps et du champ de gravité. Ces développements ont

été étroitement liés à ceux des lasers pour la manipulation, le refroidissement et le piégeage des atomes, mais nécessitent également de nombreuses compétences technologiques en ultravide, en électronique très bas bruit, ou dans les méthodes de fusion de capteurs avec des capteurs classiques.

Ces développements doivent être poursuivis pour de nouvelles espèces atomiques et être accompagnés de l'étude de protocoles quantiques avancés (utilisation de méthodes de contrôle optimales d'intrications spécifiques, développement de réseau de capteurs). Ces efforts permettront de miniaturiser, fiabiliser et accroître leurs performances. Les nouvelles générations d'horloges atomiques dans le domaine optique visent des exactitudes de 10^{-18} et pourront améliorer les échelles de temps pour une utilisation très large en science et dans la société.

Elles visent également à améliorer les tests de la physique fondamentale, comme la recherche de matière noire ou la compatibilité entre mécanique quantique et relativité, pour ouvrir des champs d'applications en géodésie dite chronométrique en donnant un accès direct au potentiel gravitationnel. Dans le domaine des géosciences également, les nouveaux capteurs inertiels atomiques permettront d'atteindre des performances inégalées sur la mesure du champ de gravité, en particulier en développant des capteurs embarqués, sur bateau, avion ou satellite. Par l'accès au champ de pesanteur à toutes les échelles, ces capteurs donneront une vision globale de celui-ci et de son évolution.

Ces mêmes développements permettront aux interféromètres atomiques de pousser d'autres tests de physique fondamentale, comme le principe d'équivalence ou de la neutralité des atomes, mais également d'envisager des applications en navigation inertielle.

Contexte national et international

L'instrumentation scientifique est soutenue par plusieurs agences/organismes (ESA, ESO, NASA, CNES, AID, CERN, CEA, CNRS...) et de grands programmes/projets internationaux (LIGO/Virgo, SKA, ALMA, ELT, Horizon Europe, ESFRI, ITER, LMJ/NIF...). La France est naturellement impliquée dans nombre de ces projets impliquant une multitude de pays.

5. Plasmas

Contexte sociétal

La recherche sur les plasmas est marquée par une prise de conscience croissante de leur potentiel pour relever des défis majeurs du 21^e siècle. Les plasmas, quatrième état de la matière, offrent des solutions dans des domaines cruciaux tels que l'énergie, l'environnement, la santé et les matériaux avancés. Dans le secteur de l'énergie et de l'environnement, les plasmas froids jouent un rôle déterminant dans la transition énergétique. Ils ouvrent la voie à de nouveaux procédés à faible coût énergétique pour la production et le stockage d'hydrogène, la production d'ammoniac, et diverses applications "Power-to-X".

Leur utilisation s'étend également à l'optimisation de la combustion et à la dépollution de l'eau et des effluents gazeux, offrant des solutions pour traiter les micropolluants et convertir les gaz à effet de serre. Dans le domaine de la santé et de l'agriculture, les plasmas froids ouvrent de nouvelles perspectives thérapeutiques en oncologie, dermatologie et pour les implants, permettant des traitements localisés et moins invasifs. L'agriculture bénéficie également de ces avancées, avec des applications promettant une réduction de l'utilisation d'engrais chimiques. Enfin, les plasmas sont essentiels dans les secteurs des matériaux avancés, de la microélectronique et du spatial. Ils contribuent à la synthèse de nouveaux matériaux, aux procédés de fabrication en microélectronique, et à la propulsion des engins spatiaux.

Leur rôle dans la sécurité industrielle, notamment pour la prévention des risques liés aux décharges électriques, souligne leur importance transversale.

Pour continuer à repousser les frontières de l'innovation, il est crucial de maintenir et d'intensifier la recherche fondamentale sur les plasmas. C'est en approfondissant la compréhension de leurs propriétés et comportements complexes que pourront véritablement avancer les connaissances pour ouvrir la voie à des applications encore inimaginées aujourd'hui.

Enjeu scientifique

Les plasmas et les décharges électriques, milieux complexes s'il en est, sont aujourd'hui caractérisés par l'importance considérable de leurs applications industrielles dans des secteurs historiques comme la microélectronique ou interdisciplinaires comme l'énergie, la médecine, l'agriculture, le spatial, le biomédical... Ils sont en particulier au centre de nombreux questions portées par la transition énergétique, même s'ils sont trop souvent traités comme des « outils » plutôt que comme des objets d'étude dans les appels à projets nationaux et internationaux. Qu'il s'agisse par exemple de la production et du stockage d'hydrogène, de la conversion du CO₂, de la production d'ammoniac, d'analyse ou des traitements de surfaces, les procédés plasmas sont amenés à avoir un rôle déterminant dans le « Power-to-X ». Ils sont bien entendu très étudiés, qu'ils soient produits par des sources électriques, des lasers, ou d'autres méthodes. Cela tient à leur caractère multiphasique (gaz, nanoparticules, gouttelettes, liquide, bulles dans un liquide, micro-fluidique, etc.) et multi-échelles, à la fois en temps (de la femtoseconde à la seconde) et en espace (du nanomètre au mètre), qui soulève des questions fondamentales majeures. Par exemple, la connaissance des flux d'espèces à l'interface entre un plasma et un liquide fait actuellement l'objet d'avancées remarquables. L'interaction entre des espèces actives d'un plasma et des surfaces catalytiques pour la production de vecteurs d'énergie notamment motive aujourd'hui de nombreuses études, tant expérimentales que théoriques. La compréhension fine des processus physico-chimiques dans le volume plasma et à l'interface avec les surfaces est indispensable pour envisager le développement de matériaux et de dispositifs innovants. Surtout, la communauté plasma en France bénéficie d'une structuration solide et précieuse, grâce à des structures

comme les GDR et le réseau des plasmas froids. Dans ce contexte, il semble essentiel d'orienter les moyens de recherche sur plusieurs aspects.

