



**HAL**  
open science

## Rapport de Prospective Conseil Scientifique CNRS Ingénierie (Ex: INSIS)

Serge Simoëns, Gillon Pascale, Boucher Yann, Audoly Christian, Deltimple Nathalie, Doreau Hervé, Dragomirescu Daniela, D. Fabrègue, Flandre Denis, Marie Frénéa-Robin, et al.

► **To cite this version:**

Serge Simoëns, Gillon Pascale, Boucher Yann, Audoly Christian, Deltimple Nathalie, et al.. Rapport de Prospective Conseil Scientifique CNRS Ingénierie (Ex: INSIS). CNRS Ingénierie. 2023. hal-04357891

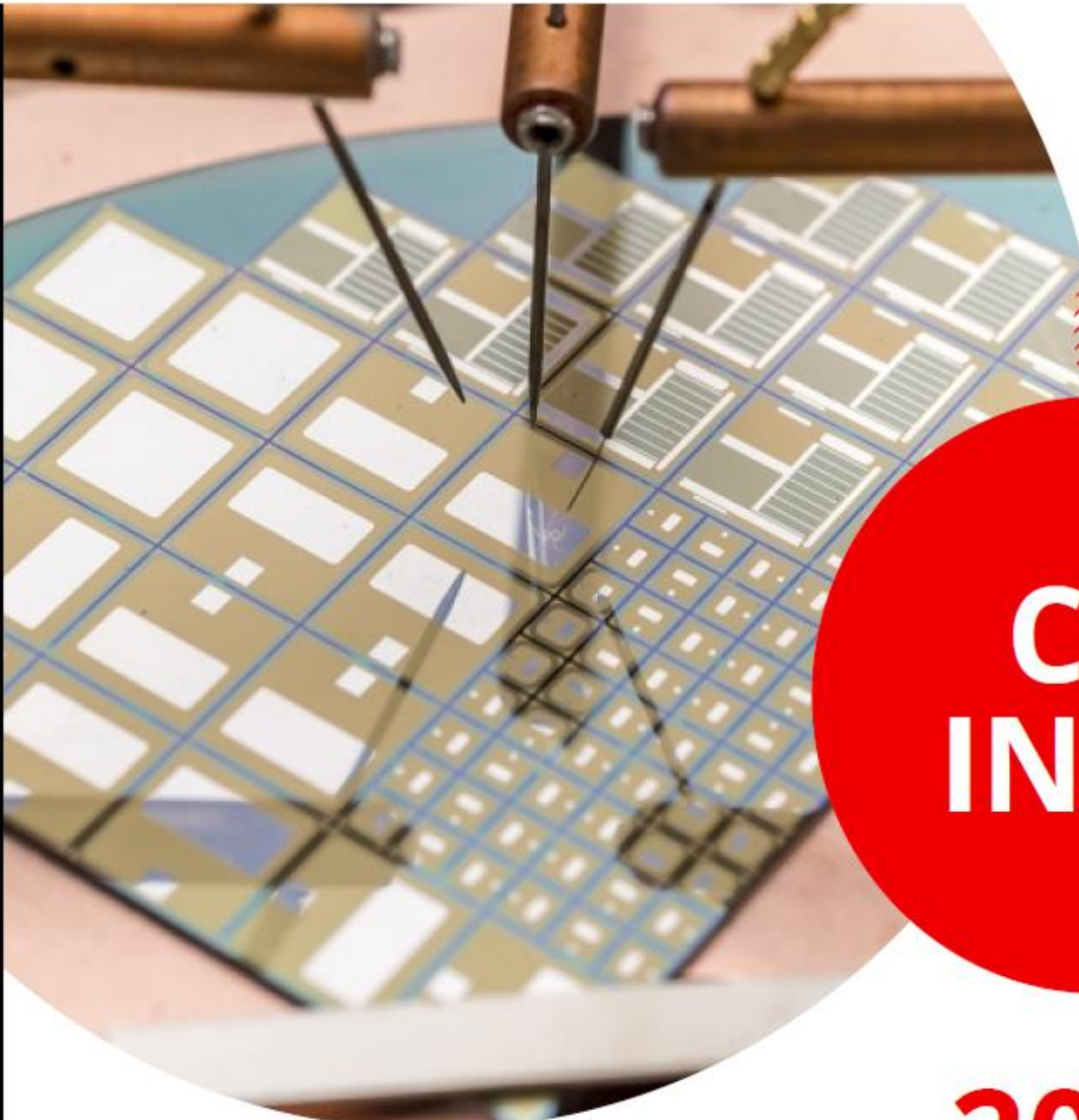
**HAL Id: hal-04357891**

**<https://hal.science/hal-04357891>**

Submitted on 21 Dec 2023

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

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



**CSI  
INSIS**

**2023**

# **RAPPORT DE PROSPECTIVE**

**CONSEIL SCIENTIFIQUE D'INSTITUT**

Comité national de la recherche  
scientifique



## CSI INSIS institut INSIS

Serge SIMOËNS (président du conseil) ; Etienne PETIT (secrétaire scientifique) ; Yann BOUCHER ; M. Christian AUDOLY (Retraité 06/2023) ; Hervé DOREAU ; Nathalie DELTIPLE ; Damien FABREGUE ; Daniela DRAGOMIRESCU ; Pascale GILLON ; Denis FLANDRE ; Caroline MAURIAT ; Marie FRENEA-ROBIN (Bureau) ; Abderrahim MICHRAFY ; Carole MOLINA-JOUVE (bureau) ; Catherine LAVANDIER ; Cécile LEGALLAIS (bureau) ; Anne-Lise SENTENAC ; Véronique MICHAUD ; Florence OSSART ; Raphaël SOMMET ; Jozef POORTMANS ; Marie-Ange TESTE ; Eric LEROY (membre jusqu'au 2021/Invité permanent).

**Anciens membres du CSI (année de départ) :** Maria-Pilar Bernal-Artojona (2019) ; Claude PELLET (2020, Bureau) ; Rosaria FERRIGNO (2020) ; Matthieu GUIBERT (2021) ; Elisabeth Guazzelli (2022)

(Rapport adopté 18 votes pour, 4 non votants sur 22 membres).

---

## Table des matières

---

Avant-Propos .....	6
Introduction .....	6
<b>I. Cœur de métier de l'INSIS.....</b>	<b>8</b>
A. Section 8 (S08).....	8
1. Introduction .....	8
2. Evolutions-Orientations .....	8
3. Thèmes émergents-Signaux faibles .....	14
4. Outils (expérimental/numérique).....	16
B. Section 9 (S09).....	20
1. Introduction .....	20
2. Orientations et verrous .....	20
a. Ingénierie des structures. ....	20
b. Ingénierie des matériaux et comportement mécanique.....	21
c. Mécanique des surfaces et interfaces. Surfaces et interfaces pour la mécanique...22	
d. Mécanique des milieux continus généralisée.....	23
e. Biomécanique et mécanique pour le vivant. Bioingénierie. ....	24
f. Mécanique vibratoire et acoustique. ....	25
g. Aspects mécaniques de la robotique et interactions mécaniques homme/machine. .....	25
3. Thèmes émergents-Signaux faibles .....	26
a. Ingénierie des structures. ....	26
b. Ingénierie des matériaux et comportement mécanique.....	26
c. Mécanique des surfaces et interfaces. Surfaces et interfaces pour la mécanique...28	
d. Mécanique des milieux continus généralisée.....	28
e. Biomécanique et mécanique pour le vivant. Bioingénierie. ....	29
f. Mécanique vibratoire et acoustique. ....	29
4. Influence de l'IA et de la FA sur les thématiques de recherche de la section 9 .....	30
a. Ingénierie des structures. ....	30
b. Ingénierie des matériaux et comportement mécanique.....	30
c. Mécanique des milieux continus généralisée. ....	30
d. Biomécanique et mécanique pour le vivant. Bioingénierie. ....	31
e. Mécanique vibratoire et acoustique. ....	31
B. Section 10 (S10).....	32
1. Introduction .....	32
2. Evolutions-Orientations .....	32
a. Mécanique des fluides.....	32
b. Thermique/énergétique .....	34
c. Combustion .....	35
d. Génie des procédés .....	36
e. Plasmas et lasers .....	38

3. Thèmes émergents-Signaux faibles .....	39
a. Mécanique des Fluides.....	39
b. Thermique/Energétique :.....	39
c. Combustion : .....	40
d. Génie des Procédés.....	41
e. Plasmas et lasers .....	41
4. Outils (expérimental/numérique).....	42
a. Mécanique des Fluides.....	42
b. Thermique-Energétique :.....	43
c. Combustion .....	43
d. Génie des Procédés.....	44
e. Plasmas et lasers .....	44
D. Santé.....	46
1. Evolutions-Orientations .....	46
2. Thèmes émergents-Signaux faibles .....	50
3. Outils (expérimental/numérique).....	50
II. Thématiques transverses .....	52
A. Développement durable :.....	52
1. Prise de conscience des chercheurs ? Impact sur l'activité ? Quelles contributions de l'INSIS ? .....	52
2. Recherches de l'INSIS contribuant au développement durable .....	53
B. Ethique : quels sont les questionnements issus des recherches menées à l'INSIS ?	54
C. IA : quelle place ? .....	56
D. Fabrication additive.....	57
E. Plateformes .....	60
F. Interdisciplinarité : comment et où la mettre en œuvre ?.....	63
III. Bilan et Rôle du CSI .....	65
A. Travaux du mandat 2019-2023, bilan du CSI.....	65
IV. Propositions sur l'évolution du fonctionnement du CSI.....	67
V. Remerciements.....	68
VI. Annexes.....	69
A. Interdisciplinarité : Réflexions Générales sur les CIDs et l'interdisciplinarité .....	69
1. Place de l'interdisciplinarité au sein des instituts, chercheurs et évaluation .....	69
2. Les outils.....	69
3. Structuration.....	70
4. Conclusions .....	70
B. Questionnaire ayant servi à amorcer la discussion avec les invités pour l'élaboration de ce rapport (exemple ici adapté pour la S8):.....	71
C. Constitution des GT du CSI pour ce rapport : .....	72
D. Liste des invités du CSI au cours du mandat 2019-2023.....	72



---

# Avant-Propos

---

Constitué à part égale de membres élus et de membres nommés (tous représentatifs de la communauté scientifique), le Conseil scientifique d'Institut (CSI) a pour mission principale de « conseiller et d'assister, par ses avis et recommandations, le directeur de l'institut de manière prospective sur la pertinence et l'opportunité des projets et activités de l'institut. » En dehors des tâches statutaires, les contours de ce travail ne sont pas strictement dessinés. Cette souplesse constitue un avantage, au même titre que la diversité de sa composition, qui garantit un vaste éventail de visions, d'expériences et de connaissances de contexte. Dans le même temps, pour les membres du CSI dont les univers de travail sont éloignés de ceux du CNRS, la compréhension des situations internes à l'organisme demande parfois des efforts méritoires, par exemple lorsqu'il convient de jongler entre les aspects purement scientifiques d'une question et ses aspects plus politiques ou organisationnels (ressources humaines, éthique, RPS, etc.) Le temps réel qu'un tel Conseil est en mesure de consacrer à ses réunions ou à ses échanges paraît parfois dérisoire face à l'ampleur de la tâche. Par ailleurs, cette mandature a été marquée par la crise sanitaire qui a bousculé son fonctionnement. Nous espérons néanmoins que le présent rapport jouera son rôle de conseil à la décision (pour la Direction de l'Institut), tout en apportant un élément de vision globale au service de tous les collègues de notre communauté.

---

## Introduction

---

Comme tous les instituts du CNRS, l'INSIS (CNRS-Ingénierie) doit désormais prendre en compte nombre de contraintes sociétales qui découlent naturellement de l'impact, sur notre environnement (et plus globalement sur notre planète), des activités d'origine anthropique. Par ailleurs, cette indispensable réflexion s'accompagne d'une non moins nécessaire prise de conscience des fortes inégalités qui subsistent, voire se creusent, au sein de nos sociétés – par exemple les inégalités de genre. Le CNRS a pris ces données en compte, comme en atteste sa feuille de route ([COP \(Contrat d'Objectifs et de Performances 2019-2023\)](#)) pour les prochaines années. À cet égard, nos recherches doivent s'adapter aux préconisations avancées par l'institution. Dans le même temps, le monde technologique est soumis à des accélérations, voire à des révolutions qu'il convient d'intégrer à tous les stades de nos réflexions, ne serait-ce que pour « rester dans la course » aux découvertes et aux innovations. Or, ces deux injonctions sont souvent contradictoires : on citera par exemple l'extension proliférante du numérique sous toutes ses formes (Intelligence Artificielle, etc.) dont l'aspect énergivore s'avère incompatible avec les réductions d'énergie nécessaires pour tendre vers un niveau de sobriété et de décarbonation soutenable.

L'INSIS est un institut particulièrement interdisciplinaire qui se doit de rester au plus proche de la recherche fondamentale, afin de préserver l'avenir à long terme de la recherche académique nationale. Il apparaît difficile de concilier les objectifs économiques à court terme du pays, mais aussi les investissements sur projets applicatifs à non moins court terme, avec les aléas inhérents à la recherche, qui exige du temps long sans garantie formelle de découvertes immédiatement valorisables.

Un autre aspect notable de ces dernières années est l'ouverture de la science au monde « open », tant au travers des publications que des logiciels et autres bibliothèques d'appui aux outils partagés d'analyse, de traitement ou de pilotage des données. Si le CNRS et l'Institut ont bien intégré ces contraintes, il reste à en optimiser les bénéfices vis-à-vis des chercheurs individuels (par exemple par la mise à disposition de plateformes logicielles).

Les grands vecteurs de la société (énergie, santé, transport, etc.) sont plus que jamais présents au sein des recherches portées par l'INSIS. Ils bénéficient d'une forte croissance des avancées technologiques (comme du renouvellement associé des concepts et des possibilités) pour développer de nouveaux systèmes.

Un défi majeur de l'INSIS pour le futur proche est de maintenir son appui concret à la recherche fondamentale, par-delà les effets de mode ou le court-termisme des Appels À Projets (AAP), seule condition pour espérer obtenir à nouveau des succès forts autour des nano- et microsystèmes, dans les domaines de l'électronique, de la santé, de la thermique, etc. Il conviendrait aussi de tirer le meilleur parti des dernières évolutions technologiques, conceptuelles et sociétales : - la généralisation du numérique et de l'automatisation, - des développements quantiques (électronique, fluide, etc.), - l'inspiration de la recherche tirée du biomimétisme, - les préoccupations relatives au Développement Durable (DD).

Les lignes fortes à maîtriser opèrent souvent à l'interface entre deux niveaux d'échelle, mais aussi dans le couplage multichamps. La nécessaire modélisation de cet aspect multiéchelle ira de pair avec la compréhension fine à chaque échelle prise séparément. Enfin, l'avènement de nouveaux matériaux, de nouveaux fluides, la maîtrise accrue de conditions thermodynamiques extrêmes, ouvrent à minima le champ d'inspection systématique de tous les verrous classiques en conditions usuelles.

Les nouveaux outils (tant expérimentaux que numériques) et les axes thématiques qui font le cœur de métier des équipes de l'INSIS imposent un double défi :

- Ces études exigeantes nécessitent des moyens à la hauteur des défis théoriques et technologiques : il importe de pouvoir consacrer le maximum de temps de recherche ... à la recherche, et non à la « recherche de moyens pour la recherche ».
- Des solutions de type plateformes ou réseaux doivent offrir aux chercheurs un accès égal aux ressources, en dehors de toute « compétition » concurrentielle, un mode de fonctionnement inadéquat pour la recherche.

Le présent rapport comprend deux parties :

La première partie consiste en un état des lieux, non exhaustif, des principales sections de l'Institut (S8, S9 et S10), ainsi que du domaine « de la santé et du vivant », activités qui transparaissent dans toutes les sections, et qui constituent aussi le cœur des thématiques de la S28 et de la CID54, toutes deux dépendantes de l'INSIS. Dans chaque cas, le CSI a souhaité jauger les orientations principales avant de mettre en lumière, toujours de façon non exhaustive, quelques sujets en émergence qui mériteraient d'être suivis et soutenus. Par ailleurs, le CSI s'est également intéressé aux outils (théoriques, numériques ou expérimentaux) développés ou utilisés au sein des sections. Au cours du texte, on trouvera un certain nombre de préconisations quant aux orientations qui pourraient être impulsées par la Direction de l'Institut ; mais aussi un certain nombre de remarques sur les manques ou les lacunes de l'existant.

La seconde partie du rapport est consacrée à six sujets, inhérents à la vie des chercheurs ou en résonance avec l'actualité, et que le CSI a jugé important à prendre en compte pour une gestion harmonieuse de l'Institut. Le choix des sujets s'est décidé par consensus, après discussion au sein du CSI. Il n'est pas limitatif : il est clair que beaucoup d'autres questions auraient pu être traitées.

Le rapport est complété par des annexes relatives soit à des travaux, soit à des avis émis par le CSI dans le courant de sa mandature, soit à des listes référencées en renvoi du texte principal. Par souci de concision, certaines annexes se contentent d'indiquer le lien électronique vers les ressources citées, par exemple des textes relatifs aux travaux du CSI.



---

# I. Cœur de métier de l'INSIS

---

## A. Section 8 (S08)

### 1. Introduction

La S8 souligne sa préoccupation face à la crise environnementale, la dimension frugale des technologies étant encore à promouvoir. Certains des procédés sont d'ores et déjà tournés vers l'ingénierie verte a minima en favorisant l'intégration de matières premières naturelles et biosourcées. L'effort dans ce domaine peut bien sûr être accentué pour l'ensemble des procédés matériaux ou systèmes (fabrication additive/FA, Hybride, etc.) intervenant dans la S8.

Les recherches de la section sont au cœur de grands enjeux sociétaux : les transports (électriques, aéronautiques, les véhicules autonomes, etc.), les technologies numériques (IoT, IoE), les données massives (*big data*), les télécommunications terrestres (5G-6G) et spatiales, la croissance vertigineuse du parc satellitaire, la défense, la sécurité numérique ainsi que la souveraineté en termes de composants optiques, RF et électroniques (« Chips Act »). Une autre partie est relative au génie électrique avec, entre autres les thématiques autour du transport électrique « longue distance », le stockage de l'énergie et les réseaux électriques intelligentes.

Les matériaux nouveaux ouvrent un nombre conséquent de pistes de recherche dans tous les domaines couverts par la S8 qui note un besoin de structuration et d'intégration des matériaux actifs, fonctionnels, souples et étirables. Les travaux de recherche autour de nanomatériaux énergétiques apportent des résultats intéressants et ouvrent de nouvelles voies de recherche pour la micro-pyrotechnie. Du point de vue des techniques, des défis de l'électronique sont liés à l'introduction de concepts comme l'utilisation de la structuration 3D, la prise en compte de l'hétérogénéité des objets et les technologies intégrées sur un même support à des tailles nanométriques. Le constat n'est pas différent en photonique et RF, où la structuration de la matière permet de créer une multitude de propriétés artificielles pour filtrer spatialement, spectralement et temporellement la lumière.

Les nouveaux matériaux poussent de plus à de nouvelles techniques pour faire face à la conception de nouveaux systèmes (l'industrie du futur, l'e-santé, les « *smart-cities* », le New Space etc.) induisant de nouvelles exigences énergétiques, de fiabilité, de sécurité, etc. On fait face ici 1) au paradigme de la prise en compte du Développement Durable (DD), 2) aux mutations économiques (exigences de sécurité accrues), de santé (digitalisation et électronique dans tous les concepts), ceci sur des supports de plus en plus petits avec des matériaux en questionnements.

Ce sont les exigences que nous allons également rencontrer en S7 : la gestion des capteurs/actionneurs intelligents/dédiés (CPS : Cyber-Physical Systems) qui peuvent être nombreux et probablement à terme devront être gérés par des systèmes « IA » pour, a minima, la gestion des intercommunications. La consommation énergétique des algorithmes d'IA actuels étant importante, c'est un sujet de recherche à développer à l'interface entre les sections 07 et 08. Le développement de circuits neuromorphiques dans la section 08 permettra la mise en place des algorithmes d'intelligence artificielle frugale.

### 2. Evolutions-Orientations

#### Énergie

Un des principaux défis de la section est de conjuguer frugalité et performance pour ces systèmes de plus en plus autonomes et communicants. Les recherches de la section sur les nouveaux systèmes conçus à base de nouveaux matériaux, de nouvelles structurations mais aussi de nouveaux couplages à micro-échelle (micro-batterie/micro-supercondensateur) essaie de répondre à ces nouveaux défis, l'un d'entre eux étant d'offrir une capacité de stockage *ad hoc*. Des solutions peuvent

être trouvées via des matériaux qui permettent le développement de vastes gammes de cellules pour le photovoltaïque (*perovskite-sillicium, variétés du silicium, etc.*), les batteries (Li/S, Metal-ion (Na-ion, Mg-ion, Ca-ion, AL-ion), etc.), les piles à combustibles, la détection de molécules particulières ( $SnO_2$ ,  $WO_3$ ,  $ZnO$ ,  $La_{1-x}yAgxSryCoO_3$ ), pour des systèmes en environnements extrêmes mais aussi pour des gains métrologiques considérables (avènement de la Transduction optomécanique (micro/nano-capteurs vibrants)). Chaque domaine présente ses verrous technologiques ; la recherche est organisée autour de réseaux (RS2E), GDR (OERA) ou fédérations (FedPV) et vient d'être renforcée par le PEPR TASE. Des domaines liés à la capacité de génération énergétique locale pour les micro-systèmes par exemple via des effets thermo-ioniques ou la photocatalyse mériteraient peut-être d'être mieux structurés. Enfin la partie de génération de matériaux pour l'énergie est structurée autour du GDR NAME, en particulier pour la recherche liée à la récupération, la conversion, la gestion et le stockage d'énergie (via les convertisseurs électro-chimiques *power to gas* par exemple).

Un des domaines phares de la section est tout ce qui a trait aux systèmes électriques d'un point de vue global (réseaux) pour le contrôle, l'homogénéisation, le transport et la distribution. La complexité de la mise en réseaux provient principalement de l'hétérogénéité croissante de la production. Il existe là deux thèmes de recherche majeurs : 1) la gestion des systèmes via la mise en place de logiciels ad hoc mais aussi 2) la disposition de cohortes de capteurs adaptés pour le contrôle. Les deux thématiques, qui se mènent en forte collaboration avec la Section 7, sont structurées autour de GDRs comme SOC<sup>2</sup> ou SEEDS. Comme nous l'avons déjà vu pour les micro/nano-systèmes, un domaine clef de cette gestion globale est le grappillage dans le cadre d'une réduction des consommations d'énergie pour le DD (développement durable) mais aussi du stockage pour optimiser la génération intermittente et éventuellement le transfert d'énergie vers des zones de génération d'autres formes d'énergie (Hydrogène, méthane, etc.). Cette recherche est structurée autour de la Fédération de recherche hydrogène (FRH2) mais aussi de différents GDRs comme HySPaC ou SOLAR fuel, et vient d'être dotée en particulier d'une partie des moyens alloués au PEPR H2.

Une recherche de fond est soutenue autour de nouveaux matériaux magnétiques qui permettent entre autres de répondre aux problématiques environnementales et stratégiques. Au-delà, une recherche de pointe est réalisée pour des matériaux aux effets thermo-physiques couplés (magnéto/thermique-calorifique, matériaux moléculaires magnéto-électriques (ME) multifonctionnels avec couplage ME, etc.). Ces disciplines nécessitent des collaborations avec l'INP et l'INC.

Un autre domaine en pleine effervescence est le transfert d'énergie sans fil et la récupération d'énergie sans fil. Les avancées scientifiques obtenues dans ce domaine par l'optimisation de systèmes « rectenna » permettent aujourd'hui de rendre autonomes des nœuds de capteurs/actionneurs communicants. Les travaux doivent se poursuivre dans ce domaine afin d'améliorer le rendement de récupération/transfert d'énergie sans fil et la distance de transmission possible. L'avènement de ce type de systèmes de transmission d'énergie sans fil longue distance peut apporter une source d'énergie importante dans des environnements difficiles, terrestres ou spatiaux (i.e. satellite vers satellite, ou satellite vers la terre).

Le domaine de l'électronique de puissance est par ailleurs au coeur d'importantes mutations sociétales, notamment celle du secteur automobile avec l'électrification massive des véhicules. Les axes de recherche portent notamment sur l'élaboration et la caractérisation de composants à base de semiconducteurs à grand gap (GaN, SiC, diamant, etc.) ainsi que sur la mise au point de nouvelles architectures de convertisseurs capables de répondre à des contraintes de plus en plus sévères. La constitution optimale de ces convertisseurs dans un contexte donné reste un défi qui dépasse le cadre de la section, par exemple en faisant appel à des compétences en commande propres à la section 7. L'avancée significative de la fabrication de composants de puissance fondée sur l'utilisation de nouveaux matériaux conduisant à de meilleures performances, que ce soit en terme de tenue en tension, ou encore, de possibilités de commutation à des fréquences de plus en plus élevées, permet d'envisager l'élaboration de convertisseurs répondant aux nombreuses exigences qu'impose aujourd'hui une gestion moderne et efficace de l'énergie produite à partir de sources très diverses (solaire, éolien, biomasse...) en accord avec les objectifs liés à l'impact climatique de l'activité humaine au sens large.

Les exigences de disponibilité, de continuité de service, de qualité, et de transformation de l'énergie, s'appuient sur des structures de réseaux de distribution hybrides, de plus en plus complexes au sein desquels, les convertisseurs jouent un rôle fondamental, car ils sont des éléments de base dont la flexibilité (bidirectionnalité, interfaces entre autres), permet une gestion adaptée à la hauteur de l'ambition rattachée à nos systèmes de production d'énergie. Inévitablement, dans ce contexte, l'élaboration de lois de commande permettant d'exploiter les multiples possibilités offertes par ces

nouvelles générations de convertisseurs, devient complexe et doit s'appuyer sur des modèles tenant compte des spécificités inhérentes à leur nature et leur fonctionnement (commutation, bidirectionnalité, évolution des charges...).

Dans ce contexte, l'exploitation des nombreuses techniques de commande avancées devient centrale pour répondre à ces multiples exigences, donnant un rôle majeur à de nombreux travaux en commande des systèmes, menés dans la section 07 du CNRS, voire si l'on intègre les aspects décisionnels dans un environnement évolutif, ceux de la section 06 du CNRS (Intelligence Artificielle). Pour répondre efficacement aux problématiques directement liées aux traitements de l'énergie, leur intégration doit se faire dans le cadre d'une approche obligatoirement interdisciplinaire (section 06, 07, 08 du CNRS). Comme cela est souvent le cas, la mise en synergie des différentes disciplines fait naître des problèmes spécifiques liés à l'interpénétration nécessaire de ces disciplines.

Un problème important, par exemple, est celui de l'implémentation des structures et des lois de commande dont les nombreuses contraintes pratiques (temps réel et complexité entre autres) nécessitent la conception et l'utilisation de supports dédiés qui sont à l'interface des *mondes* analogique et numérique (algorithmique, microcontrôleurs, FPGA...) ouvrant ainsi des lignes de recherche intéressantes sur le plan scientifique, mais dont la portée pratique les rend incontournables.

Une autre voie qui se dessine aujourd'hui, pour des niveaux de puissance adaptés, consiste à concevoir des micro-convertisseurs uniques possédant de multiples fonctionnalités (bidirectionnalité, DC-DC, AC-DC...), et de les utiliser ensuite en réseau pour réaliser les fonctions globales souhaitées. Les avantages d'une telle approche sont nombreux. Parmi les plus importants, on peut citer la possibilité d'une production systématique et à grande échelle de convertisseurs dont on maîtrise une fois pour toutes les aspects liés à leur fabrication ou encore, suivant le nombre de convertisseurs utilisés, de prévenir les défaillances éventuelles de l'un ou plusieurs d'entre eux. Si une telle situation se produit, il est possible d'envisager la reconfiguration dynamique des convertisseurs opérationnels pour restaurer la fonction initiale. Là encore, le niveau décisionnel joue un rôle primordial et induit des problèmes scientifiques qui relèvent des sections 06 et 07 (commande hiérarchisée, commande décentralisée, systèmes multiagents...). Il va de soi que le caractère pluridisciplinaire reste de mise pour déboucher sur des solutions fiables et acceptables d'un point de vue pratique.

Enfin, un autre problème est celui du stockage de l'énergie. Lorsqu'il s'agit d'un stockage qui ne s'inscrit pas dans une contrainte temporelle prégnante, le problème est celui de l'efficacité et du maintien de l'énergie stockée, disponible et utilisable, dans des phases spécifiques où les sources d'énergie sont limitées. Des avancées significatives ont été faites ces dernières années. Elles doivent être poursuivies et on sait que le rôle des matériaux est central dans ce contexte.

Par contre, si la contrainte temporelle est importante, le problème est beaucoup plus délicat et met en synergie, plusieurs composantes. C'est le cas notamment de la charge rapide des batteries d'un véhicule qui met en relation, si l'on suppose que la source énergétique est disponible, l'élément à l'interface qui est le convertisseur et l'élément de stockage qui est la batterie. Concernant le convertisseur, il doit posséder une structure apte à pouvoir délivrer plusieurs centaines d'ampères et absorber la stratégie de charge qui intègre plusieurs contraintes dont, entre autres, l'une des plus importantes : la durée de vie de l'élément de stockage. Un travail important reste à faire pour élaborer un élément de stockage (structure, matériaux...) qui pouvant admettre une charge importante en quelques minutes, et ce, de manière répétée, sans perdre son efficacité de stockage, avec une durée de vie acceptable, et un coût compatible avec une production en série.

Une nouvelle tendance consiste à analyser désormais le cycle de vie dynamique des systèmes de puissance développés en vue d'une meilleure appréhension de leur impact sociétal.

D'un autre côté les actionneurs, comme les détecteurs permettent d'aborder des thématiques souvent à la frontière avec d'autres disciplines ou domaines comme le vivant (stimulateurs cérébraux, assistance robotique, etc.) qui imposent une forte comptabilité, en fonction de leur contexte d'application, nécessitant de lever les verrous attendants.

## *Électromagnétisme, ondes et antennes*

Une des bases de ce domaine est l'étude du comportement de méta-matériaux et en particulier des metasurfaces, certains étant des matériaux nanostructurés à une échelle inférieure à la longueur d'onde dans le cas des hautes fréquences et d'autres étant formé par exemple de pistes de cuivre en spirale court-circuités par de capacités dans le cas des fréquences plus basses de 10kHz à 100MHz. Ce domaine est d'importance d'un point de vue fondamental pour comprendre et prédire le comportement des matériaux et des systèmes aux transports des ondes (CEM, communication, etc.) mais aussi pour les applications radars, écho-localisation, surfaces intelligentes reconfigurables, etc. Ces problématiques sont fondamentales pour qualifier et quantifier, à l'échelle d'un système, les interactions onde/structure.

Les domaines liés à la réception et à l'émission sont aussi fortement soutenus, en particulier du fait de la multiplicité des sources (des micro-ondes au THz) pour une part croissante d'applications (5G, satellites, téléphonie portable, wifi, IoT, etc.). Ceci nécessite une adaptation des systèmes existants, voire une innovation permanente, prenant en compte les spécificités des problématiques (taille, embarquement, réduction d'énergie, bio compatibilité, multi opérationnalité, etc.). Comme pour les couplages fluide/structure, les couplages ondes/structures sont fondamentaux pour tous les types de transports (véhicules) et communications. La thématique des antennes actives est également aujourd'hui en plein développement.

## *Photonique*

L'optique est aussi bouleversée par l'arrivée des nouveaux matériaux et processus de fabrication (qui ouvre entre autres le spectre des agencements topologiques) dont les interactions avec les ondes nécessitent la compréhension/caractérisation de propriétés. Cette diversité ouvre la voie à la génération plus ou moins contrôlée de polaritons (excitons, phonons, plasmons) pour les semi-conducteurs, les isolants mais aussi la photosynthèse. Ainsi ces nouveaux éléments pourraient être intégrés dans des circuits photoniques pour de multiples usages comme les transistors excitoniques, les diodes électroluminescentes, l'optique diffractive, les cellules solaires, etc.

Il en est de même avec l'évolution des guides optiques pouvant être composés de nanostructures originales (via les cristaux photoniques, par exemple) où la transmission d'ondes permet ainsi le multiplexage multimode. D'autres variantes combinatoires avec des gaz sont aussi un chemin d'exploration pour la transmission ondulatoire.

Ces innovations matériaux permettent d'atteindre des propriétés supplémentaires sur des domaines spectraux toujours plus vastes (des rayons X au moyen infra-rouge (IR)), par exemple pour la dispersion de phase, la réduction des pertes par rapport au flux incident et autres propriétés non-optiques (par ex. détection des ondes gravitationnelles ou cristaux photoniques pour contrôle lumineux). Nous pourrions attendre les mêmes évolutions à partir des méta-surfaces comme cela a déjà été soulevé plus haut.

Des travaux de recherche émergent autour du Niobate de Lithium ( $\text{LiNbO}_3$ ) en particulier pour l'optique quantique. Le Niobate de Lithium est pour le moment le matériau le plus adapté pour faire de la conversion non-linéaire et notamment pour produire des photons intriqués à la température ambiante. C'est aussi un matériau électro-optique qui permet de faire des modulateurs et des coupleurs directionnels reconfigurables qui sont requis pour le routage sur puce des photons, ainsi que dans les montages de tests de base quantiques dits de Hong-Ou-Mandel. La maîtrise de la gravure aux échelles nanométriques est nécessaire au développement de ces circuits photoniques quantiques qui incorporeront les résonateurs et coupleurs en  $\text{LiNbO}_3$ .