Tout d'abord, il conviendrait d'asseoir le leadership français dans ce domaine de recherche en motivant des études sur l'objet plasma en tant que tel. Ce travail de fond est essentiel pour parvenir à des ruptures technologiques, seules à même de changer l'impact global de la recherche dans ce domaine. Cela passe naturellement par le design des sources électriques et l'interaction avec les sources de lumière et des lasers en particulier, par la compréhension des phénomènes dissipatifs (radiation, turbulence, ondes...) et par la maîtrise des interactions entre les espèces actives et leur environnement qu'il soit solide, liquide ou gazeux. De tels travaux requièrent à la fois des outils expérimentaux de pointe, en particulier pour la caractérisation des milieux ionisés, mais aussi des moyens de modélisation spécifiques en raison de la diversité considérable des phénomènes observés. Dans le premier cas, le développement de nouveaux diagnostics in situ permettrait de compléter les outils expérimentaux déjà disponibles en ouvrant de nouvelles possibilités d'étude des milieux ionisés, comme par exemple tout ce qui a trait au diagnostic de l'interaction laser/plasma-matière ou la visualisation des phénomènes dynamiques. Dans le second cas, l'alimentation des bases de données en « open access » est essentielle à la fiabilité des calculs. Certains secteurs émergents, comme l'intelligence artificielle, devront faire l'objet d'un investissement particulier pour offrir de nouvelles manières de traiter les données utiles à la communauté des plasmiciens.

Enfin, il serait important de poursuivre la mise en place de plateformes nationales. Il est intéressant à ce titre de disposer de quelques outils mutualisés dans le cadre du réseau des plasmas froids, outils d'ailleurs adossés à des compétences spécifiques. Il n'y a pas encore de ligne de lumière dédiée à des mesures plasmas par exemple. Il serait aussi sans doute utile de développer un banc d'étude national mutualisé des interactions plasma-surface sur ligne de lumière. De nombreuses équipes ont développé des modèles adaptés à différents types de plasmas, et il serait important de poursuivre les récents efforts initiés au niveau international sur la vérification et la validation des codes et modèles plasmas. Pour cela, il serait nécessaire de définir des cas-tests de référence bien documentés qui seraient utilisés pour vérifier les modèles et codes (en comparer les résultats de codes entre eux) ou les valider (en comparant les résultats avec des résultats expérimentaux). Des programmes transverses aideraient à proposer des outils open-source communs et des cas-tests de référence. Enfin, un effort de formation sera garanti pour assurer le transfert des savoirs.

VI - Matériaux du futur

Les matériaux et leurs surfaces jouent un rôle majeur dans les différents systèmes ou structures de la plupart des domaines de l'ingénierie. La recherche développée dans nos laboratoires consiste à proposer des solutions matériaux optimisées et durables, notamment pour la maîtrise des processus de propagation, de diffusion, ou de radiation de champs auxquels ils sont soumis dans leurs systèmes ou structures (concentration chimiques, température, déplacements, courants, ondes électromagnétiques, optiques, acoustiques...)

Même pour les grandes classes de matériaux denses bien connues et/ou de grande diffusion (métaux, céramiques, polymères...), des progrès importants doivent être réalisés pour relever les défis qui subsistent pour optimiser (voire concevoir de nouvelles) formulations, nano et microstructures et, de facto, les propriétés physiques des matériaux en fonction de cahiers des charges prédéfinis. Dans cette démarche de conception de matériaux (materials by design), où l'introduction d'outils d'intelligence artificielle et d'apprentissage prend une place intéressante (Materials Genome Initiative, PEPR DIADEM par exemple), le principal défi est d'optimiser la chaîne allant du procédé de synthèse et de mise en forme du matériau, aux propriétés du système qui l'utilise, jusqu'à son recyclage voire sa réparation. Cette optimisation passe par la compréhension, l'identification, la caractérisation et la modélisation aux échelles d'intérêt des structures et des phénomènes couplés et complexes se produisant à chaque étape de ce cycle de vie. Ce travail fondamental, qui a déjà commencé il y a largement plus de cinquante ans, doit être poursuivi en vue de l'amélioration des propriétés visées, de la réduction du coût énergétique des procédés de mise en œuvre et des contraintes environnementales. Dans cette veine, nos laboratoires jouent un rôle clé, aux côtés de ceux des instituts de Chimie et Physique.

Avec une demande grandissante de matériaux multifonctionnels aux propriétés optimisées (permittivité, perméabilité, conductivité, élasticité, résistance, ténacité, adsorption, tribologie...), et avec le souci additionnel de vouloir piloter à façon par exemple, l'anisotropie, l'inhomogénéité, la non-linéarité, etc., l'approche usuelle précédente est intéressante mais peut atteindre ses limites. Pour les dépasser, une approche complémentaire s'avère pertinente et se développe grandement depuis une trentaine d'années au sein de nos laboratoires qui ont une expertise reconnue en la matière. Elle consiste à tirer parti d'une échelle intermédiaire, la « mésostructure », dans laquelle l'architecture du matériau peut être pilotée par hybridation des matériaux et/ou optimisation de leur géométrie : les matériaux composites et les matériaux cellulaires en sont les premiers exemples de référence. Cette démarche en plein essor a permis de faire naître une classe nouvelle et grandissante de matériaux dits architecturés, aux propriétés physiques optimisées. Dans cette famille, les métamatériaux ont émergé depuis une vingtaine d'années et sont aujourd'hui eux-aussi activement étudiés du fait de leurs propriétés physiques (électromagnétiques, acoustiques, optiques, thermiques, mécaniques...) hors norme.

Dans tous les cas, cette démarche nécessite le recours à des procédés d'élaboration et de mise en forme des matériaux et de surfaces innovants (comme par exemple la fabrication additive), de nouvelles procédures de caractérisation et de modélisation multi-échelles. Cette démarche peut là-aussi tirer profit des avancées récentes sur l'intelligence artificielle et la fouille de données.

Dans ce contexte global, nous présentons ci-après trois visions prospectives (parfois concourantes) sur l'ensemble de ces matériaux, tels qu'ils sont perçus et étudiés dans nos différentes communautés de sciences pour l'ingénieur : (i) celle des micro- et nanotechnologies, des micro- et nanosystèmes, de la photonique, de l'électronique, de l'électromagnétisme, et de l'énergie électrique, (ii) celle de la mécanique des solides, des matériaux et structures, de la biomécanique et de l'acoustique, (iii) celle de milieux fluides et réactifs pour les transports, les transferts et procédés de transformation.

1. Matériaux et micro/nanotechnologies, micro/nanosystèmes, photonique, électronique, électromagnétisme, et énergie électrique.

Un focus appuyé sur les matériaux et surfaces architecturés, les métamatériaux et métasurfaces

Depuis de nombreuses années, des efforts intenses sont consentis dans ce vaste secteur pour conférer aux matériaux, par architecturation à une échelle intermédiaire, des propriétés intrinsèques sur mesure, grâce à un processus d'homogénéisation multi-échelle induit par structuration/organisation imposée en surface ou en volume, de nature aléatoire ou déterministe. Ces matériaux architecturés interviennent dans une majorité de systèmes (télécommunications, espace, observation de la terre, défense, IoT, énergie, vivant, environnement...). Leur émergence est récente puisqu'elle s'est appuyée sur le développement des micro- et nano-technologies, conjointement à la puissance des calculateurs. Malgré ce contexte, les nouvelles possibilités offertes par ces matériaux architecturés restent insuffisamment explorées et méritent d'être soutenues.

Grâce à des techniques de synthèse largement avérées, aux technologies de dépôt de couches minces amorphes (*Magnetron Sputtering, Plasma Assisted Deposition...*), et à la précision des systèmes de contrôle optique *in situ*, les filtres interférentiels (structurels 1D) ont atteint un niveau de maturité remarquable et permettent d'accéder à une multitude de fonctions optiques devenues indispensables en télécommunications, espace, biomédical, microélectronique, lunetterie, bâtiment... Plusieurs défis restent à relever, dont les stratégies de contrôle optique *in situ*, l'ingénierie de la dispersion de phase, la réduction des pertes par absorption et diffusion (au-delà de la barrière du ppm) et du bruit thermique, la tenue aux flux lasers intenses, le contrôle du rayonnement thermique, et la « pixellisation » des composants...

Les hétérostructures de van der Waals, empilements de matériaux 2D, constituent une nouvelle classe de matériaux architecturés qui pourraient impacter l'ingénierie et le développement de composants. Le contrôle de l'angle entre deux monocouches peut révéler des propriétés originales, comme par exemple la ferroélectricité ou de la supraconductivité. Les très faibles épaisseurs en jeu conduisent à des tensions et des énergies d'actuation très faibles, ce qui est favorable à la sobriété des composants.

En RF, la structuration des matériaux par impression diélectrique ou métallique a ouvert la voie à de nouvelles technologies d'antennes conduisant à des performances inédites en champ de vision, largeur de bande et façonnage de diagramme de rayonnement, ou en conception/réalisation de structures polarisantes et d'adaptation en scansion de grands réseaux d'antennes. Le développement de lentilles idéales ou de structures RF pour l'invisibilité

radar ou la réduction de la section radar, sont des objectifs toujours d'actualité avec un fort impact applicatif.

Les métasurfaces (structuration 2D) sont venues compléter cette panoplie de composants multicouches, notamment par une extension aux domaines de la RF, de l'acoustique et la thermique, mais aussi grâce à leur capacité de contrôle angulaire ou spatial. Leur émergence doit permettre encore d'alléger et simplifier nombre de systèmes imageurs et de communication, RF et optiques, en privilégiant un contrôle spectral et polarimétrique plus étendu. Un effort doit être consenti sur les techniques de synthèse, encore peu présentes pour ces composants. L'hybridation des métasurfaces, des sources et des filtres interférentiels confèrera plus de degrés de liberté pour un contrôle spatial, spectral ou temporel, ou pour l'exaltation large-bande contrôlée, et l'accordabilité. Enfin, le thème des métasurfaces dynamiques, aux fréquences RF et/ou optiques, devra être rapidement exploré. Dans tous les cas la capacité de réaliser ces composants sur de grandes surfaces à coût modéré demeure essentielle.

Les métamatériaux (structuration 3D) ont couvert une variété de domaines incluant la RF et l'optique, l'acoustique et la sismique / mécanique, l'hydrodynamique et la thermique. Leur essor a été entravé par la complexité des structures à réaliser (forts gradients spatiaux de propriétés physiques anisotropes). La résolution des problèmes inverses associés aux techniques d'homogénéisation pourrait pallier cette difficulté. Au-delà des effets collectifs dans les matériaux structurés, le contrôle local des ondes électromagnétiques, spécifiquement en champ proche, s'appuie aussi sur des objets individuels, comme des cellules unitaires sub-longueur d'onde, plasmoniques ou diélectriques. Ces objets ont la capacité de confiner et d'exalter localement la densité d'énergie électromagnétique. Plusieurs aspects majeurs sont à signaler, parmi lesquels le développement d'antennes efficaces pour des applications spatiales ou de communications haut-débit, l'excitation modale de sources intégrées ou l'apodisation en phase et amplitude de la surface rayonnante, la transition vers des applications de type capteur biologique, biophysique moléculaire, photocatalyse, nano-pinces optiques et intégration plasmonique. On note également les efforts portant sur la compréhension des mécanismes sous-jacents tels que le couplage fort, les électrons chauds et la thermo-plasmonique, la non-localité et la chiralité.

Parallèlement, des effets collectifs peuvent être obtenus par l'inclusion de nanoparticules distribuées dans une matrice, et pouvant résulter d'une auto-organisation photo-induite, à faible coût et sur de larges domaines. L'ingénierie du désordre a naturellement prolongé ces notions de structuration/gradient/inclusions, en particulier en contrôlant la transparence à partir des statistiques de corrélation entre centres diffuseurs. On note également, à une autre échelle, qu'en RF la distribution aléatoire de métasurfaces ou métamatériaux dans des bâtiments intelligents fournit une nouvelle opportunité pour des communications efficaces et haut débit avec des utilisateurs mobiles. Les fibres optiques ont également fortement participé de l'émergence des matériaux architecturés,

notamment via l'introduction des fibres micro-structurées. Elles sont devenues le lieu d'exacerbation d'effets non linéaires de sources lasers à large bande qui bouleversent les approches instrumentales, par exemple pour l'imagerie biophotonique. Leur extension à des domaines spectraux inusuels demeure un challenge que la communauté scientifique s'efforce de relever en proposant des développements de fibres optiques composites à profils complexes.