De façon générale les nouveaux matériaux et autres capacités de nano-structuration relancent les possibilités offertes par l'optique statistique et le transport au travers d'un milieu complexe (ou trouble, ou diffusant (matériau désordonné), tavelure/speckle). Les capacités de génération de structures aux échelles nanométriques induiront des recherches portant sur le comportement du passage des ondes photoniques, phononiques, plasmoniques, etc. tel un fluide contraint par des structures pariétales. D'autres outils comme l'observation picoseconde ou/et l'imagerie temporelle

(lentille temporelle) permettent d'ores et déjà, dans ces milieux, des observations inédites comme les ondes scélérates sous contraintes spécifiques et ouvrent, plus généralement, une voie nouvelle aux descriptions via l'optique statistique nécessitant aussi une forte contribution théorique et numérique. Les avancées technologiques induites par les recherches en matériaux et nanotechnologies ont créé un vecteur pour les développements de sources laser toujours plus diversifiées pour plus de rendement et de moindre consommation. Le contrôle de ces nouvelles sources d'émission, plus rapides (attoseconde), de type spaser (laser plasmon) ou autres lasers à cascade quantique pour les émissions MIR (moyen infra-rouge), devrait à l'avenir permettre d'enrichir les domaines de recherche liés au transport et au contrôle photonique. En particulier l'optique quantique (cryptographie, interférométrie, métrologie spatiale, etc.) trouve là de nouveaux vecteurs de développement et d'applications.

Des recherches autour des technologies quantiques devraient ouvrir la porte à un certain nombre de technologies comme la cryptographie quantique. Les technologies quantiques, la capacité de générer un photon unique, amènent aujourd'hui à la possibilité d'implémentation au laboratoire des algorithmes de cryptographie quantique, tel que BB84. L'avancement dans ce domaine permettra un transfert technologique vers l'industrie et la mise en place à grande échelle de la cryptographie quantique.

Tous ces éléments sont couverts par les GDRs ondes, méta-matériaux, mecawave, Nano TeraMIR, NAME, OERA, SEEDS.

La partie de l'Optique pour le vivant sera plus particulièrement traitée dans la partie I5 sur les technologies Santé/Vivant.

## **Électronique**

Ce domaine voit la technologie de fabrication, sur laquelle il se base, en constante évolution comme des gravures pour composants toujours plus petites (lithographie EUV pour les transistors maintenant à quelques nanomètres). Les enjeux principaux de ce domaine sont liés à des capacités augmentées dans la troisième dimension, à l'intégration multifonctionnelle locale, etc. pour des composants qui essaient de rester frugaux et dans un objectif de DD. Cette réduction de taille est source de phénomènes limitatifs (effets thermiques, CEM, ...). Elle nécessite de mettre en avant des recherches de pointe en micro/nano thermique et autres problèmes de CEM. De nouveaux domaines prennent plus d'importance à mesure que les objets digitaux prennent de la place dans la société comme la fiabilité et la compatibilité des systèmes avec le vivant et le sociétal (résilience et sécurité) et nécessitent des collaborations avec l'INS2I et l'INSMI en particulier pour des solutions souvent logicielles à base d'algorithmes mathématiques avancés. Ces systèmes digitaux, basés sur l'électronique, toujours plus présents (e-santé, smart cities, IoT, robotique, etc.), nécessitent de repenser (a fortiori à cause de l'hétérogénéité des situations) la problématique des transferts (communications sans fils, connectiques de réception/émission, etc.) et de traitement de données qui sont inédites (a minima à cause de leur taille) nécessitant la mise en œuvre de concepts souvent anciens et rendus plus réalistes de par les évolutions technologiques (liées à la vitesse de calcul, aux capacités accrues de stockage et à la miniaturisation). Ces solutions vont de l'Edge Computing aux analyses IA (rapport IA du CSI, <https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/insis.htm>)

Tous ces éléments sont couverts par les GDRs ISIS, SOC<sup>2</sup>, Sécurité informatique, ondes, IA, MIA, RSD et dans une moindre mesure Robotique. D'un point de vue plus appliqué, la communauté bénéficie entre autres des moyens alloués aux PEPR Electronique et 5G.

Au-delà de l'amélioration des technologies « classiques » pour les mémoires et puces électroniques, de nouveaux paradigmes pourraient voir le jour avec les conceptions de transistors à nanotubes de carbone, ou à nanofils ainsi que de memristors.

Par ailleurs les évolutions des technologies actuelles ouvrent la voie à d'autres types d'architectures, voire à d'autres stratégies de calcul qu'il faudra anticiper en vue de leur intégration dans les systèmes opérationnels. Cela laisse entrevoir le développement de nouveaux langages (programmation moléculaire) spécifiques qui pourraient démontrer leur force dans des domaines particuliers (biologie moléculaire).

La problématique de la raréfaction des métaux utilisés en électronique inorganique, ainsi que la problématique de leur durabilité (industrie du reconditionnement, etc.) nécessitent de pouvoir disposer d'une plus grande variété de capteurs/récepteurs électroniques. La difficulté est que la recherche qui sous-tend leur développement doit avoir une masse critique suffisante pour l'élaboration, la caractérisation et l'adaptation aux nouveaux matériaux au vu de la multiplicité de combinaisons qu'ils

offrent. Un exemple classique est celui des matériaux organiques (polymères, etc.) et hybrides qui permettent le développement de composants et de systèmes à faible empreinte environnementale. Cela ouvre ou a déjà ouvert la voie à l'électronique organique (cellules solaires (OPV), photodiodes organiques (OPD) et diodes électroluminescentes (OLED), etc.) à la spintronique organique, au laser organique et à la bioélectronique. Ces domaines sont couverts par le GDR OERA.

L'électronique organique est un domaine pluridisciplinaire qui s'intéresse à la conception, l'élaboration et la caractérisation de composants électroniques constitués de semi-conducteurs organiques. Le potentiel d'innovation offert par l'électronique organique est lié à la structure chimique des macromolécules utilisées qui possèdent des propriétés (électroniques, électrochimiques, mécaniques, morphologiques, optoélectroniques ...) très spécifiques. La versatilité de la chimie organique offre de nouvelles perspectives pour l'électronique et l'optoélectronique flexible, étirable, biocompatible, biodégradables... De plus ces matériaux possèdent les propriétés physiques nécessaires à la conception de tous les composants d'un même circuit.

L'électronique sur polymères souples (et plus généralement l'électronique organique qui est structurée par le GDR OERA) doit être soutenue pour son potentiel dans le développement de systèmes comme les cellules photovoltaïques, les diodes organiques, les capteurs biologiques, etc. Un fort travail de caractérisation accompagne cette recherche (imagerie MEB, IR, DRX, XPS, et grands instruments de type synchrotrons pour mesures in-operando etc.) qui nécessite un appui fort en termes d'accessibilité aux plateformes mais aussi pour l'adaptation de ces plateformes à ces nouveaux matériaux en contexte système.

### *Micro-nano systèmes, micro-nano-technologies*

Les micro/nano-systèmes sont des enjeux de base de la section pour la mise au point de systèmes toujours plus petits, fonctionnant avec toujours moins d'énergie et en capacité de communiquer toujours mieux. Les enjeux sociétaux et industriels sont multiples avec l'internet des objets (IoT), les smartphones, les transports, l'espace, la santé, etc. Les semi-conducteurs, la micro-fluidique, la micro-nano-fabrication et assemblage, etc. sont autant de domaines sur lesquels la section se positionne de façon historique. Les micro-capteurs fonctionnalisés/émetteurs constituent un domaine incontournable (capteurs de pressions, température, humidité, lumière, vibrations, émetteurs ou récepteurs acoustiques, micros-accéléromètres, gyromètres, etc.). Un enjeu tout aussi fondamental dont la section s'est emparée concerne les systèmes liés au vivant et à la santé, qui seront traités dans la partie I.4 qui leur est dédiée.

Les micro/nano-systèmes s'appuient sur la mise au point ou l'amélioration des matériaux. Ces aspects relèvent de différents types de plateformes (expérimentales de fabrication et caractérisation, numériques de conception). Leurs nouvelles capacités induisent des bouleversements dans la conception, l'amélioration et l'utilisation de nouveaux matériaux à grand gap (nitrure de gallium, carbure de silicium, diamant, etc.), matériaux 2D aux propriétés nouvelles qui ouvrent un champ illimité en termes d'extension de capacité des systèmes existants ou de création de nouveaux systèmes innovants : on peut citer l'exemple des **polymères (ferroélectriques) pour la conversion de l'énergie électrique par mouvement mécanique pour la robotique (biomimétisme des muscles) ou celui des polymères activables par les UV (pour les textiles intelligents)**. C'est en particulier vrai via la fabrication additive (FA) qui s'appuie sur des plateformes dédiées qui doivent se développer et s'adapter aux demandes spécifiques. L'apparition, dans les systèmes, de matériaux actifs, fonctionnels, souples ou étirables, biocompatibles, etc. conduit les dispositifs micro/nano-systèmes à une miniaturisation accrue, aux performances capteurs/actionneurs et circuits électroniques augmentées, à une intégration hétérogène, à la biocompatibilité et/ou biodégradabilité, à leur encapsulation, à leur forte réduction de consommation d'énergie ou à leur résistance en milieux extrêmes (empilement métallique à base d'aluminium contre la corrosion, utilisation de carbure de métaux de transition pour l'amélioration de la dureté, alliage à haute entropie pour le nucléaire, etc.). Notons que cela nécessite de façon générale une interdisciplinarité accrue (chimie des matériaux, bio, médecine, etc.).

Tous les domaines de la section 8 ont pour élément commun les micro/nano-technologies en particulier pour les micro/nano-structuration et fonctionnalisation. L'INSIS a mis en place le réseau RENATECH+ en regroupant et renforçant les capacités de plateformes locales d'une trentaine de laboratoires (LAAS, IEMN, Femto-ST, LTM, C2N, INL, XLIM, etc.) pour élaborer, contrôler, configurer

et mettre en service des matériaux ainsi que des systèmes électroniques ou électrotechniques. Le domaine avait été renforcé ces dernières années via le projet equipEx (PIA3) NANOFUTUR et l'est maintenant par les moyens alloués aux PEPRs PIA4 DIADEM, Electronique, LUMA, pour mieux répondre aux enjeux de recherche concernant la photonique, le photovoltaïque, la spintronique, les dispositifs de communication (RF 5/6/7G et THz), capteurs/récepteurs, micro-batteries, la nanofabrication pour les sciences du vivant, la nanofonctionnalisation, etc. Ces plateformes permettent de renforcer la recherche autour des technologies existantes à base de Silicium (bulk ou SOI), GaAs ou GaN mais également de développer les nouvelles ruptures de demain (Smart Cut, InPoSi, etc.) qui préserveront les ressources en matériaux rares (InP, etc.). Elles soutiennent également le développement de bancs de mesures très spécifiques qui permettent de faire de l'ingénierie et de développer les circuits et systèmes innovants de demain.

De plus en plus, la section se penche sur des nouveaux matériaux notamment composites, qui permettent une fonctionnalisation toujours plus diversifiée. Un enjeu probable de la recherche de demain est d'adapter toutes les technologies (épitaxie, etc.) à toutes les formes de matériaux fonctionnels, composites, multimatériaux, matériaux hybrides organiques/inorganiques, etc. La combinaison de matériaux à propriétés différentes reste aussi un enjeu de la fonctionnalisation. Comme nous l'avons vu plus haut, le toujours plus de miniaturisation des systèmes est un enjeu fort pour les problématiques de structuration (films), de texturation (trous/piliers, canaux) mais aussi de fonctionnalisation (nano tubes, fils, particules). Les verrous à lever sont souvent liés aux interactions physiques et thermodynamiques de base qui nécessitent une recherche accrue en collaboration avec la mécanique des fluides, la thermique, l'INP, l'INC, etc. D'un point de vue technique, la structuration 3D doit continuer ses avancées, en particulier avec le développement de la lithographie multiplexée à l'aide de matériaux multifonctionnels ou les techniques issues de l'ingénierie moléculaire.

Des défis sont à relever également dans le domaine des capteurs implantables, comme pour la réalisation de réseaux de microélectrodes pour les études électrophysiologiques avec des applications potentielles importantes et précieuses en recherche neurologique. L'intégration de nanostructures 3D dans les réseaux de microélectrodes, afin d'améliorer le rapport surface-volume et d'augmenter l'affinité des électrodes avec les cellules, permettrait des interactions subcellulaires et une haute résolution des signaux neuronaux. Cependant, en raison de leur petite surface effective, ces dispositifs souffrent d'une forte impédance d'interface et d'une capacité de transfert de charge limitée. Pour surmonter ces limitations, des recherches doivent être effectuées sur les propriétés des matériaux d'interface à l'échelle nanométrique.

Ces développements vont souvent de pair avec des développements théoriques et de modélisation numérique importants. De même la mise au point de tous les micro/nano-systèmes nécessite des outils de caractérisation, de tests de fiabilité, etc. qui doivent s'adapter aux évolutions des mises au point des nouvelles propriétés matériaux, etc.

L'adaptation aux enjeux sociétaux comme le DD ou l'énergie sera aussi un fort levier pour l'évolution des micro/nanotechnologies. La communauté a parfaitement conscience des efforts à fournir pour une innovation durable en basant une partie de sa recherche sur l'utilisation de nouveaux matériaux ad hoc (basse dimensionnalité, nanostructuration, etc.) et de dispositifs conditionnés par des technologies vertes.

### **3. Thèmes émergents-Signaux faibles**

Un travail conséquent est réalisé par l'INSIS pour l'étude des métamatériaux et des métasurfaces, en particulier pour l'acoustique, la photonique et la thermique, via des structures accordables spatio-temporellement pour la manipulation du trajet ou de l'intensité des ondes lumineuses. Le thème des métasurfaces dynamiques est en cours d'exploration, à juste titre. Cette recherche, structurée via le GDR Archi-META (lancé en 11/2023) suite du GDR META, est fortement tournée vers les applications. Le GDR Ondes, pour sa part, couvre tout le champ de l'étude des ondes allant des fréquences micro-ondes aux fréquences optiques (sans oublier les ondes non électromagnétiques : acoustiques et autres). Néanmoins il semble important qu'une structure couvre le champ des matériaux pour l'électronique et la photonique. Ce domaine a connu un essor considérable qui révolutionne l'optique et dont la partie émergée sont les « capes d'invisibilité ».

On observe un fort engouement dans le domaine des matériaux structurés 2D pour une substitution au silicium des transistors. Leur mise au point, leur caractérisation, leur compréhension intime aux soumissions physico-chimiques diverses ou thermodynamiques extrêmes constituent un travail de longue haleine qui se doit d'être soutenu par l'institution. Ce dernier ne nous semble pas inclus dans le PEPR électronique mais il pourrait être soutenu par un PEPR comme DIADEM.

Matériaux piezo électriques (cristaux phoXoniques) accordables, à changement de phase. Dans ce domaine les couplages sont aussi importants comme les cristaux phoXoniques mixtes constitués d'un solide et d'un fluide.

Un autre domaine qui devrait devenir primordial est l'utilisation de **polymères électroactifs** (PEA), en particulier pour la mise au point d'actionneurs et de capteurs pour leurs capacités aux grandes déformations (au regard des céramiques piézo-électriques par exemple). Leurs utilisations pour la robotique (molle), pour la biologie (pince en EAP) ou l'optique (lentille à focale variable) sont autant de développements systèmes qui indiquent leur potentiel non négligeable, de grand intérêt pour la section. Les plus classiques sont les polymères électroactifs diélectriques, les polymères ferroélectriques (PVDF pour transducteurs acoustiques et autres capteurs de chaleur), les polymères cristallins liquides, les polymères ioniques (actionneurs), ainsi que tous les composites métal-polymères (actionneurs) ou structurés autour des polymères (réseaux interpénétrés de polymères).

L'électronique sur polymères souples (et plus généralement l'électronique organique) doit être soutenue pour son potentiel dans le développement de systèmes comme les cellules photovoltaïques, les diodes organiques, les capteurs biologiques, etc. Un fort travail de caractérisation accompagne cette recherche (imagerie MEB, IR, DRX et XPS, etc.) qui nécessite un appui fort en termes d'accessibilité aux plateformes mais aussi pour l'adaptation de ces plateformes à ces nouveaux matériaux en contexte système.

De façon générale, la section devrait maintenir un effort de recherche autour des **matériaux « intelligents »** (polymères et/ou composites, piézo-électriques, magnétostrictifs à mémoire de forme, à changement de phase) dont les propriétés leur permettent d'être contrôlés par des signaux thermiques, électriques ou magnétiques. Au-delà des applications systèmes citées plus haut, ils peuvent être d'importance pour la production d'énergie.

Un autre domaine qui devrait avoir plus de poids est le développement de matériaux nanostructurés 3D (jauges de déformation sur des structures 3D, micro-supercondensateurs Nanostructures Silicium 3D/ALD, etc.).