D'une façon générale, la fibre optique devient un laboratoire privilégié des interactions entre la lumière et différents états de la matière, avec des finalités applicatives réelles. Des liquides corporels sont analysés *in vivo* pour la détection ultra-précoce de maladies (détection picomolaire ou de molécules uniques). L'interaction gaz-lumière est au cœur d'enjeux majeurs pour les technologies quantiques, la métrologie ou le traitement de signaux avancés. La fonctionnalisation des fibres optiques à cœurs solides constitue aussi l'une des innovations attendues pour le contrôle des non-linéarités optiques (communications, lasers) ou de la dilatation thermique, du seuil d'endommagement optique (sources laser ultrapuissantes, armes laser, espace, sport d'énergie). L'avenir des matériaux architecturés s'enrichit également par l'émergence de nouvelles générations de semi-conducteurs et de leurs matériaux associés, notamment les diélectriques. Ces matériaux présentent des propriétés particulières qui ouvrent de nouvelles perspectives dans divers domaines. Par exemple, les semi-conducteurs à ultra grand gap sont prometteurs pour les applications de puissance et les environnements à haute température. L'innovation se trouve aussi dans la combinaison de matériaux, comme l'association de matériaux 2D et 3D, et dans l'hétérointégration qui permet de combiner les avantages de différents matériaux au sein d'un même dispositif. Les matériaux fonctionnels, capables de modifier leurs propriétés en réponse à des stimuli externes, et les matériaux à changement de phase, offrent de nouvelles possibilités pour des dispositifs adaptatifs et reconfigurables. Ces nouveaux matériaux ne seront pas seulement utilisés pour leurs propriétés intrinsèques, mais aussi pour leur potentiel de structuration sous forme de métamatériaux ou métasurfaces, multipliant ainsi les possibilités d'applications et d'innovations technologiques.

Enfin, la réalisation de ces objets micro- et nano-structurés requiert des ressources et un large spectre d'expertises technologiques. La communauté tire déjà un grand bénéfice du réseau RENATECH+ piloté par le CNRS, lequel fournit une infrastructure propre et compétitive à l'échelle européenne, pour la recherche et le développement en micro et nano-fabrication. Ce réseau RENATECH+, dont l'efficacité est avérée, doit naturellement être soutenu. De façon alternative, la lumière structurée constitue un outil performant et rapide pour l'analyse et la transformation locale de la matière, à façon, et sans générer d'effets collatéraux. Les mises en forme spatiale et temporelle de l'impulsion laser, sa durée (attoseconde à microseconde), sa longueur d'onde (X à IR) ou encore les stratégies d'irradiation sont autant de paramètres qui permettront la modification locale d'une majorité de matériaux, en

surface ou en profondeur, avec une invasivité minimale et contrôlée pour l'intégration 3D.

2. Matériaux et mécanique des solides, des structures, biomécanique et acoustique

Du procédé aux propriétés mécaniques du produit

Les procédés de **mise en forme, d'assemblage et de finition** concernent toutes les familles de matériaux utilisés pour fabriquer ou assembler des pièces ou des structures. Ils permettent ainsi de façonner, sans être exhaustif, des métaux, des céramiques, des verres, des polymères, des matériaux de construction (béton, mortiers, plâtres...) ou des matériaux à base de fibres naturelles bio-sourcées comme le bois ou le papier, pour obtenir des structures 1D, 2D ou 3D. Ils se sont depuis longtemps élargis à la mise en forme de matériaux multi-constituants tels que les **matériaux composites** à renforts fibreux continus ou discontinus, structuraux ou thermo structuraux, matériaux qui sont devenus des solutions de choix pertinentes pour répondre à des problématiques d'allègement, notamment dans le domaine du transport.

La famille des procédés tend aujourd'hui encore à s'élargir. Des procédés innovants tels que les **procédés de fabrication additive** de métaux ou de polymères font ainsi l'objet d'intenses développements depuis plus d'une quinzaine d'années. Des procédés visant à associer en une seule pièce plusieurs fonctionnalités, par exemple, mécaniques et électroniques dans le cas des procédés de la **plastronique** (plasturgie + électronique) sont également en plein essor, ou encore des traitements thermiques permettant de modifier à la fois la microstructure en volume des matériaux et leur aspect de surface. Les **procédés de séparation, de tri, de recyclage, de réparation** ou de réutilisation/réemploi sont également en plein développement. Les matériaux bio-sourcés, qui apparaissent comme plus vertueux que les matériaux classiques tels que certains polymères « pétro-sourcés » utilisés pour des produits d'emballage ou de construction (notamment pour l'isolation thermique des bâtiments) font par exemple apparaître de nouvelles voies de mise en forme. On assiste ainsi aujourd'hui à une évolution rapide des procédés de mise en forme. **Accompagner cette mutation paraît crucial pour rendre les procédés plus vertueux et plus performants.**

Optimiser les procédés de mise en forme vise à assurer la qualité des pièces dont les propriétés dimensionnelles et les performances physiques et mécaniques répondent à un cahier des charges donné. La maîtrise des procédés permet d'obtenir des pièces allégées comportant une microstructure contrôlée avec peu de défauts, et des propriétés mécaniques contrôlées. Cependant, cette vision de l'optimisation des procédés de mise en forme est sans doute trop restrictive. Un enjeu capital est d'intégrer dans les questions qui entourent les problématiques

d'optimisation des procédés celles liées à un **usage plus « parcimonieux » des matériaux**, qui, pour certains, sont rares ou dont l'approvisionnement est sous tension, et des **ressources telles que l'eau**, et aussi à **l'utilisation d'une énergie décarbonée**.