On parle aussi des nanostructurations à l'interface entre deux couches de matériaux (*métasurfaces*) comme composants optiques fonctionnels ultra-minces via d'autres techniques, fabrication d'éléments optiques diffractifs obtenus avec des techniques de réplication telles que la nanoimpression et autres formes de lithographies par réplication doit être envisagé

Les avancements dans la conception et l'implémentation de métasurfaces ont conduit à l'apparition d'un domaine en forte émergence : les surfaces intelligentes reconfigurables et modulables (RIS) qui peuvent contribuer grandement à l'amélioration du rendement énergétique des chaînes de télécommunications sans fil, comme les réseaux de type 5G/6G. Le développement de MEMS, de résonateurs micromécaniques, capables de générer du chaos aux propriétés maîtrisables peuvent apporter une nouvelle dynamique pour les transmissions sans fil cryptées et sécurisées. Le couplage de ces MEMS et de RIS amènerait à la fois des communications sans fil sécurisées et avec une très faible consommation énergétique.

Un autre domaine émergent est l'utilisation d'ondes picophotoniques (photonique à l'échelle atomique) dans les matériaux semi-conducteurs pour les applications aux technologies quantiques.

En photonique, les innovations liées aux sources lasers (lasers à cascade quantique THz) comme la diversité des matériaux et composites doivent permettre de continuer à proposer des applications originales pour l'imagerie, le biomédical (manipulation d'objets biologiques) ou les télécommunications.

On pourra citer aussi le développement de la « programmation moléculaire » qui peut servir en particulier pour la détection de biomarqueurs (protéines, microARN), mais aussi pour la détection de cellules vivantes (via entre autres l'utilisation de particules fonctionnalisées (ADN)). À terme, ce type de détecteur pourrait être multiplexé et multimodal pour la détection de différents types de biomarqueurs.

Une voie intéressante, entre autres dans le cadre des réductions de consommation d'énergie, est la capacité à produire des réseaux de neurones neuro (bio)inspirés, non plus par logiciel mais à l'aide de réseaux électroniques aux composants dédiés et la capacité de la spintronique à générer des



nanoneurones et nanosynapses suffisamment fins. Dans ce domaine, une recherche accrue serait intéressante autour de memristors capables de reproduire le comportement d'un neurone en se basant sur les isolants de *Mott*, des matériaux innovants qui peuvent devenir conducteurs par application d'une tension. Le développement de ces circuits neuromorphiques ouvrirait la voie d'une IA au plus près des capteurs, IA at the edge et une IA frugale.

Le développement des capteurs autonomes pour le monitoring de l'environnement passe par la mise au point de nouveaux systèmes de récupération d'énergie capables de convertir l'énergie renouvelable environnante en énergie électrique. La technologie des biopiles à base de plantes, permettant de produire de l'électricité à partir de l'oxydation des composés organiques libérés par les racines, semble prometteuse pour alimenter des réseaux de capteurs autonomes de façon robuste. Cette technologie encore peu explorée exige le développement de nouvelles approches pluridisciplinaires permettant la mise à l'échelle et l'optimisation des performances de biopiles éco-conçues (choix de convertisseurs, choix de configurations pour l'association de plusieurs biopiles, électrodes à base de nouveaux matériaux biosourcés, etc).

Un domaine stratégique qui apparaît fortement est la sécurité matérielle de circuits intégrés et plus précisément de processeurs et/ou des objets communicants sans fil. Ce domaine est interdisciplinaire, à la frontière entre le matériel et le logiciel, entre les sections 08 et 07. De nouvelles techniques de sécurité matérielle implémentée directement au cœur du processeur sont actuellement étudiés.

Un autre challenge important repose sur l'intégration électronique hétérogène des technologies en développement (Si, SiGe, AsGa, GaN, ...) analogiques et numériques. Ceci permettrait par exemple d'optimiser les performances d'une architecture de communication en faisant appel au meilleur de chaque technologie. (Exemple Module de Transmission Réception Tx/Rx en GaN et AsGa). Cependant cette association hétérogène de composants fonctionnant à haute fréquence dans un même package soulève de nombreux défis multiphysiques (interconnexions, thermique, packaging...) qui doivent être résolus.

D'autre part, au-delà de l'amélioration des composants électroniques par le biais de l'usage de nouveaux matériaux, il existe également un aspect ingénierie important à développer sur les architectures des circuits analogiques (Basse fréquence, RF ou hyperfréquence). En effet c'est grâce à ces efforts que nous arriverons à réduire la surface des circuits afin de limiter d'une part l'impact sur les ressources en matériaux de la planète mais également afin d'augmenter leur rendement énergétique pour minimiser leur consommation énergétique.

Dans le domaine de l'énergie, le développement de structures de conversion et leur optimisation en incluant les lois de commande, ainsi que le packaging devient primordial. La co-conception des outils de commande et contrôle avec les structures de conversion du point de vue de matériaux, du cycle de vie, et de la fiabilité est nécessaire. Suite à la massification de convertisseurs dans les réseaux, des études approfondies sont nécessaires autour de matériaux à utiliser, ainsi que de la robustesse aux perturbations électromagnétiques. Au vu d'une meilleure intégration sur chip de systèmes de puissance et de convertisseurs, répondre au problème du packaging devient essentiel : comment avoir plus de puissance dans un espace de plus en plus réduit afin d'augmenter la densité de puissance et d'énergie.

Afin de répondre à ces problématiques, un domaine qui mériterait plus de recherche est l'électronique supraconductrice pour des composants électroniques mais qui nécessiterait probablement un support technique important (température et/ou pression à maintenir qui demande probablement des moyens énergivores) pour les équipes à même de travailler dessus.

On voit également apparaître la problématique du stockage de l'énergie avec recharge rapide en utilisant une analyse basée sur un jumeau numérique (ce qui nécessite de capteurs autour de la batterie) dans le cloud afin d'optimiser le chargement, identifier de nouveaux indicateurs et prendre en compte les problèmes de vieillissement dans le contrôle en temps réel du chargement. Du point de vue technologie, une nouvelle voie fait son entrée, les technologies pour batteries organiques en plus de l'optimisation de cellules de batteries classiques.

## **4. Outils (expérimental/numérique)**

### *a. Expérimental*

Les technologies de fabrication et de caractérisation des micro/nano-systèmes sont un élément constitutif de la section. Ces dernières années elles consolident les acquis en termes de nanofabrication

de nanoobjets et de nanostructuration des surfaces 2D ou 3D, en particulier au travers du support du réseau RENATCH+. La communauté recherche toujours plus de résolution spatiale, de précision, de miniaturisation, de reproductibilité, etc. Un des autres enjeux est la possibilité d'utiliser des substrats aux propriétés spécifiques (souplesse, etc.). C'est ainsi que des techniques ont été adaptées pour de nouveaux précurseurs en épitaxie par phase vapeur ou par jet moléculaire (EPVOM, EJM) permettant de synthétiser des matériaux aux propriétés innovantes (supraconducteur (KTaO<sub>3</sub>, LaMnO<sub>3</sub>, etc.), etc.) et d'en développer d'autres, créées ces dernières années, comme la lithographie à 2 photons, la lithographie colloïdale liquide assistée par laser, les procédés EUV pour lithographies, la lithographie par nanoimpression (NIL, UV-NIL) moules souples ou rigides, épitaxie des boîtes quantiques, synthèse par voie chimique (nanocristaux semi-conducteurs de phosphore d'indium (InP)), synthèses des origamis d'ADN pour la nanostructuration (nanostructuration par masque d'Origami) complexe en 2D et en 3D, etc.

Beaucoup de domaines en dehors de l'électronique bénéficient de ces avancées, comme la reproduction de parties de systèmes physiologiques à l'aide de l'impression 3D DLP (Digital Light Processing) via des polymères biocompatibles. Ainsi la mise au point de ces technologies permet à la communauté toujours plus de collaborations interdisciplinaires.

Pour des domaines de la section comme le développement des micro-antennes ou des MEMS, d'autres techniques ont été développées ou améliorées et constituent là encore une recherche de pointe de la section, nécessaire pour la mise au point des systèmes micrométriques comme la soudure par diffusion, les soudures laser sur du silicium et d'autres matériaux semiconducteurs, ouvrant de nouvelles possibilités pour la fabrication de systèmes électroniques et photoniques, de MeMs, etc. L'évolution des lasers vers toujours plus de précision temporelle (durée et fréquence de tir) permet de gagner en précision sur les assemblages de tous types de matériaux et maintenant pour les semi-conducteurs via les soudures Si/Si, Si/AsGa, etc. Dans le domaine de l'énergie une nouvelle modélisation de systèmes de puissance est développée basée sur des modèles physiques combinés avec de l'intelligence artificielle « Data driven Physical Based Modelling » avec des applications aux micro-réseaux et au smart grid. Des modèles hybrides analytiques/expérimentales (modélisation physique) sont utilisés pour le diagnostic et le pronostic dans le cadre des analyses d'état de santé de structures de puissance (SHM-Structure Health Monitoring). Les jumeaux numériques basés sur les relevés de capteurs autour de batteries sont également utilisés pour optimiser le chargement de batteries, traiter le problème du vieillissement et prendre en compte le comportement de l'utilisateur.

Nous notons le développement de jumeaux numériques dans pratiquement tous les domaines de la section 7 et 8. Ceci conduit à la mise en place des outils expérimental/numérique pour le développement d'une filière SHM (Structure Health Monitoring) pour des structures très diverses en partant de petites échelles (systèmes électriques de puissance, etc) aux grandes structures (avion, bâtiments, conduites, etc.) Une filière nationale SHM est en train de se structurer actuellement.

## *b. Numérique*

Par ailleurs le numérique se retrouve dans bon nombre de recherches pour le développement de capteurs d'un point de vue local, pour améliorer les aspects de conception comme la fiabilité, la résilience, la résistance aux défauts, etc., propriétés associées au travers le développement d'algorithmes de traitement des données.

L'exploitation de réseaux denses de nanocapteurs associée à un traitement des données permet d'optimiser performance et fiabilité.

L'arrivée de nouveaux réseaux d'énergie associés à une gamme de plus en plus variée de sources (électrique, thermique, hydrogène, etc.) nécessite des modélisations ad hoc pour le contrôle et le diagnostic, leur dimensionnement et leur optimisation à tous les niveaux (sources, charges, stockage).

Ces modélisations peuvent nécessiter une interaction expérimental/numérique temps réel (contrôle actif aérodynamique en S10, voiture autonome en S7, etc.). **Existe-t-il une recherche en modélisations instationnaire ad hoc (INSMI, CID 5X, etc.) ?** Un autre exemple d'interaction numérique/expérimental en temps réel est lié aux solutions pour la flexibilité en fréquence et en modes de fonctionnement pour l'émission/réception à distance (pour de très hauts débits/faible consommation d'énergie pour la 5G/6G) ou pour l'IoT (via la spintronique mais aussi via les techniques de correction

numérique des imperfections dans les circuits électroniques de toute nature). De façon plus spécifique, le « edge computing », pour l'autonomie et la limitation du flux de données, ouvre la voie à la génération d'une information filtrée a priori en fonction de l'objectif, nécessitant alors une programmation spécialisée et localisée dépendante du réseau global. Ce peut être via un couplage expérimental/numérique avec le développement potentiel d'architectures spécialisées pour le calcul neuromorphique. Du transport des ondes en général, émerge l'ingénierie inverse (reverse engineering) basée sur des algorithmes de type « apprentissage automatique » pour l'imagerie inverse.

De façon globale, ces dernières années les développements des traitements quantiques ou neuromorphiques de l'information, en particulier via le PEPR Quantiques ou le développement de techniques IA par apprentissage, via le PEPR IA, sont soutenus et ne peuvent être mésestimés. De plus, comme déjà souligné au niveau des sujets émergents, une voie d'avenir va consister à passer des réseaux de neurones logiciels très énergivores à des réseaux « matériels » de neurones et de synapses artificiels (spintronique bio inspirée, systèmes neuro-morphiques hardware génériques) via l'émergence des nouveaux matériaux.

On parle aussi d'imagerie intelligente qui se base sur de nouveaux couplages entre analyse et mesure comme la co-conception de l'imageur et de l'analyse IA.

Les nouveaux enjeux et applications (en aéronautique, transport, énergie, etc.) nécessitent également l'intégration, de plus de capteurs et actionneurs en interaction. Ces « cohortes » (systèmes digitaux appelés CPS, pour *Cyber Physical Systems*) nécessitent une gestion logicielle de plus en plus complexe qui peut gérer jusqu'à plusieurs milliards d'objets communicants, l'autonomie de gestion pouvant être acquise via l'utilisation d'outils de l'IA.

D'un autre côté, les manipulations de la lumière incluent aussi les développements de systèmes utilisant de la co-conception optique/traitement, comme pour les systèmes d'imagerie, afin d'optimiser conjointement les paramètres de l'optique et du traitement numérique.

La montée en fréquence associée à la diminution importante des dimensions des dispositifs utilisés sur les circuits microélectroniques fait que la plupart des outils numériques (semi-conducteur, thermique, électromagnétique...) qui ont été développés il y a plus d'une vingtaine d'années par les laboratoires avant de se retrouver propulsé sur le marché par des sociétés de logiciels (ANSYS, DASSAULT,...) sont aujourd'hui incapables de répondre de manière satisfaisante à des problématiques ou la géométrie submicronique ainsi que les temps de réponse ultra brefs imposent par exemple d'utiliser d'autres équations ou formalisme.

Ainsi, il apparaît judicieux de pouvoir développer, démocratiser des outils au sein d'une plateforme logicielle nationale organisée (semblable à RENATECH) qui pourrait engendrer le partage, l'amélioration d'outils pour appréhender les phénomènes nano et submicroniques, et/ou subpicoseconde.

### *c. Combinaisons :*

La S8 a conscience que ce qui importe est le couplage fort entre théorie, expérience et caractérisation. Les études théoriques et les simulations numériques (dynamique moléculaire, calculs de structure électronique, approches multiéchelles, modélisations multiphysiques, simulation de transport quantique) occupent donc une place essentielle en complément des activités expérimentales.

La caractérisation locale est nécessaire pour atteindre une maîtrise ultime et qui pourrait être complétée par la modélisation à l'échelle atomique des procédés de fabrication par des méthodes inspirées de l'Intelligence Artificielle.

Les avancées HPC permettent la mise en œuvre de modèles pour la prédiction des performances des matériaux, leurs pertes et/ou l'étude des mécanismes de détérioration (conception et l'optimisation de matériaux magnétiques doux et durs (aimants)). De façon générale cela permet d'introduire de nouveaux concepts tout en optimisant la mise en œuvre pratique, en réduisant les effets périphériques (échauffement) et la consommation énergétique pour toujours plus de fiabilité. Ces optimisations tant fonctionnelles qu'opérationnelles se font dans un contexte d'ODD mais aussi simplement sociétal (nuisances sonores, électro-magnétiques, etc.).

Comme on l'a vu précédemment, des domaines comme l'électromagnétisme se basent sur une modélisation classique comme l'homogénéisation des ondes ou les milieux effectifs ou la diffraction (pour cristaux photoniques, métamatériaux et méta-surfaces, propagation des ondes dans les milieux

désordonnés, sondage radar de la biomasse, analyse optique de tissus vivants)). Ce domaine est d'importance d'un point de vue fondamental pour comprendre et prédire le comportement des matériaux et des systèmes aux transports des ondes pour la fiabilité, la sécurité et surtout son adaptation (bruit, parasitage, etc.) au contexte tant en émission qu'en réception.

D'un point de vue plus général, nous avons vu que la section a, dans tous les domaines, été soumise à une forte évolution en micro/nano-technologies conduisant à de nouveaux systèmes électroniques, de nouvelles architectures et à une autre échelle des cohortes de capteurs/récepteurs aux propriétés toujours plus variées. Il faudra les prendre en compte dans les modélisations pour assurer la prédictibilité de la fiabilité, de la sécurité, etc.

Il faut aussi repenser la possibilité de modélisation à l'aune de nouveaux types de calcul (logiques multiniveaux, du calcul approximatif, asynchrone, neuro-inspiré, etc.) et autre calcul quantique.

D'un point de vue génie électrique, de nouveaux réseaux d'énergie hétérogènes (électrique, thermique, hydrogène, etc.) doivent être l'objectif prioritaire des modélisations ad hoc pour leur contrôle, diagnostic, dimensionnement et optimisation technico-économique, en prenant en compte tous les niveaux (sources, charges, stockage) afin de faciliter les solutions autonomes et locales de sources vertes intermittentes (éolien, photovoltaïque, etc.).

Tous ces aspects développent un enjeu sécuritaire aux solutions numériques nouvelles, par exemple pour la sécurité électronique, induisant de nouveaux schémas de chiffrement, tels que les chiffrements homomorphes et post-quantiques. Dans le domaine des attaques par canaux cachés (auxiliaires) il y a des recherches de solutions cryptographiques mixtes ou par IA (machine ou *deep learning*) en commun avec S6 et S7.