Pour optimiser les procédés de mise en forme, beaucoup d'efforts sont actuellement entrepris à l'échelle industrielle pour équiper de technologies de contrôle les lignes de production (capteurs en ligne, contrôle non destructif...) afin d'acquérir des données dont l'analyse en temps réel permet de corriger d'éventuelles dérives. Cette approche prometteuse nécessite cependant de développer et de déployer des **technologies de contrôle non destructif et des méthodes d'analyse des données couplant des outils de type IA avec des modèles numériques** donnant une représentation fidèle des phénomènes se déroulant lors des différentes phases des procédés. Encore faut-il comprendre finement ces phénomènes et les avoir caractérisés afin d'élaborer des modèles théoriques et numériques en donnant une représentation suffisamment pertinente. L'optimisation des procédés passe donc par la compréhension, l'identification et la caractérisation aux **échelles d'intérêt des phénomènes couplés** et complexes se produisant à chaque étape des procédés. C'est d'ailleurs ce qui est réalisé depuis plus de cinquante ans dans le domaine de la mise en forme des alliages métalliques « classiques » (aciers, alliages d'aluminium, de titane, de nickel...) pour lesquelles les **évolutions microstructurales associées à chaque étape du processus industriel** de mise en forme (déformation à différentes températures, recuits...) restent le sujet de nombreuses études, notamment dès qu'une modification, même minime, est apportée à la composition du matériau ou à la ligne de production. Ceci est en partie dû au fait que la plupart des évolutions microstructurales observées et caractérisées ne sont pas encore totalement comprises, ni modélisées de façon prédictive. Ce **travail fondamental sur des matériaux de grande diffusion** doit donc être poursuivi en vue de l'amélioration des propriétés visées et de la réduction du coût énergétique des procédés de mise en œuvre. Le **contrôle de l'anisotropie** induite lors de la mise en forme, liée notamment au développement de textures de recristallisation ou de transformation de phases reste un défi pour tous les alliages métalliques quels qu'ils soient, classiques ou modernes. On peut citer la croissance anormale de grains « Goss » dans les aciers électriques, produits de très grande diffusion, pour laquelle les théories existantes ne rencontrent pas encore un large consensus. Ce contrôle de l'anisotropie est par ailleurs un objectif à plus long terme pour les nouveaux alliages en développement, tels que les HEA (**High Entropy Alloys**), dont les mécanismes élémentaires restent à explorer de façon systématique. Les phénomènes de **recristallisation** touchent tant certains matériaux polymères qu'à base cimentaire et gouvernent les propriétés mécaniques résultantes. Contrôler l'anisotropie est également un problème de fond du développement des procédés de mise en forme des matériaux composites ou bio-sourcés.

Les étapes des procédés de mise en forme étant identifiées, il est nécessaire de développer et de réaliser des **essais de**

caractérisation ou souvent la mécanique est couplée avec des sollicitations thermiques, environnementales, etc., dans des conditions contrôlées ou représentatives des conditions (parfois extrêmes) des procédés. Ces essais peuvent être effectués dans des phases d'études en amont sur des matériaux ou des prototypes modèles afin de constituer des bases de données solides sur les procédés et les couplages qui s'y opèrent, en utilisant pour cela des modèles réduits à base physique des étapes des procédés.

Les essais de caractérisation thermo-mécaniques sont systématiquement associés à des **techniques couplées de mesure de structures et de champs** de déplacement, température, etc. Pour cela des techniques d'imagerie avancées (microscopie, microtomographie, infra-rouge, diffraction des rayons X...) pour observer finement le détail des évolutions microstructurales des matériaux aux différentes échelles d'intérêt ont permis des avancées spectaculaires. En ce sens, il apparaît que ces efforts doivent être poursuivis en **collaborant notamment avec les grands instruments de la physique (par exemple les synchrotrons ESRF ou Soleil) par le biais de plateformes communes** et en essayant de mettre en œuvre des expériences dont les conditions se rapprochent encore plus de celles rencontrées par les matériaux lors de la mise en forme. Une connaissance fine peut aussi découler de l'emploi de méthodes de caractérisation dites de champ proche (sonde atomique...) de manipulations réalisées grâce à des micro-systèmes (micro-manipulateurs, micro-robots...).

Toutes ces méthodes posent cependant la question du traitement des données massives qu'elles génèrent et donc de la nécessité de **développer des techniques d'analyse des données**. Ces données pourront être utilisées pour développer des modèles mécaniques par le biais de **techniques de changement d'échelle continues ou discrètes, de modèles enrichis afin de prévoir les évolutions des microstructures des matériaux au cours des étapes des procédés**.

Soulignons ici les **défis de modélisation théorique et numérique** immenses que soulève l'étude des procédés de mise en forme. C'est particulièrement le cas de la description de phénomènes, par essence non-linéaires et multi-échelles, tels que les changements de phase dans des conditions thermiques hors équilibre (fusion, solidification, recristallisation éventuelle des polymères thermoplastiques ou des métaux dans les procédés de fabrication additive) ou de propagation d'interfaces (propagation d'un front d'imprégnation dans un renfort fibreux pour composites, etc.). Nul doute que les progrès des outils théoriques et numériques permettront d'analyser en détail ces phénomènes, en utilisant dans certains cas des bases de données de microstructures représentatives générées massivement numériquement, afin de comprendre l'origine de la variabilité dans les procédés.

Matériaux architecturés et métamatériaux

Les matériaux architecturés et les métamatériaux recèlent de nombreux points communs : contrôle de la forme, de l'arrangement de la matière dans l'espace (et dans le temps)

pour répondre à des **cahiers des charges de plus en plus complexes**, pour obtenir des propriétés nouvelles (dans le sens n'existant pas naturellement) ou pour élaborer des réponses complexes à des sollicitations.

L'une des principales difficultés conceptuelles concerne le statut de tels matériaux : il faut gérer la difficile distinction entre matériau et structure. Dans bien des cas, il n'y a pas de véritable séparation d'échelle si bien que la notion de volume élémentaire représentatif est difficile à appréhender. La question n'est pas tranchée non plus entre descriptions discrète ou continue de ces matériaux, spécialement du point de vue de la modélisation numérique. La nécessité de milieux continus enrichis ou généralisés pour les décrire aux échelles supérieures est posée.

Dans un grand nombre de situations, le matériau est la structure. Il peut également être la fonction : actionneur, capteur. Il est alors caractérisé par une réponse, un changement de forme ou un comportement complexe, plus que par une simple propriété. Au-delà de la propriété nouvelle, il va s'agir de construire de nouveaux comportements en introduisant des « mécanismes » basés sur des instabilités, des transformations de phase, des couplages multiphysiques, des résonances, des modes locaux. Dans le mouvement d'ampleur concernant les nouveaux critères liés aux matériaux (criticité des ressources, criticité environnementale de l'usage ou du recyclage, voire géopolitique), le (méta)matériau architecturé offre une perspective intéressante : l'architecture jouant un rôle central, le matériau constitutif peut-il devenir moins central, si ce n'est secondaire, offrant en tout cas une plus grande latitude de choix ?