## B. Section 9 (S09)

### 1. Introduction

La section 9 est historiquement concentrée sur **la mécanique, les matériaux et leurs propriétés mécaniques, les surfaces et interfaces pour la mécanique, l'acoustique, et leurs applications.**

Les développements dans ce domaine sont tirés par la recherche de nouvelles performances pour les matériaux et les structures. Ils concernent :

- La mesure, la compréhension et l'amélioration des comportements mécaniques (résistance mécanique, propriétés thermiques, acoustiques, optiques et électriques) ;
- Le renforcement de la tenue en service (fatigue, corrosion, usure et perte de fonctionnalité) ;
- Le développement de nouvelles fonctionnalités (matériaux multifonctions, matériaux et structures adaptatives et intelligentes, durabilité et recyclabilité, applications pour le vivant et la robotique) ;
- L'élaboration et l'amélioration des procédés de fabrication (efficacité, rendement économique, méthodologies de développement et de production).

Ces objectifs se traduisent à travers les thématiques de recherche suivantes :

- La modélisation du comportement des matériaux et des structures à différentes échelles ;
- L'analyse et l'optimisation des microstructures en relation avec le processus de fabrication et/ou l'état d'usage. (Cela concerne les métaux, les céramiques, les matériaux biosourcés, les polymères et les biomatériaux (matériaux généralement mous, polyphasiques ou poreux), les géo-matériaux (matériaux fluants), les surfaces et interfaces pour la mécanique.)
- Le développement des applications des matériaux et des structures. (Il s'agit de maîtriser et d'optimiser la mécanique des systèmes ; la mécanique pour la robotique et le vivant ; la mécanique des sols et des infrastructures ; la mécanique vibratoire et acoustique.)

Les chercheurs de la section 9 de l'INSIS sont fortement impliqués dans l'enseignement en partenariat avec leurs collègues enseignants-chercheurs, via des projets d'étudiants au niveau Master et Doctorat.

### 2. Orientations et verrous

#### a. Ingénierie des structures.

Les outils de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) incluent des possibilités de simulation du comportement mécanique des structures afin de faciliter la conception des structures fonctionnelles fiables pour la mécanique. Ces outils sont aujourd'hui suffisamment performants et ergonomiques pour pouvoir concevoir numériquement un produit, en optimisant ses fonctionnalités et son comportement mécanique, avant d'amorcer la fabrication. Ces outils accélèrent l'innovation.

Les outils numériques actuels parviennent à intégrer et à exploiter des lois de comportement complexes (élasticité + plasticité + viscosité) pour décrire les grandes déformations, et les cas extrêmes de déformations à grande vitesse (pour les crash-tests, par exemple). Ils incluent aussi des modules qui rendent compte des couplages multiphysiques (effets thermiques, électriques, magnétiques, piézoélectriques, couplage avec des fluides). Le GDR ACO-CHOCOLAS a permis d'organiser au sein de la communauté des approches couplées sur ces thèmes (comportement des matériaux sollicités sous grandes vitesses de déformation ( $>10^4 \text{ s}^{-1}$ )).

Ces logiciels sont aussi des outils de diagnostic. En effet, les maquettes numériques permettent d'interpréter des changements de comportement observés (évolution de la performance d'un processus de fabrication), d'évaluer les conséquences de l'évolution d'un paramètre (risque de dysfonctionnement), de tester virtuellement des conditions de sollicitation extrêmes afin d'évaluer des mesures de remédiation (par exemple, celles d'une tempête exceptionnelle sur une éolienne en mer, des fluctuations importantes de température sur le comportement d'une tuyère ou d'une pale ... les effets d'un séisme sur une infrastructure).

Les travaux de la section 9 contribuent à faire évoluer les logiciels de simulation.

## **b. Ingénierie des matériaux et comportement mécanique.**

L'observation des lois de comportement des matériaux, leur modélisation et leur compréhension constituent un travail important pour alimenter de façon fiable la base de données des outils de CAO pour la mécanique. Or, le comportement d'un matériau dépend non seulement de sa composition ; mais aussi, - des procédés de fabrication des matériaux (sidérurgie, fonderie, forge, métallurgie, laminage, corroyage, extrusion, frittage, fabrication additive), - de leur mise en œuvre (usinage, post-traitements et finition), - et des méthodes d'assemblage des éléments de la structure (soudage, sertissage, collage). Ainsi, naturellement, les mécaniciens se sont intéressés aux procédés de production et de transformation des matériaux, et aux incidences des microstructures produites sur leur comportement (tailles des grains, orientations des grains, production de défauts, présence de précipités, joints de grains, porosités ...). (Voir par exemple le GDR REX qui s'intéresse à la recristallisation et la croissance des grains).

Ce travail de fond est nécessaire pour entretenir le développement de la discipline. Il va de pair avec l'amélioration continue des matériaux. Ainsi, en quelques dizaines d'années, la science des matériaux a fait des progrès considérables dans le domaine des aciers à haute résistance mécaniques, des métaux réfractaires (alliages de titane, nickel, zirconium), des céramiques et des polymères. Ces avancées ont permis d'accroître les résistances mécaniques des matériaux ; leurs résistances aux chocs, au fluage, aux hautes températures. Ces progrès permettent aujourd'hui de réduire significativement le poids des structures.

L'observation des lois de comportement des matériaux, leur modélisation et leur compréhension constituent aussi un travail important pour informer les outils de CAO de façon fiable. L'enjeu actuel dans ce domaine est de parvenir à décrire l'évolution du comportement des matériaux au fur et à mesure de leur transformation au cours de la fabrication et en usage, ainsi que sous l'effet de l'endommagement (A titre d'exemple, le Labex DAMAS est consacré à cette problématique).

La conception et l'optimisation de matériaux complexes sont des domaines de création et d'innovation : - *matériaux fonctionnels architecturés* (matériaux revêtus et composites (polymères, fibres, céramiques, métaux)), - *matériaux multifonctions* (matériaux intelligents : à mémoire de forme, piézoélectriques, magnétiques/magnétostrictifs), - *matériaux architecturés produits par fabrication additive* pouvant éventuellement présenter des gradients de microstructure et de composition. Des matériaux requièrent des analyses multiphysiques adaptées à leurs finalités spécifiques (couplages de propriétés mécaniques, optiques, électriques, thermiques...).

La section 9 est très présente sur le front du développement des matériaux complexes, notamment à travers les membres des GDR ALMA, MECAFIB (mécanique multiéchelle des corps fibreux, orienté vers les caractérisations fines et le développement de modèles multiéchelles adaptés), MEPHY, MIC (orienté vers la fabrication des composites, et en particulier sur la simulation des déformations des tissus fibreux, incluant des fibres biosourcées), POLYNANO (incidence du drapage et de l'inclusion de nanomatériaux dans les matériaux composites).

Les techniques actuelles d'analyses des microstructures permettent de comprendre le comportement des matériaux parce qu'elles couvrent un large spectre de caractéristiques : - à *différentes échelles* (nanoscopique (dislocations et défauts), microscopique (grains et texture), macroscopique (comportement mécanique) ; volume et surface), - *embrassant la complexité des matériaux* (chimie, microstructure et texture, comportements mécaniques locaux), et – *permettant de suivre leur évolution sous sollicitation* (imagerie 2D et 3D de la microstructure par microscopie et tomographie, éventuellement en temps réel ; comportement mécanique et contrôle non destructif). L'approche multitechnique est pratiquement généralisée. Elle combine par exemple des observations par microscopie électronique, par diffraction de rayons X, de la tomographie, des mesures acoustiques et des essais mécaniques. L'approche multitechnique croise les regards et enrichit chaque ensemble de données. Les GDR MECAFIB, Polynano2, Bois (le bois dans la construction et le génie civil) exploitent ces techniques d'analyse poussées en les rapprochant des modèles numériques multiéchelles.

### c. Mécanique des surfaces et interfaces. Surfaces et interfaces pour la mécanique.

Le comportement mécanique des surfaces et interfaces est déterminant pour assurer la durée de vie des matériaux, des structures et des machines. La problématique concerne à la fois : - la modification des surfaces *en interaction avec l'environnement* en service (frottement et lubrification, corrosion, interactions biologiques, expositions à la lumière et à la chaleur), - *les revêtements et les procédés de transformation superficielle* (protection anticorrosion, traitement de durcissement), - *les interactions entre matériaux* différents (adhérence entre phases, soudures, collages, contraintes résiduelles aux interfaces).

Historiquement, ce champ de recherche concernait le comportement tribologique des surfaces et la lubrification. Dans ce contexte, la *rugosité* a une influence remarquable sur la tenue en service parce qu'elle modifie la distribution des points de contact et l'intensité des interactions. De plus, les surfaces rugueuses permettent de retenir des quantités plus importantes de lubrifiant. Enfin, des traitements de surface incluant des étapes de finition (polissage, grenailage), la cémentation et les revêtements, modifient significativement la *dureté* des surfaces et leur résistance à l'usure. Ce volet a déjà fait l'objet d'un travail approfondi en association avec une description de l'*hydrodynamique* des lubrifiants en interaction avec les surfaces. Dans ce champ d'investigation, les membres du GDR SURFTOPO s'intéressent à la caractérisation topographique multiéchelle des surfaces et de ses corrélations avec leurs fonctionnalités.

La microstructure et la texture des matériaux en surface, ainsi que la rugosité des surfaces, influencent remarquablement la résistance aux chocs et l'usinabilité des matériaux. De nombreuses études ont été consacrées à comprendre les interactions entre l'outil et la pièce en usinage rapide, afin d'optimiser la productivité, de prolonger la vie des outils, et d'accroître la qualité de la finition. Une des particularités de ce domaine est de faire intervenir de très grandes vitesses de déformations. Des revêtements durs ont été développés pour prolonger la durée de vie des outils.

Les problèmes mécaniques aux surfaces sont compliqués, théoriquement et expérimentalement. En effet, ils font intervenir des niveaux de contraintes importants et très hétérogènes (mécanique du contact) ; ainsi que des vitesses de déformation élevées. De plus, les objets sont souvent mal définis (rugosité) et en évolution (écrouissage, arrachement et transport de matière). Enfin, il s'agit souvent de problèmes multiphysiques couplant la mécanique à la thermique, et à la réactivité chimique (milieu multiphasique). Des méthodes et des outils spécifiques sont utilisés pour analyser les interactions et les évolutions des surfaces sur le terrain (microcapteurs, sonde optiques), et au laboratoire (analyses de surface).

Les surfaces constituent aussi un point névralgique de la résistance des matériaux aux grandes déformations, et en fatigue. Ainsi, - la *tenue en fatigue* est influencée par la rugosité, et dégradée par la présence de piqûres de corrosion. - Le *comportement à la rupture* de certains matériaux fins revêtus est déterminé par la nature et la microstructure du revêtement. - L'amélioration spectaculaire de la tenue en fatigue de *matériaux grenillés ou corroyés* (SMAT, laser shot peening, corroyage par ultra-sons) a démontré l'importance d'un écrouissage superficiel et d'une mise en compression des surfaces sur l'amorçage des fissures. Ces exemples suggèrent que les instabilités et les endommagements s'amorcent fréquemment en surface. Il en résulte que l'état de surface détermine le comportement du matériau sur l'épaisseur de quelques grains ; et que les surfaces influencent significativement le comportement de structures incluant des voiles, des parois fines. Il en est de même pour les microsystèmes mécaniques fabriqués par lithographie (accéléromètres, micromoteurs).

La section 9 bénéficie d'un savoir-faire expérimental spécifique pour analyser les caractéristiques structurelles et mécaniques des surfaces en exploitant le micro-usinage par faisceaux d'ions focalisés, la microscopie à haute résolution, la microscopie à champ proche, l'EBSD (diffraction d'électrons rétrodiffusés), et la nanoindentation.

#### **d. Mécanique des milieux continus généralisée.**

Les sciences de l'ingénieur s'intéressent à la modélisation du comportement des matériaux pour le relier à la microstructure, afin d'orienter l'optimisation des procédés de production. Elles cherchent aussi à modéliser le comportement des matériaux pour alimenter les bases de données des logiciels de CAO.

Une « mécanique des milieux continus généralisée » pourrait unifier la mécanique des milieux continus, la mécanique de la rupture et la science des matériaux. Pour cela, il faut intégrer les informations de microstructure et de texture, ainsi qu'une description de l'endommagement et des instabilités mécaniques à l'échelle de la microstructure.

Pour passer à l'échelle macroscopique, celle des structures, il faut simplifier la description du comportement à l'échelle microscopique pour la rendre utilisable dans les outils de simulation. Ce passage, le « couplage multiéchelle », passe généralement par un modèle phénoménologique, éventuellement anisotrope, obtenu à partir d'un calcul d'homogénéisation. Cette simplification est efficace si le matériau utilisé présente la même structure dans tout le volume ; c'est-à-dire, par exemple, pour les pièces usinées à partir d'un bloc de matière.

Pour les matériaux à grains fins comme les aciers multiphasés à haute résistance mécanique, les matériaux de construction métallique (titane, aluminium, inconel ...) et les céramiques, décrire le comportement de microstructures représentatives reste un défi actuel. Il s'agit en particulier, de modéliser les défauts, leur création, leur annihilation, leurs interactions, et leurs effets sur les propriétés mécaniques. Le comportement des joints de grain (désorientation cristallographique ou séparation des phases dans un matériau multiphasé), ou plus spécifiquement, celui des interfaces au sein des matériaux composites et architecturés, sont aussi des domaines de recherche actifs. Ces problématiques sont importantes parce que les défauts sont des singularités pour la mécanique des milieux continus, et que les discontinuités des microstructures aux joints de grains et aux interfaces donnent lieu à des incompatibilités de déformation et des concentrations de contraintes. Les défauts et les interfaces sont susceptibles de durcir les matériaux lorsqu'ils/elles produisent des contraintes résiduelles localisées, qu'ils/elles freinent ou entravent les déformations plastiques. De plus, ils/elles sont susceptibles d'engendrer des instabilités de comportement, qui finalement amorcent la rupture. Tout cela constitue encore un travail de fond de la communauté. Les membres du GDR HEA notamment contribuent à faire avancer cette question.

La description des mécanismes d'évolution des matériaux à l'échelle microscopique constitue aussi un champ important d'investigation pour comprendre les transformations de la microstructure. Ces transformations s'opèrent par fractionnement des grains et réorientations cristallines ; elles sont observées lors des déformations, sous contraintes ou lors de traitements thermomécaniques. En particulier, le recours à l'analyse des variants produits à partir d'une orientation cristallographique initiale permet de décrire le fractionnement des grains, les réorientations cristallographiques par déformation et recristallisation, les transformations de phase ; tandis que la modélisation en champ de phase décrit les phénomènes de diffusion réactive. Les observations des matériaux et la modélisation de leurs évolutions orientent l'optimisation des procédés de fabrication des matériaux et des structures (GDR REX).

Un autre défi conséquent pour la modélisation réside dans la description des comportements des matériaux aux grandes déformations. Il s'agit de décrire les comportements non-linéaires et les instabilités mécaniques. En particulier, les grandes déformations des matériaux mous (polymères et matériaux biologiques) donnent lieu à des comportements complexes (visco-élastoplasticité, thixotropie, interactions fluide-structure aux interfaces). Les outils mathématiques doivent être perfectionnés pour garantir la robustesse et la fiabilité de ces prédictions. Les membres du GDR MECABIO s'intéressent à cette question pour les cellules biologiques (mécanique des matériaux et fluides biologiques).

D'autre part, l'endommagement modifie le comportement du matériau et prélude à la rupture. Or, la description de ces phénomènes reste très empirique et mal assise. Le problème est rendu complexe par la variété des mécanismes intervenants (rupture fragile, ouverture de porosités et rupture ductile, écoulement et fissuration par fatigue, par exemple), le fait que leur prédominance dépend des conditions de sollicitation comme la température, la répétition et la vitesse de déformation,



éventuellement par la complexité du matériau lui-même (porosité, hétérogénéité, microstructure), et enfin par la localisation des contraintes et déformations.

Le passage de la modélisation du comportement des matériaux de l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique est trop complexe et trop lourd pour être mise en œuvre pour chaque petit « volume élémentaire représentatif » des structures, si la microstructure et son anisotropie varient dans la pièce. Ceci reste un enjeu pour conserver le réalisme d'une description fine du comportement. Ainsi, la première étape de la description consiste à prédire une microstructure représentative à chaque point de la pièce telle qu'elle résulte du procédé de fabrication. Des codes existent pour cela pour la plupart des méthodes de fabrication : le moulage par injection, la fonderie, la forge, la coulée continue et le laminage, les recuits (recristallisation, frittage). Le défi de la seconde étape consiste à simplifier la description du comportement local si la microstructure varie fortement à travers la structure. Il est permis d'envisager que les puissances de calcul permettront peut-être un jour d'effectuer complètement une modélisation fine. L'approche actuelle vise à développer des méthodes de réduction des calculs.