Un autre changement de paradigme s'opère aujourd'hui : on ne va plus chercher l'optimum de performance à tout prix ; si le mieux est déjà l'ennemi du bien, le bien va-t-il devenir l'ennemi de l'acceptable ? Là encore, le (méta)matériau architecturé est, d'une certaine manière, un précurseur ; la complexité de l'architecture rend bien souvent difficile si ce n'est impossible les opérations de post-traitement, et finition. Il faut apprendre à vivre avec les défauts hérités notamment du procédé et ceci doit être intégré dès la conception. Il y a sûrement, plus qu'ailleurs, un **lien fort entre matériaux architecturés et procédés**. En particulier, l'émergence de ces matériaux est indissociable des ruptures technologiques importantes sur les procédés : fabrication d'architectures fibreuses innovantes (tresses, tricots, tissus) et procédés de mise en forme associés pour matériaux composites (thermo)structuraux à très hautes propriétés mécaniques spécifiques, nouveaux procédés matériaux cellulaires (moussages, cryo-déssiccation...).

L'une des plus importantes ruptures technologiques de ces dernières années, à savoir la **fabrication additive** (FA). La FA a été (est) une rupture nécessaire qui rend atteignables certaines nouvelles architectures complexes, qui plus est avec des matériaux de natures différentes. Il n'en demeure pas moins que ce lien fort avec le procédé, cette existence de défauts hérités du procédé, cette prédominance de l'architecture sur le matériau constitutif rendent encore problématique le développement de ces matériaux et de ces technologies par le monde industriel. En raison

de contraintes de certification et de normalisation, il y a trop souvent un fossé entre matériau de laboratoire et application industrielle. Pour accompagner ces tendances, pour répondre à ces questions, il semble opportun de privilégier quelques actions structurantes au niveau national.

En premier lieu, il est nécessaire de développer la **mutualisation de moyens d'élaboration et de caractérisation**. Il y a en France un manque criant d'une (de) plateforme(s) de fabrication d'**architectures modèles**, qui transcendent les applications (structurales, acoustiques...). Aujourd'hui, il existe des structures, notamment régionales (AFH, Initiative 3D, AddimAlliance...), mais elles sont plutôt centrées sur une famille de matériaux (métaux), une orientation principale autour de la maîtrise du procédé et reposent sur des modèles économiques parfois peu réalistes. L'objectif serait de disposer à terme d'un parc (réseau, plateforme) suffisamment spécialisé pour être dédié à la fabrication additive d'architectures complexes, mais également suffisamment large en termes de classes de matériaux (métaux, polymères, céramiques) et d'échelles (compatibles avec la mécanique des structures, avec l'acoustique). Ces plateformes d'élaboration devront être adossées à des moyens de caractérisation des propriétés ou des comportements : essais multiaxiaux, quantification de l'absorption d'énergie, de la résistance aux impacts pour les archimatériaux de structure, caractérisation des champs vibratoires pour les métamatériaux acoustiques avec en particulier la problématique de la caractérisation interne, au sein de l'architecture non visible. Des moyens d'imagerie de haut niveau seront spécialement dédiés aux architectures 3D (tomographie aux rayons X, corrélation d'images 3D...). Le réseau ainsi constitué devra être compatible avec la possibilité de gérer, mettre à disposition et traiter les données issues de ces différentes caractérisations. Elles constitueront l'étape intermédiaire entre le matériau de laboratoire et l'application déployée industriellement. Elles aideront à lever les doutes sur l'acceptation, la certification à la fois des procédés, des architectures et des propriétés résultantes.

En parallèle à ces plateformes mutualisées, il est nécessaire de développer des actions structurantes entre les communautés « Archi » et « Méta » (la création récente du GDR ArchiMéta va dans ce sens). Même si les champs d'application diffèrent, ces communautés partagent de nombreux outils de conception, de modélisation, de caractérisation structurale pour aborder les enjeux de demain dans le domaine des transports, de la santé ou du cadre de vie (allègement, protection aux chocs, nuisances sonores, visuelles, vibratoires, furtivité).

3. Matériaux et milieux fluides et réactifs pour les transports, les transferts et procédés de transformation

Le contexte énergétique nécessite une meilleure gestion et récupération de l'énergie, des matériaux, le remplacement

des matières premières critiques, la suggestion de matériaux verts et non écotoxiques, et enfin la découverte de nouvelles façons de récupérer l'énergie perdue (chaleur fatale) ou l'énergie non-exploitée jusqu'à présent et de la rendre utile.

Nouveaux matériaux sous hauts flux

De nombreux systèmes et procédés de conversion, transport, stockage, récupération des énergies, en particulier radiantes et solaires, intègrent ou subissent des contraintes de hauts flux, hautes températures (800 à 3000K), ou forts gradients thermiques. D'autres applications mettant en œuvre des plasmas chauds sont concernées par les mêmes problématiques (rentrée atmosphérique, fusion, ...). Des enjeux importants et des verrous sont identifiés pour le design, la fabrication, la durabilité et le vieillissement de ces matériaux.

Un premier axe de recherche concerne la caractérisation de ces matériaux, avec un double enjeu : la mise en œuvre d'une métrologie fiable et robuste à ces niveaux de flux et température pour obtenir ou identifier les propriétés thermophysiques et radiatives des matériaux, y compris in operando en environnement complexe ; et la production de bases de données ouvertes et vérifiées de ces propriétés.

Un deuxième axe concerne la modélisation et la simulation fine des transferts au sein de ces matériaux, avec une forte composante de transfert radiatif et de transferts couplés multi-physiques. Ces outils doivent permettre de créer et caractériser, dans un troisième axe de recherche, des matériaux innovants, au vieillissement contrôlé, supportant ces contraintes extrêmes, compatibles et intégrables dans les procédés et systèmes existants.