#### **e. Biomécanique et mécanique pour le vivant. Bioingénierie.**

Les études de la section 9 en biomécanique s'intéressent aux mouvements du corps dans le domaine médical (orthopédie) et dans la vie courante (examen de la posture, ergonomie, optimisation du geste sportif). Des protocoles sont développés pour détecter les pathologies (sédentarité, postures inadéquates, ...), pour optimiser des équipements (objets du quotidien, appareillages médicaux et sportifs), ou contribuer au développement de technologies d'assistance (palliatif aux handicaps, assistance respiratoire, dialyse...). Les études de la mécanique musculo-squelettique sont aussi utiles pour optimiser le grappillage d'énergie à partir des mouvements du corps. Des équipes s'intéressent au fonctionnement des organes (cœur, poumons, mobilité ...) pour optimiser les prothèses (insertion et fonctionnement, adaptation de la rigidité mécanique, accrochage et interaction mécanique entre matériaux inorganique et vivant) ou comprendre les lésions afin de réfléchir aux mesures de protection (accidentologie). Le GDR REPAIR (bio-impression, intégration dans les tissus, biocompatibilité et biodégradation), a permis de regrouper la communauté de la section et de la mettre en relation avec les GDR MECABIO, SOC2, TACT, SURFTOPO, MEPHY ; en lien avec les sections 10, CID54, 51 ; ainsi qu'avec des équipes de l'INSB, du CEA et de l'INSERM.

Des études plus fondamentales portent sur le comportement des tissus (humains, animaux et végétaux), des cellules et des fluides corporels (interactions fluide-structure dans les vaisseaux). Par extension, l'élaboration de matériaux pour le vivant oblige à se pencher sur les biomatériaux eux-mêmes, sur la biocompatibilité des matériaux utilisés en soutien ou en remplacement (implants, dents, matériel orthodontique) et à la bioingénierie tissulaire (production de tissus artificiels par fabrication additive, essais in-vitro, croissance sous stress). Ces connaissances sont nécessaires pour mieux appréhender les maladies cardio-vasculaires, les conséquences des traumatismes, et les mécanismes de la biocompatibilité des prothèses sur le long terme.

Ce champ d'investigation requiert des outils d'observation et d'analyse spécifiques (imagerie biomédicale : acoustique, optique, IRM... capteurs de posture, de mouvement...) De plus, les équipes concernées par ces études ont besoin de se rapprocher des patients, par l'intermédiaire de collaborations avec des équipes médicales. En effet, les expérimentations incluant des patients engagent des questions d'éthiques spécifiques ; ainsi que des protocoles particuliers d'acquisition, d'exploitation et de conservation des données des patients (RGPD). Cette thématique est aussi abordée plus loin dans la partie du rapport relative à la santé (Partie I. D : santé et vivant).

Dans un tout autre domaine, la bioingénierie s'intéresse aux propriétés mécaniques des matériaux organiques en vue de les utiliser comme *matière première de substitution* (- matériaux et composites biosourcés (bois, fibres naturelles, biopolymères), - biomatériaux pour le bâtiment et les infrastructures), comme *intermédiaires de production* (ingénierie de transformation des algues pour la production de combustibles), ou comme *source d'inspiration* (biomimétisme et mécanique des plantes). Les GDR BOIS et MBS contribuent à structurer la communauté dans ce domaine.

## **f. Mécanique vibratoire et acoustique.**

La mécanique vibratoire concerne : - le *comportement des structures* (sismologie, résonance des infrastructures, vibration des structures dans les transports), - l'*acoustique* (musique et audition, bruit dans les transports et dans la ville), - des technologies de *détection et de diagnostic* (sonar, échographie, imagerie acoustique, contrôle non destructif).

L'atténuation du bruit résulte d'abord du contrôle de la génération des vibrations. Cela passe par une étude et une gestion des modes propres de vibration ; ainsi que par la stimulation de mécanismes de dissipation (absorption d'énergie) ou d'atténuation (réduction du rayonnement des vibrations dans le milieu environnant). Des études portent sur la possibilité d'exploiter des mécanismes dissipatifs pour grappiller de l'énergie à partir de vibrations parasites.

L'élaboration des matériaux pour l'isolation acoustique repose sur la maîtrise de leurs propriétés acoustiques, avec, entre autres, un travail sur leur géométrie interne qui influence la propagation des ondes dans les 3 dimensions sur toute la gamme de fréquences, des infrasons aux ultrasons (matériaux rigides, mous, architecturés, fluides, poreux ...). Une autre approche pour l'isolation acoustique consiste à essayer d'obtenir un amortissement dynamique en mettant en œuvre des contre-mesures (émission d'une onde de même amplitude en opposition de phase). Cette approche requiert une modélisation du comportement de l'onde en temps réel, et le contrôle de la contre-réaction (génération du signal et émission). Les approches passives et actives sont les mêmes à une autre échelle pour protéger les infrastructures des effets des séismes. Les membres du GDR META s'intéressent au contrôle de la propagation des ondes acoustiques dans les méta-matériaux, étude des interactions des ondes avec les interfaces : interférences, diffusion, dissipation. Les membres du GDR MECAWAVE cherchent à exploiter les ondes acoustiques pour étudier la microstructure des solides : contrôle non destructif en temps réel, analyse de méta-matériaux.

Des progrès considérables ont été observés en électroacoustique dans la conception et la réalisation de sources et de détecteurs sonores et ultrasonores. Les traitements de signaux en temps réel permettent d'interpréter ces signaux dans des domaines variés (contrôle non destructif des matériaux, sonars) et les applications médicales sont nombreuses.

Les simulations numériques en mécanique des fluides ont beaucoup progressé, notamment pour décrire plus précisément la propagation des ondes acoustiques et en particulier pour les régimes d'écoulements fluides turbulents (voir Section 10). L'étude de leurs mécanismes de propagation non-linéaires et des couplages associés aux ondes acoustiques est susceptible de fournir des moyens d'atténuer le bruit de pneus sur la route ou de compresseur aéronautiques par exemple; de mieux appréhender la signature acoustique d'objets en mouvement (avions, bateaux); de servir à réduire le bruit de fluides en mouvement à grande vitesse, en produisant des interférences destructives par exemple (gaz à la sortie de la tuyère d'un réacteur, par exemple). Pour toutes ces applications, il est nécessaire de contrôler les interactions fluides/structures, par exemple à travers le contrôle des couches limites (injections localisées, modifications de parois (rugosités, déformations), etc.). Comme en aérodynamique la forte évolution des capteurs/actuateurs ouvre par exemple de nouvelles possibilités pour le contrôle (S10).

## **g. Aspects mécaniques de la robotique et interactions mécaniques homme/machine.**

La mécanique analytique fournit des outils conceptuels pour décrire le fonctionnement des systèmes articulés, pour interpréter les signaux des capteurs, et pour adapter les signaux à appliquer aux actionneurs. La mécanique en robotique permet d'optimiser les mouvements et déplacements des systèmes articulés, ainsi que leurs interactions mécaniques avec le milieu. Il s'agit aussi d'adapter le comportement, de planifier, d'optimiser et de coordonner les mouvements au sein de systèmes robotiques complexes. Il s'agit enfin d'étudier la dynamique des systèmes pour accroître les vitesses d'exécution et améliorer l'efficacité énergétique.

L'amélioration des interactions homme-machine est importante en robotique d'assistance. L'assistance inclut notamment les « cobots » qui interagissent avec les ouvriers en milieu industriel afin de limiter les troubles musculo-squelettiques, les robots chirurgicaux, ou les robots du quotidien (rééducation,

accompagnement de personnes âgées). Les recherches visent respectivement à détecter l'effort mécanique fourni par la machine pour adapter la puissance de sa réponse (faciliter la coopération), évaluer le contact au niveau du robot (frottement et pression) pour améliorer le « retour tactile » de la commande à l'utilisateur (amélioration des actions de préhension), contrôler le partage de l'espace (éviter les collisions).

Les membres du GDR TACT s'intéressent à la perception tactile de l'environnement (frottement, vibration, stimulation psychophysique et interprétation sensorielle) ; ceux du GDR APPAMAT mènent des recherches visant à développer des designs de surfaces, des interfaces tactiles et des dispositifs de retour tactile (robotique).

### **3. Thèmes émergents-Signaux faibles**

#### **a. Ingénierie des structures.**

Aujourd'hui, les outils de simulation mécanique intégrés dans les logiciels de CAO sont performants et ergonomiques. Il reste à mieux anticiper l'émergence d'instabilités mécaniques sous fortes contraintes, par flambage sous contraintes combinées, ainsi que pour des structures aux géométries complexes. Une des difficultés réside dans le fait que l'instabilité apparaît localement et se propage à longue portée. La qualité du changement d'échelle spatiale dans la description est primordiale.

Les progrès dans la modélisation à venir viseront aussi à mieux gérer l'apparition d'instabilités numériques. Il s'agit en particulier de trouver des *indicateurs de qualité et de fiabilité des prédictions* permettant de garantir la robustesse des modélisations, afin d'aboutir à un compromis économique entre le volume de calcul à effectuer et la fiabilité des prédictions.

Par ailleurs, il faudrait réussir à élargir les capacités de modélisation pour prédire la tenue en service des structures (fatigue, tribologie, corrosion) afin de mieux anticiper les effets du vieillissement en service lors de la conception.

Enfin, il faudrait améliorer et standardiser les méthodes d'optimisation topologique des matériaux architecturés par fabrication additive en fonction d'un cahier des charges (gain de poids, rigidité contrôlée, échanges de chaleur, déformations anisotropes, absorption d'énergie lors de la déformation).

#### **b. Ingénierie des matériaux et comportement mécanique.**

En quelques dizaines d'années, la science des matériaux a fait des progrès considérables. Cependant, les tentatives menées en direction des matériaux intermétalliques visant l'allègement et la tenue aux hautes températures n'ont pas donné les résultats escomptés à cause d'une difficulté de mise en forme, et de leur fragilité.

Les mécaniciens et les spécialistes en science des matériaux recherchent actuellement de nouvelles phases intermétalliques ternaires et quaternaires, ainsi que de nouveaux matériaux composites qui les exploitent. Cette démarche combinatoire, qui est bien amorcée, vise à identifier de nouveaux alliages concentrés complexes. Elle s'appuie d'une part, sur des développements expérimentaux rendus possibles par l'accessibilité aux techniques de synthèse d'échantillons et d'analyses automatisées ; ainsi que par la possibilité de caractériser localement des propriétés chimiques et physiques sur des échantillons présentant des gradients de propriétés (gradient de composition et de microstructure, gradient de concentration en défauts, gradient de concentration en impuretés). D'autre part, la démarche combinatoire profite de la disponibilité de moyens de calcul puissants pour faire du « design numérique », c'est-à-dire pour explorer virtuellement les propriétés de structures potentiellement intéressantes à travers des modélisations numériques (calculs ab initio ; simulations thermodynamiques ; simulations de microstructures, de transformation et d'évolution du comportement mécanique). Les membres du GDR HEA (alliages à haute entropie) participent à ce mouvement.

Les Objectifs de Développement Durable (ODD) relatifs au - « *soutien à la réindustrialisation, à l'innovation et au développement des infrastructures* » (ODD9), à - « *la lutte contre le changement climatique* » (ODD13), et à - « *une consommation et une production responsables* » (ODD12) forcent

l'émergence de procédés industriels plus propres et plus économes en énergie et en matières premières. Le PEPR d'accélération concernant la « décarbonation de l'industrie » traduit la volonté politique de soutenir cette mutation. Les chercheurs de l'INSIS y ont un rôle à jouer, à la fois dans le génie des procédés (nouvelles méthodes de production et de transformation), et parce que l'évolution des moyens de production va modifier la nature et les propriétés des matériaux produits (usage de matières premières recyclées, exploitation de nouvelles matières premières). De plus, de nouveaux matériaux seront nécessaires (nouveaux matériaux pour le nucléaire, par exemple). Les moyens du PEPR SPLEEN pourraient aussi être mis à profit à travers des appels à projets spécifiques pour soutenir le développement de matériaux moins impactants sur le plan écologique (ciments, ...).

La volonté de produire de « *l'énergie propre à un coût abordable* » (ODD7), en développant les énergies renouvelables, et en utilisant l'hydrogène comme vecteur de stockage et de transport, devrait pousser à développer des matériaux spécifiques et les procédés adéquats pour les produire. Il s'agit en particulier des matériaux pour la production, le transport et le stockage de l'hydrogène ; matériaux pour le développement des énergies renouvelables. On pense aussi aux matériaux pour les applications photovoltaïques et le solaire thermique ; des isolants thermiques et nouveaux matériaux de construction ; des matériaux et structures pour le grappillage d'énergie ; des matériaux pour la production, le stockage, le transport et la distribution de l'hydrogène. Certains projets du PEPR hydrogène tendent à répondre à ces questions (PROTEC ou CELCER-EHT pour la conception de cellules céramiques pour la production d'hydrogène ou SOLHYD pour le transport hydrogène dans des matériaux solides, etc.).

La volonté de considérer des ODD tels que la réduction de la consommation des matières premières non-renouvelables, de l'énergie, et de la pollution associée aux moyens de production (ODD12), incite à allonger la durée de vie des produits, à faciliter leur réemploi, à favoriser le recyclage des matières premières, et à utiliser des matériaux biosourcés. Cette préoccupation devrait attirer de l'attention sur des processus intervenant dans les opérations de réparation (dépôts, recharge, soudure). Elle devrait aussi accélérer la recherche sur l'analyse du cycle de vie des matériaux, sur la production de matériaux de substitution, le développement de technologies de démantèlement et de recyclage, ainsi que des études sur l'incidence de l'incorporation d'éléments recyclés sur les caractéristiques des produits les intégrant. Les chercheurs de l'INSIS, notamment ceux participant au GDR MBS (Propriétés mécaniques, acoustiques, thermiques, hygrométriques des matériaux biosourcés pour la construction ; innocuité et pérennité), contribueront certainement à poursuivre l'ODD12 ; notamment s'ils peuvent être associés et émarger au PEPR recyclage.

Nous sommes aujourd'hui confrontés à une véritable difficulté pour orienter l'innovation vers plus de sobriété parce que les données manquent pour évaluer l'impact des choix technologiques. Une raison réside dans le fait que les données disponibles pour évaluer le coût environnemental de production des matières, de leur mise en œuvre, du démantèlement, du recyclage et de l'élimination des déchets sont encore parcellaires. D'autre part, les méthodologies pour évaluer l'impact écologique des nouveaux procédés et les orienter vers plus de sobriété sont encore pour une bonne part à imaginer. Il est notamment difficile de prévoir les « effets rebond » (une évolution cause de nouvelles nuisances). ***En fait, il faudrait soutenir significativement cette problématique pour aiguïser une appétence spécifique de la communauté scientifique à son égard.***

En pratique, les lois de comportement doivent être ré-analysées et réinterprétées à chaque émergence d'une nouvelle classe de matériaux, ainsi que chaque fois qu'une nouvelle méthode de production et de mise en œuvre modifie la microstructure d'un matériau. L'automatisation des essais et analyses facilite le travail. La production de nouveaux matériaux et leur nécessaire caractérisation produisent un ensemble conséquent de nouvelles données. Une standardisation des protocoles d'analyse et de diagnostic sera sans doute nécessaire pour faciliter le partage et la consolidation des données, ainsi que la mutualisation et la capitalisation des connaissances. Ce travail sera probablement réalisé sous l'égide du PEPR DIADEM. Il faudrait en tout cas y veiller, avant même d'envisager une exploitation de ces données par une intelligence artificielle.

La volonté de réduire la consommation de matières premières, d'améliorer la performance mécanique des matériaux, d'alléger les structures, et de produire des structures plus fines et plus complexes (matériaux architecturés) contribue à soumettre les matériaux à des niveaux de contrainte importants

en service. Il en résulte un renforcement de l'intérêt des études - d'une part, sur *la tenue en service* des matériaux (durabilité, conditions extrêmes (température, grandes déformations, dynamiques élevées, évolution dynamique des microstructures), fatigue, incidence des défauts et mécanique de la rupture ; tenue à la corrosion, la corrosion sous contrainte et la fatigue-corrosion) ; - d'autre part, sur les *comportements non-linéaires*, l'amorçage des *instabilités mécaniques et l'endommagement* à l'échelle des grains.

### **c. Mécanique des surfaces et interfaces. Surfaces et interfaces pour la mécanique.**

Le domaine de recherche concernant la tribologie et la lubrification connaît un renouveau avec l'introduction des lubrifiants biosourcés, et l'exploitation de couples toujours plus importants dans l'éolien. La relance du nucléaire civil va aussi y contribuer en suscitant de nouveaux besoins en turbines de très haute puissance. Dans un autre domaine, l'usure des prothèses articulées implantées, et la métabolisation des fragments qui en résultent, pourraient faire prochainement l'objet d'une attention renouvelée en tribologie en raison des impacts possibles sur la santé. La biocompatibilité est aussi, pour beaucoup, une propriété de surface des matériaux.

L'amélioration des propriétés mécaniques des matériaux va naturellement conduire à la réduction des épaisseurs des éléments constituant les structures. L'allègement des structures, et l'élaboration de structures architecturées complexes par fabrication additive vont naturellement attirer l'attention sur la tenue en service des surfaces sous contrainte. En effet, les épaisseurs se comparent à celle de quelques grains ou quelques dizaines de grains du matériau. Les études dans ce domaine vont devenir incontournables. Dans ce sillage, *l'élaboration de procédés de finition et de transformation des surfaces en relation avec la tenue mécanique devrait connaître un développement important*. La problématique est à la fois expérimentale et théorique.

### **d. Mécanique des milieux continus généralisée.**

L'approche qui vise le « passage à l'échelle » par des méthodes de réduction des calculs pour passer de la description microscopique du comportement des matériaux à la description du comportement de la structure est confrontée à des questions d'efficacité et de fiabilité. Un des enjeux de cet axe de recherche vise à associer cette démarche de réduction à des tests de faisabilité en termes de robustesse des routines de calcul, et à une évaluation de la fiabilité en termes de représentativité des simplifications.

Une autre difficulté des modélisateurs pour exploiter les puissances de calcul actuellement disponibles se situe dans la capacité à paralléliser les calculs des modèles actuels. Les utilisateurs du calcul à haute performance ont besoin de formations. Le développement de nouvelles méthodes mathématiques sont nécessaires. Les membres du GDR GDM (Géométrie différentielle et mécanique) y contribuent.

Pour les mécaniciens modélisateurs, par définition, les surfaces et interfaces limitent spatialement le volume des matériaux à l'échelle macroscopique et mésoscopique. Sous contrainte, une différence de comportement mécanique à une interface est susceptible de produire des concentrations de contrainte ; voire une décharge d'une partie de la contrainte d'un matériau sur l'autre. Même en l'absence de contraintes externes, un contraste des propriétés est susceptible de produire des contraintes résiduelles. L'endommagement aux interfaces est le plus souvent envisagé sous l'angle d'un glissement ou d'une fracture de l'interface. *Ces problématiques sont bien connues* en situation de fluage et pour les matériaux composites à l'échelle macroscopique.

*Cependant*, les outils de simulation actuels sont incapables de considérer les effets des variations des propriétés mécaniques des matériaux aux surfaces et interfaces à l'échelle de quelques grains. Pourtant, on comprend aisément qu'à l'échelle microscopique, les grains en surface se trouvent dans une situation asymétrique susceptible de modifier leur comportement ; et que les joints de grain en surface sont susceptibles de s'ouvrir plus facilement sous l'effet d'une traction. D'autre part, les contrastes de propriétés ou d'orientation cristallographique aux joints de grain génèrent des champs de contrainte considérables à l'échelle du grain. Ces champs génèrent de grandes densités de défauts. Les défauts sont mobiles sous contrainte ; ils contribuent à la transformation du matériau. Enfin, les modèles actuels

ne gèrent pas les gradients de composition et de microstructures aux interfaces diffuses. **Ce champ d'investigation devrait s'imposer aux modélisateurs dans les prochains temps.**

#### **e. Biomécanique et mécanique pour le vivant. Bioingénierie.**

Ce champ est plus particulièrement traité dans la partie I.D relative à la santé et au vivant.

Pour incorporer dans un organisme des implants, des prothèses ou des éléments palliatifs (stents), il est nécessaire de générer des matériaux dont la neutralité de l'activité physiologique (biocompatibilité, innocuité) est durable, ou dont l'interaction avec les tissus se renforcent dans le temps (accrochage des tissus sur les surfaces microporeuses). Une forte collaboration avec les biologistes de l'INSB et de l'INSERM est nécessaire pour travailler dans cette direction. De même un couplage fort avec l'inclusion de capteurs/émetteurs semble nécessaire et possible pour optimiser les interfaces en termes de comportements mécaniques en présence de ces couplages. Un renforcement des collaborations avec les chercheurs de la section 8 de l'INSIS serait souhaitable pour aller dans cette direction.

#### **f. Mécanique vibratoire et acoustique.**

Actuellement, l'attention se porte sur les « méta-matériaux » qui sont des structures composites dont la composition, la géométrie et la structure contribuent à diffuser, réfléchir ou bloquer la propagation des ondes sonores en utilisant des épaisseurs inférieures à la longueur d'onde. Les outils prédictifs actuels permettent en principe l'optimisation de ces dispositifs, qui mettent en œuvre des distributions et formes d'inclusions de plus en plus complexes, mais leur mise en œuvre pratique nécessite généralement une approche mixte (homogénéisation de la structure interne par couche ou par zone, puis optimisation sur les couches ou zones homogénéisées). Cependant, des progrès restent nécessaires pour améliorer les performances des modèles actuels.

D'autre part, la réalisation pratique des méta-matériaux reste un défi industriel en termes de fabrication et de compatibilité avec un cahier des charges plus global (coût de production, mise en œuvre et intégration, résistance à l'environnement, ...). Actuellement, une attention particulière est portée à l'élaboration de matériaux à faible impact environnemental. Pour toutes ces raisons, un rapprochement entre les chercheurs et les industriels aurait besoin d'être stimulé dans ce domaine.

Il serait utile de faire un effort pour élargir le domaine des ultrasons de façon à pouvoir accéder à l'étude des matériaux à l'échelle microscopique. Des recherches restent encore nécessaires pour comprendre et interpréter la propagation des ondes dans les matériaux complexes (vivant et matériaux architecturés), pour modéliser et contrôler les fronts d'ondes ... A partir de progrès dans ce domaine, les ondes sonores pourraient aussi devenir un bel outil thérapeutique (ondes de choc de puissance pour désagréger les calculs).

Des recherches en acoustique restent nécessaires dans le domaine des fréquences audibles parce que les vibrations et les bruits sont souvent associés à des nuisances (dissipation d'énergie, dégradation de la qualité de vie). La ville de demain tirerait profit des recherches en acoustique en travaillant sur la qualité des ambiances sonores (optimisation des plans de circulation, localisation, identification et caractérisation des sources sonores, caractérisation de la biodiversité, etc.). La perception sonore est déjà fortement étudiée dans le domaine musical et dans les applications industrielles (diagnostic de maintenance, conditions de travail, atténuation des bruits dans les transports, par exemple), mais les collaborations entre chercheurs de l'INSIS et d'autres instituts doivent être renforcées afin de mieux comprendre quelles sont les conséquences, à la fois positives et négatives, des ambiances sonores sur la qualité de vie et la santé des êtres humains.

Une onde sonore résulte d'une vibration d'un milieu matériel. Le déplacement du milieu et la propagation de l'onde sont donc couplés. Des phénomènes non-linéaires particuliers résultant de la combinaison de l'onde avec le déplacement du milieu sont susceptibles de se produire lorsque l'onde acoustique interagit ou est guidée par un fluide présentant un écoulement turbulent. Il est difficile de dire précisément la portée que pourraient avoir des recherches dans ce domaine ; mais il est permis de penser que des retombées pourraient être possible en aéronautique, dans le transport maritime.

## **4. Influence de l'IA et de la FA sur les thématiques de recherche de la section 9**

### **a. Ingénierie des structures.**

Aujourd'hui, les outils de simulation intégrés dans les logiciels de Conception mécanique Assistée par Ordinateur (CAO) sont performants et ergonomiques. La fabrication additive permet de proposer des structures originales à l'échelle macroscopique et à l'échelle mésoscopique (matériaux architecturés). L'intelligence artificielle pourrait venir en complément des procédures d'optimisation topologique dans la conception de nouvelles géométries pour ces structures.

### **b. Ingénierie des matériaux et comportement mécanique.**

L'utilisation de l'intelligence artificielle se conçoit bien en chimie de synthèse ou en génie des procédés parce qu'il s'agit de trouver un enchaînement optimal d'opérations connues et documentées en vue d'un objectif fixé. La communauté de l'INSIS s'est d'ores et déjà accaparée de l'intelligence artificielle pour explorer une approche combinatoire des concepts et des connaissances actuelles dans le domaine des matériaux. Il s'agit par exemple d'imaginer des matériaux composites originaux, ou encore pour combiner judicieusement les étapes de transformation et de traitement. La démarche est au centre du projet du PEPR DIADEM. Les enjeux importants se situeront - dans la définition d'un formalisme permettant à une intelligence artificielle d'appréhender les concepts et les connaissances disponibles ; - dans notre capacité à exercer une analyse critique de la qualité des solutions envisagées ; et enfin, - dans la faisabilité de tester à grande échelle les hypothèses proposées (recherche combinatoire).

La fabrication additive pose de nouveaux problèmes et ouvre de nouveaux horizons pour la science des matériaux. De toute évidence, il ne suffit pas de déposer un matériau par fabrication additive pour obtenir les propriétés mécaniques ou multiphysiques souhaitées (cf. § II.D.3 et II.D.4). Les compositions et microstructures des matériaux produits en volume sont le fruit d'une longue optimisation. La fabrication additive ne permet pas de reproduire les chemins thermomécaniques optimaux pour ces compositions. De plus, la réalisation de pièces par fabrication additive génère des défauts, des hétérogénéités et une anisotropie, spécifiques. En fait, il va s'agir de trouver de nouvelles voies pour optimiser les performances mécaniques des pièces produites par fabrication additive. Le mélange de céramiques dans les métaux, et/ou de métaux ou de céramiques dans les polymères pourraient être facilités dans les précurseurs de composites pour la fabrication additive. D'autres mécanismes de durcissement pourraient être activés dans les matériaux déposés par fabrication additive (précipités préformés, inoculant accélérant la germination). Les recherches dans cette direction conduiront à développer de nouvelles nuances de matériaux, spécifiques pour la fabrication additive. Il est probable aussi que se développe une « ingénierie des défauts » visant à améliorer la tenue à l'écrouissage (durcissement).

Il reste encore un long chemin à parcourir pour concevoir et établir les méthodes de post-traitement et de finition afin d'optimiser les propriétés mécaniques des matériaux et des surfaces.

### **c. Mécanique des milieux continus généralisée.**

L'intelligence artificielle pourrait faciliter le couplage multiéchelle dans la description du comportement local d'un matériau microstructuré et anisotrope. L'IA pourrait offrir un substitut au passage à l'échelle par homogénéisation quand la microstructure varie fortement à travers la structure. Il s'agirait de lui demander de relier les paramètres d'une loi de comportement phénoménologique à une microstructure locale par un apprentissage à partir des modèles microscopiques.

Les dépôts couche par couche de la FA influencent la microstructure (structure lamellaire et anisotrope). Un champ d'investigation s'ouvre, à la fois expérimental, pour analyser les microstructures produites par FA en fonction des paramètres de fabrication ; et théorique, pour prédire les microstructures (germination et croissance des grains), et relier ces microstructures obtenues aux propriétés mécaniques réelles des matériaux (résistance mécanique et anisotropie). Une telle approche apparaît comme une alternative à la réduction des modèles évoquée aux paragraphes I.B.2.d et I.B.3.d.

Aujourd'hui, les routines d'optimisation topologique utilisées pour le design des pièces produites par fabrication additive supposent que le matériau produit par FA a les mêmes caractéristiques mécaniques que le matériau volumique. En fait, ***il va rapidement devenir incontournable*** d'intégrer dans la base de connaissance des routines d'optimisation topologique : d'une part, une modélisation de la microstructure réelle et de son comportement mécanique (microstructure, anisotropie, présence des surfaces et interfaces) ; et d'autre part, les effets des post-traitements sur le comportement mécanique des matériaux.

#### **d. Biomécanique et mécanique pour le vivant. Bioingénierie.**

L'impression de matériaux architecturés par fabrication additive est envisagée pour produire des prothèses. La démarche offrirait l'opportunité d'une fabrication sur mesure susceptible de faciliter l'insertion dans l'organisme et l'accrochage. Les matériaux architecturés permettraient aussi d'adapter l'élasticité de la structure alvéolaire à celle des os. Enfin, leur structure alvéolaire favoriserait l'accrochage des tissus sur la prothèse. La section 9 poursuit des recherches dans ce domaine (GDR REPAIR).

Ce point est plus particulièrement traité dans la partie I.D. Santé et vivant. Néanmoins on pourra noter que la FA nécessite d'être soutenue dans ce domaine en particulier pour la production de tissus biologiques (plateforme 3DFab à Lyon, etc.), de fantômes d'organes ou de systèmes artéro-veineux pouvant servir à des fins de tests opératoires, de dépôts d'outils de substitution, etc. L'IA pourra se servir de façons non restrictives, pour l'aide aux cliniciens, de la mise en place des banques de données à partir des expérimentations sur les bancs de la communauté (tests d'implants dentaires, de stents aux matériaux spécifiques, etc.)

#### **e. Mécanique vibratoire et acoustique.**

En acoustique, l'intelligence artificielle pourrait être exploitée pour orienter la conception de méta-matériaux, en aidant à la convergence des routines d'optimisation topologique. Elle pourrait éventuellement aussi être utilisée en amortissement dynamique afin contrôler les contre-mesures aux bruits en anticipant la réaction aux bruits habituels ou pour les phénomènes récurrents.

L'intelligence artificielle constitue déjà un outil d'interprétation pour l'imagerie médicale, pour la reconnaissance vocale et la commande vocale ainsi que pour l'identification des sources sonores. Des exemples d'utilisation existent pour la sécurité en ville (identification des véhicules à deux roues pour mesurer leur vitesse et niveau sonore) ou pour la caractérisation de la biodiversité (ODD3 : « *bonne santé et bien-être* » ; ODD11 : « *villes et communautés durables* »). ***Les collectes de données nécessaires aux apprentissages en intelligence artificielle, surtout lorsqu'il s'agit de mieux comprendre les conséquences du bruit sur la qualité de vie et la santé des habitants, imposerait de travailler avec d'autres instituts, en particulier sur les implications éthiques de ces technologies*** (acquisition, exploitation, conservation des données (RGPD) ; confidentialité et atteintes à la vie privée / risques liés à la sécurité).



## B. Section 10 (S10)

### 1. Introduction

La S10 est à la croisée des chemins entre fondamental et applications et est très souvent porteuse d'interdisciplinarité. On se référera au rapport de conjoncture pour le bilan quantitatif des communautés. Nombre de ses thématiques sont à l'interface d'autres sections voire d'instituts du CNRS mais sont aussi présentes dans d'autres organismes (INRIA, INRAE, INSERM, CEA etc.). Les thématiques aux interfaces même celles à faible nombre de chercheurs nécessitent d'être maintenues et soutenues. La science est souvent parcourue par des cycles relativement aux outils d'analyse disponibles, à l'engouement des jeunes générations (mode), au rapport à ou au soutien par la société. Cela est d'autant plus important que la S10 porte à la fois l'étude de la mécanique des fluides, la thermique, la combustion, le génie des procédés (bioprocédés) et les plasmas, dans leurs contextes naturel ou applicatif, que l'on retrouve dans une majorité de problématiques des sciences de l'ingénieur, incluant synergies entre mécanique, physique, chimie, biologie et sciences de l'Univers.