Nanomatériaux et nano/micro dispositifs dans le domaine de l'énergie

Une grande partie des technologies énergétiques de rupture incluront des nanomatériaux et des nano/microdispositifs. Les objectifs principaux, à long terme, sont la réduction de la taille des appareils (capteurs, informatique, technologies IoT), l'augmentation de leur efficacité et de leur durée de vie. Les nanomatériaux et la polyvalence des systèmes nanométriques peuvent permettre d'accéder à des propriétés (optiques, électroniques, thermiques, catalytiques, magnétiques, etc.) et à des fonctionnalités nouvelles et révolutionnaires (conversion, directivité...) souvent en maîtrisant la dimensionnalité et les formes des matériaux, la texture des systèmes, et la combinaison des matériaux ou des vecteurs énergétiques.

La nanostructuration peut conférer des propriétés physiques inédites aux matériaux, mais aussi aux surfaces et interfaces, du fait de la valorisation et/ou de l'émergence à l'échelle nanométrique de phénomènes spécifiques modifiant le transport des vecteurs énergétiques (phénomènes collectifs et coopératifs, tunneling, cohérence, filtrage, fluctuations, localisation, etc.) avec finalité de développer des matériaux et des dispositifs innovants pour les applications énergétiques.

Le transport de chaleur ou d'électricité à l'échelle nanométrique nécessite une compréhension approfondie du comportement et des interactions des porteurs énergétiques impliqués dans ces phénomènes ; une compréhension qui pourrait ouvrir la voie à la conception de nouveaux matériaux et dispositifs qui répondent au défi vers la plus grande efficacité énergétique. Cependant, ces connaissances sont encore fragmentaires au niveau expérimental et théorique. La récupération de l'énergie gaspillée, la gestion de la chaleur et la conversion en énergie électrique utile sont des problèmes qui dépendent de l'interaction des différents porteurs avec les caractéristiques de la nanostructure et de l'interaction entre eux. Par exemple, dans le métal, le couplage électron/phonon détermine le phénomène de transport.

La conversion d'énergie à l'aide de nanomatériaux est un moyen d'améliorer et de proposer de **nouveaux paradigmes de haute efficacité de conversion**. Les principaux mécanismes de conversion d'énergie grâce aux nanomatériaux sont « thermique-électrique », « optique-électrique », « chimique-électrique » et « mécanique-électrique » en ajoutant les conversions hybrides ou multiples. De fortes interactions entre la théorie, l'élaboration, les caractérisations, ainsi que la conception et la fabrication des dispositifs fonctionnels, sont nécessaires pour atteindre ces objectifs et finalement augmenter le TRL des différents projets. En tant que défi général, l'évaluation de l'efficacité de la conversion énergétique nécessite des normes de mesure appropriées, particulièrement difficiles à l'échelle nanométrique.

La gestion thermique à l'échelle nanométrique est l'art de gérer l'excès de génération de chaleur, que cette chaleur soit le résultat de frottements, d'effet Joule ou plus précisément d'auto-échauffement dans les circuits intégrés (CI). Un traitement plus futuriste de la chaleur en tant que ressource informatique, classique ou quantique, a été proposé récemment, ce qui ouvrira la voie à des stratégies et des applications de gestion thermique plus efficaces à différentes échelles de longueur.

Un nouveau domaine d'activité de recherche appelé « Thermotronique » est apparu et traite de l'étude et de l'exploration de la rectification thermique, de l'amplification, de la commutation, de la modulation, etc., dans les dispositifs thermiques, en analogie avec leurs homologues électroniques. Les défis scientifiques et technologiques concernant la gestion thermique via les nanomatériaux sont le caractère complexe des CI, les conditions strictes de dissipation thermique au sein des CI, la conduction non-Fourier, le rôle de la conductance limite thermique/résistance d'interface thermique, la métrologie thermique des nanomatériaux et des circuits intégrés.

D'autres défis concernent les applications à fort potentiel du refroidissement radiatif, et même de nouveaux paradigmes informatiques tels que l'informatique neuromorphique et/ou en mémoire.

Remerciements

Membres du comité Section 08

Claude Amra (président)
Philippe Boucaud
Raphaël Clerc
Mauro Ettorre

Eric Labouré
Bernard Legrand (co-président)
Isabelle Robert-Philip

Membres du comité Section 09

Brigitte Bacroix
Rémy Dendievel
Bertrand Dubus
Pierre Dumont
Jérôme Fortin
Samuel Forest (président)

Anthony Gravouil
François Hild
Guillaume Ovarlez
Judicaël Picaut
David Rodney
David Ryckelynck

Membres du comité Section 10

Thierry Belmonte
Mickaël Bourgoïn
Pascal Boulet
Cathy Castelain (présidente)
Paola Cinnella
Pascale Domingo

Eric Favre
Fabien Halter
Maxime Mikikian
Laurence Ramos
Konstantinos Termentzidis

Membres du comité Santé

Jean-Francois Aubry
Aurélien Bancaud
Abdul Barakat
David Brasse
Jean-Luc Coll
Florence Gazeau
Emmanuel Guedon
Anne-Marie Haghiri

Viktor Jirsa
Pierre-Yves Joubert
Vincent Lebon (président)
Cécile Legallais
Michel De Mathelin
Serge Simoens
Isabelle Texier-Nogues

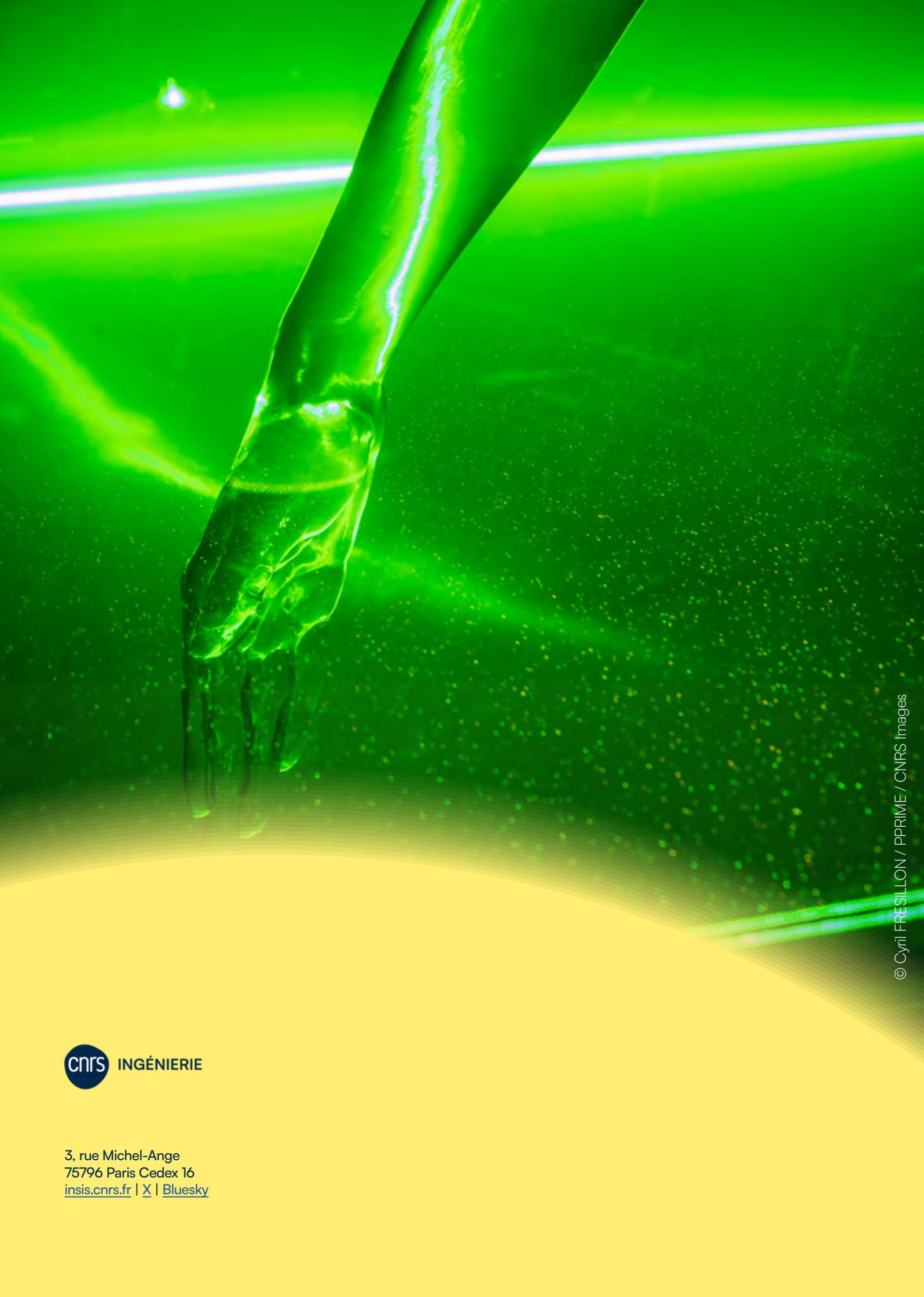
Personnes ayant contribué à la rédaction du document de synthèse sans être membres d'un comité

Gilles Armand
Matteo Barsuglia (consulté en tant que responsable scientifique du projet VIRGO pour la France)
Cyril Douthe
Julien Fade
Sylvain Gigan
Pascale Gillon

Arnaud Landragin
François Nicot
Stéphane Popinet
Jean Sulem
Matthieu Vandamme
Et l'équipe scientifique de CNRS Ingénierie

Personnes consultées que les comités voudraient remercier

Thierry Baron
Skandar Basrou
Albert Beardo
Fetah Benabid
Nicolas Bertier (ONERA)
Jacques Berton
Laurent Billet (EDF R&D)
Pierre Blondy
Alain Bosseboeuf
Johann Bouclé
Xavier Bouju
Frédéric Bœuf
Nicolas Bonod (consulté en tant que membre du bureau de l'atelier Électronique et Photonique Avancées de la prospective CNRS Physique)
Sophie Bouchoule (consultée en tant que co-pilote de l'atelier Électronique et Photonique Avancées de la prospective CNRS Physique)
Sophie Brasselet
Yves Bréchet (Saint-Gobain)
Cyril Buttay
Remi Carminati
Pierre-Olivier Chapuis
Francisco Chinesta
Nelson Christensen
Romain Contrares
Jean-Christophe Crébier
Christophe Couteau
Aloyse Degiron
Philippe Delaporte
Emmanuelle Deleporte
Noël Dimarcq
Emmanuel Dubois
Thomas Ernst (consulté en tant que co-porteur du PEPR Électronique)
Frédéric Feyel (SafranTech VP Digital Sciences & Technologies)
Filière France-Cleantech industrie (Gilles David, Aldo Serafino, Ivan Reali, EnerTime ; Philippe Loiseau, Packgy)
Nelson Fonsesa
Philippe Girard (au titre du club des partenaires du GDR TAMARYS)
Hugues Granier
Bertrand Grèzes-Besset
Françoise Hippert
Lionel Hirsch
Guillaume Jourdan
Ariel Levenson
Hervé Legay
Lingai Luo
Johann Meulemans (Saint-Gobain Recherche)
Hervé Morel
Arnaud Mussot
François Nicol (Veolia)
Ian O'Connor
Jean-Michel Portal
Xavier Py
Philippe Quinio
Damien Querlioz
Quentin Rafhay
Frédéric Richardeau
Philippe Roche
Nicolas Rouger
Benoît Rousseau (au titre du GDR TAMARYS)
Philippe Roy
Isabelle Sagnes (consultée en tant que co-porteuse du PEPR Electronique)
Paul-Antoine Santoni (SPE)
Serge Simoëns
Anne Tanguy (ONERA)
Sébastien Tanzilli (consulté en tant que co-porteur du PEPR Quantique)
Frédéric Tepe (consulté en tant que co-pilote de l'atelier Électronique et Photonique Avancées de la prospective CNRS Physique)
Didier Théron
Dominique Thomas
Laurent Vivien
Serge Verdeyme (consulté en tant que co-porteur du PEPR Réseaux du futur)



© Cyril FRESILLON / PPRIME / CNRS Images

CNRS INGÉNIERIE

3, rue Michel-Ange
75796 Paris Cedex 16
insis.cnrs.fr | [X](#) | [Bluesky](#)