### 2. Evolutions-Orientations

#### a. Mécanique des fluides

La communauté en mécanique des fluides (MF) maintient une recherche fondamentale de pointe sur des problématiques élémentaires (écoulements à fluides complexes, stratifiés, compressibles, chauffés, poreux, hors gravité, ioniques, en situation extrême, etc.). Sa diversité peut rendre en son sein difficile la communication des savoirs et des savoirs faire. Elle traite tout type de régimes avec ou sans mélange de phases, en conditions thermodynamiques extrêmes, etc. La communauté s'est toujours impliquée dans le traitement des grands enjeux sociétaux que sont l'énergie (hydrogène, ITER, etc.), les transports (aérodynamique, etc.), la santé (écoulements physiologiques, lab on chip, etc.), le climat (océan/atmosphère), les risques (feux, réchauffement climatique, etc.). Elle adapte ou développe des outils spécifiques d'analyse, dont la mise au point est souvent l'occasion de collaborations avec d'autres disciplines (méthodes numériques, optique, etc.). Les outils de mesure utilisés sont en constante évolution bénéficiant de celle d'autres domaines (lasers, électronique de vision, etc.). La résolution numérique complète des équations qui régissent une grande partie des écoulements étudiés est complexe (grand nombre d'échelles (spatiales et temporelles) à résoudre, durée d'établissement des écoulements (a fortiori si instationnaires), etc.) conduisant au développement de modèles ou à des DNS (Direct Numerical Simulation) toujours plus sophistiqués, ces dernières portées par les plus gros calculateurs (Jean Zay). **Toutefois la résolution à toutes les échelles pertinentes reste un enjeu fort.** En réponse à ces défis, la communauté explore diverses approches, telles que les DNS Eulérienne de Navier-Stokes, la LBM (Lattice Boltzmann Methods), la SPH (Smooth Particle Hydrodynamic), etc. De nouveaux outils expérimentaux sont revisités ou deviennent matures permettant l'accès à des informations (Lagrangien, milieux non transparents, etc.) jusque-là difficiles à atteindre (PTV (Particle Tracking Velocimetry), Rayon X, etc.). **Un défi reste la mise au point de modèles ou de méthodes de mesure pour l'analyse de problèmes couplés fluide/particule, fluide/paroi (rugosité en particulier), fluide/conformation polymère, fluide/transport multiespèces, etc.**

Des fluides (et matériaux) toujours plus complexes (polymères, bio fluides, fluides chargés, etc.) voient le jour laissant émerger de nouveaux vecteurs de recherche : l'impact de forces supplémentaires dans le fluide ou aux parois (voire déformations) sur la dynamique des écoulements nécessite de revisiter, de recontextualiser les modèles. Cela nécessite au préalable une caractérisation des fluides chargés (rhéométrie spécifique, etc.) **rendant nécessaire de repenser l'accès à ces moyens pour la communauté.** Plusieurs difficultés intrinsèques freinent les analyses scientifiques dans ces domaines que ce soit la non-transparence (optique pour la résolution expérimentale) ou leur comportement aux échelles moléculaires (échanges ioniques, hétérogénéité de constitution, etc.) ou au-delà de la particule fluide (non Newtonien). **Un défi reste l'élaboration de modèles couplant le comportement des écoulements aux différentes échelles caractéristiques pour ces nouveaux fluides.** De plus ces nouveaux fluides nécessitent de considérer leur recyclage qu'il n'est pas toujours simple de mettre en œuvre. **Pour les chercheurs qui travaillent expérimentalement avec ces fluides, il est important qu'ils aient accès à une chaîne de maîtrise achat/caractérisation/recyclage bien identifiée.**

Les évolutions technologiques permettent de générer des écoulements en conditions thermodynamiques extrêmes (en température ou pression) de façon plus accessible. **L'Institut pourrait**

soulever la question de leur potentiel, tant en termes de connaissance (de la physique des écoulements) qu'en termes d'applications (génie des procédés, univers, etc.). Des PEPS exploratoires pourraient être positionnés sur ces sujets dans un premier temps avec pour objectif une inspection systématique de certaines problématiques comme le mélange, la turbulence, etc. A minima cela ouvre des capacités nouvelles d'analyse pour les écoulements en conditions superfluide et/ou supercritique par exemple. Outre la recherche liée aux effets quantiques (zéro viscosité, mélange de phase), moult impacts sur le mélange ou les changements de phase pourraient être intéressants d'étudier de façon plus intense. Il en est de même pour les écoulements sans gravité qui bénéficient en particulier des moyens mis en place par le CNES. La partie de la communauté qui étudie ces derniers écoulements s'est regroupée au sein du GDR MFA mais reste peu dense.

L'étude des milieux chargés nécessite encore d'importants progrès **pour mieux prédire le comportement individuel et collectif des particules solides** en transport liquide ou éolien. L'interaction des particules solides avec les milieux environnants (arbres, parois, etc...) est un sujet primordial pour des problématiques naturelles (nourrissement des planctons, cendres volcaniques, pollutions etc.) et/ou industrielles (usure de garnitures, encrassements, dépôts solides hydrauliques, etc.). **Un autre défi est relatif à l'étude des interactions liquide/gaz lors du transport** des bulles ou des gouttes au-delà des dernières avancées sur la compréhension de leur génération (instabilités, spray, etc.) et de leur évolution (coalescence, fragmentation). Des études sont aussi nécessaires pour leur contrôle optimal en contexte (dispersion de gouttes pour risque incendie, etc.) de transferts (chaleur, masse). Les connaissances recueillies sont capitalisables en génie des procédés (bioprocédés), en aéronautique (machines tournantes) ou en hydraulique (turbine électrique). Néanmoins **le passage de connaissances entre les communautés au sein de la MF reste à améliorer et devrait être accéléré au-delà de la diffusion au sein des grands laboratoires ou GDR.** La recherche liée aux écoulements diphasiques, et aux interfaces qui en découlent (GDRs Transinter (liquide/gaz) et MePhys (solide voire fluide/solide)) développe une métrologie (visualisation rapide, X, imagerie ultrasonore 3D, etc.) ainsi que des techniques numériques de pointe qui ouvrent de nouvelles perspectives. Les avancées dans le domaine des changements de phase, comme en cavitation, sont plus complexes car elles mettent souvent en jeu un couplage de la dynamique avec des conditions thermodynamiques locales variables. **Un enjeu fort est l'obtention de corrélations des informations de phases résolues temporellement et spatialement.**

La présence de paroi(s) est un problème intrinsèque pour lequel la transition vers la turbulence, les frottements aérodynamiques, les pertes de charge sont toujours d'actualité. Une partie de la communauté (anciennement GDR CODE) met en œuvre des stratégies de contrôle pour les comprendre ou les contrôler. **Un enjeu persiste sur la compréhension fondamentale des influences des rugosités, tiges et autres objets flexibles (élastiques ou non) en paroi.** L'étude de leur impact collectif sur un écoulement, peut aussi servir pour l'aménagement urbain l'optimisation des rendements des parcs hydroliens et éoliens, etc. Un nouveau vecteur est lié aux **nouveaux matériaux (à mémoire de forme, fonctionnalisés, etc.). Le suivi temps réel via un couplage expérimental/numérique est toujours une piste pour le contrôle actif.** Des développements importants pourraient avoir lieu si la communauté s'empare des technologies liées aux utilisations de capteurs/actuateurs (c/a), comme cela est réalisé par la communauté en GP (mélange en batch). **L'institut pourrait amener ces communautés à confronter leurs approches, et leurs outils.** L'IA pourraient conjointement apporter des solutions via les données récoltées par ces utilisations c/a. **Un lien avec le GDR MACS de l'INS2I pourrait être envisagé, pour partager sa vision des outils numériques et d'analyses nécessaires à la modélisation des processus et systèmes dynamiques et pour la mise en place de bases de données ad hoc.**

Les écoulements compressibles (même faiblement) font aussi partie des domaines fondamentaux forts de la MF (applications à l'aéronautique), avec ces dernières années des progrès importants sur les couplages aéroélastiques (instabilités pour la prédiction des casses de pales, etc.) ou aéroacoustiques (nuisances sonores). **Du point de vue fondamental de gros progrès restent à faire pour la compréhension des instabilités générées en cas de couplages fluide/structure à haut régime.** Les enjeux en termes de gain énergétique, sécurité et nuisance sonore sont importants et donnent lieu à des collaborations étroites avec l'industrie du transport en général. Les solutions apportées dans ces domaines **pourraient trouver des extensions d'application dans l'aérialique (aération, éolienne, ...) pour lesquels sont aussi étudiées des instabilités de couplages fluide/structure.**

La communauté porte un intérêt toujours plus important aux écoulements atmosphériques et marins pour mieux comprendre l'évolution du climat et des risques climatiques (feux, érosion côtière, modification des courants, etc.). **Un défi est la meilleure compréhension des couplages physiques de base** (turbulence/stratifié, turbulence/rotation, etc.) et connexes (turbulence/captation océanique du

CO<sub>2</sub>, turbulence/transport de solides (suies des feux, envol particulaire des zones désertiques, etc.)). **Les outils d'analyses restent comparables à ceux pour d'autres situations d'origine purement anthropique (pollution atmosphérique, etc.). Le changement climatique (CC) apporte une urgence supplémentaire à la compréhension de ces phénomènes** (tempêtes, événements rares, feux de forêt, etc.). Une partie de la communauté est regroupée dans le cadre du réseau Feu (SFT) **mais il est symptomatique qu'aucun GDR ne se soit positionné sur les domaines plus généraux de l'environnement atmosphérique** comme cela a pu avoir lieu par le passé (GDR sub-meso avec l'INSU et l'INC) alors que c'est le cas pour l'Océan avec les GDR OMER ou EOL-EMR. Par ailleurs les PEPR One Water pour l'impact de l'hydrologie (fleuves, inondations, etc.) et IRIMa pour l'impact des risques et Ville Durable sont très spécifiques réduisant l'impact sur la recherche fondamentale. **Il serait intéressant de pousser à la création d'un GDR orienté vers les impacts atmosphériques et un second sur les impacts hydrologiques du CC (pollution (automobile, pollens, etc.), rafraîchissement des villes, risques industriels (explosions, dispersion de polluants (gaz, plastiques, poussières, etc.), modification hydrologique, inondations etc.) en association avec l'INSU (LISA, désertification, appauvrissement des sols, etc.), l'INEE (modification des faunes et flores et impact aérien, thermique et/ou hydrologiques), l'INRAE (hydrologie, inondations), l'INC (IRCE, chimie atmosphérique) et l'INP. Comme pour le GDR OMER, les SHS devraient y être associées** (pour les villes pour lesquelles existent des UMR dédiées en SHS par exemple (EVS, 5600 à Lyon)). C'est d'autant plus nécessaire que certains laboratoires de l'INSIS sont munis d'installations (souffleries atmosphériques, canaux) ad hoc que ne possèdent pas les autres instituts.

## **b. Thermique/énergétique**

Les études en thermique et énergétique sont souvent étroitement liées et se retrouvent à toutes les échelles des systèmes (nano/micro-thermique jusqu'aux problèmes atmosphériques, océaniques ou stellaires). Elles sont souvent confrontées à la problématique du transfert aux interfaces nécessitant d'étudier les interfaces fluide/solide ou diphasique (souvent en présence de changement de phase) via des couplages (convecto/radiatifs, conducto/radiatifs, etc.). Aux petites échelles les micro/nanotechnologies permettent d'élaborer des matériaux ou/et des systèmes (micro, nano) structurés pour les écoulements ou dans un contexte fluide pour l'optimisation des transferts. Le domaine est bien couvert par les GDRs NAME et MNF entre autres. Dans un temps fort de l'évolution technologique, la recherche fondamentale à ces échelles porte souvent sur l'étude des lois physiques et des approches métrologiques qu'il s'agit de recontextualiser. Les équipes du domaine développent par exemple la microscopie thermique à sonde locale (SThM), les méthodes électrothermiques à sondes déposées, etc. On peut trouver leur origine dans l'étude des problématiques de conversion d'énergie thermo-photovoltaïque ou/et thermo-électrique. Au niveau des fluides existent de forts développements métrologiques (visualisation laser par fluorescence, etc.), dont une grosse part est dédiée à la caractérisation des transferts de chaleur, de la rhéologie sous contrainte thermique, etc. On distingue par ailleurs les transferts au sein des fluides Newtoniens et ceux au sein des fluides complexes (non Newtoniens, chargés, etc.) du fait d'interactions supplémentaires. Aux échelles millimétriques, les méthodes de génération numérique d'architectures 3D couplées à la fabrication additive de pièces céramiques (développées à l'INC) ouvrent de nouvelles perspectives pour étudier les transferts thermiques couplés à hautes températures (800-1600°C). En effet les nouvelles géométries proposées échappent aux règles classiques de l'homogénéisation faisant que les transferts radiatifs doivent être traités localement au sein des images 3D ou via le nouveau cadre théorique de l'équation généralisée du transfert radiatif. Cela aboutit à l'émergence de nouvelles méthodologies numériques basées sur la parallélisation massive pour transporter l'énergie radiative dans des images giga-voxélisées. Ces questions sont discutées dans le GDR TAMARYS.

En dehors des études sur la physique fondamentale, bon nombre d'études sur des systèmes énergétiques (piles à combustible (hydrogène, réacteurs électrochimiques, etc.) s'attachent à l'optimisation des performances et à la fiabilité de ces systèmes. Cela passe par l'étude des phénomènes de transferts de chaleur ou/et de masse se produisant au sein de ces systèmes et dont la maîtrise reste soumise à des verrous technologiques, ces systèmes opérant par exemple à très basses ou très hautes températures. La communauté contribue ainsi aux nouvelles ressources énergétiques via une recherche sur leur transport multiforme (transport direct d'électricité et transfert de chaleur associé (câbles pour hydrolienne, etc.), pour leur stockage (pile à combustible basse ou haute température, supercondensateur, batteries, etc.)). Certaines équipes étudient la problématique de l'intégration à des systèmes complexes comme les bâtiments ou les transports. Un gros vecteur est l'hétérogénéité et l'intermittence de production. La communauté intensifie ses recherches sur la

conception et l'optimisation de systèmes de conversion et de stockage basés sur la thermodynamique liée aux transferts de chaleur et de matière et aux cinétiques chimiques. Une partie de la communauté s'attache aussi à des recherches sur des carburants durables et verts via l'énergie solaire pour la production de gaz de synthèse ou d'hydrogène à partir de l'eau et du CO<sub>2</sub> ou de molécules carbonées (biomasse, matières plastiques, charbon, déchets ménagers, etc.) via une chimie haute température obtenue par concentration du rayonnement solaire. L'apport d'énergie solaire permet d'explorer la dissociation thermo-chimique de l'eau pour l'hydrogène ou la métallurgie solaire. De façon plus générale l'énergie solaire propose des solutions durables qui mettent en jeu les transferts thermiques (ou/et de matière) pour le dessalement ou/et la décontamination des eaux. Une grosse part d'interdisciplinarité est nécessaire (INSB, INC, etc.) ainsi que des connaissances liées au génie des procédés et aux matériaux (par photo-oxydation, photocatalyse, etc.). La communauté qui travaille à son développement s'appuie sur des centrales solaires photovoltaïques et thermodynamiques couplées à des outils numériques et expérimentaux pour l'optimisation et le pilotage de leurs différentes composantes, en vue de la production et de la distribution d'énergie injectée dans le réseau électrique national. Cela nécessite en particulier, le développement de capteurs de contrôle, des recherches spécifiques liées à l'intensification des transferts mais aussi à la caractérisation des différents états du système fluide sous contraintes des gammes de températures atteintes (jusqu'à 3500°C). Cela conduit à des études fondamentales sur des systèmes multiphasiques thermodynamiques complexes et nécessite aussi des caractérisations plus poussées des matériaux soumis à ces hautes températures. L'utilisation de fours à lampe de Xénon dans certains laboratoires pourraient permettre des études en continu pour simuler certains effets solaires. **Parmi les principaux acteurs et moyen unique du domaine du solaire concentré, les installations du centre d'Odeillo nécessitent une attention importante en termes de moyens et de chercheurs.** Une partie de la communauté thermique s'intéresse à la physique condensée, et plus particulièrement aux propriétés thermo-radiatives voire électriques, mécaniques ou optiques de ces milieux pour la caractérisation des matériaux (céramiques, etc.) soumis à des contraintes de température élevées via les fours solaires. Une autre partie de la communauté s'intéresse aux actuateurs thermosensibles qui ont l'avantage de ne pas nécessiter d'énergie pour l'activation. Tous les pans de l'industrie aéronautique, spatiale (protection extérieure des mobiles de transport) et énergétique (cellules photovoltaïques sous contraintes de concentration (CPV), capteurs en cas d'incident nucléaire, etc.) bénéficient des retombées de cette recherche fondamentale. Notons que l'approche solaire concentrée permet l'étude de matériaux semi-conducteurs pour le photovoltaïque mais aussi la catalyse haute température. **Certains de ces domaines méritent une attention soutenue (étude des matériaux à changement de phase, supraconducteurs, superfluides, etc.) même s'ils sont pénalisés par des conditions de mise en œuvre (contrôle en température et de sécurité) exigeantes.** Une partie de la communauté s'intéresse aux matériaux nanostructurés et/ou composites (GDR NAME et TAMARYS) en étudiant en particulier les propriétés propres et collectives tant par voie théorique, numérique qu'expérimentale. Elle s'attache à la caractérisation et la prédiction de leur comportement. Il existe un engouement particulier pour les processus de génération de matériaux à l'aide de fluides supercritiques (matériaux nanostructurés) donnant accès à des propriétés de transferts, différentes (vitesse en général accrue, catalyse modifiée, etc.). La partie réfrigération est une partie de la recherche plus liée aux matériaux (ELyTMaX, ENSCM, etc.) même si présente à l'interface avec le GP et la MF (fusion de la glace au LadHyX, LEMTA, etc.) et trouve peu de place au sein des structures de l'INSIS (GDR Transinter, GEPEA, Oniris). Les activités pour la santé seront traitées dans la partie Santé/Vivant (échauffements magnétiques induits localement (hyperthermie magnétique) pour des traitements du cancer, etc.). Certaines mettent en jeu des phénomènes aux échelles nanométriques remettant en cause les propriétés liées aux transferts et à la conversion en énergie.

### c. Combustion

En 2050, le mix énergétique français sera fortement électrifié (+ 35% par rapport à 2020). L'électricité sera notamment produite à partir de ressources renouvelables décarbonées, intermittentes et délocalisées (éolien, solaire photovoltaïque). Une partie de cette énergie sera utilisée pour le stockage chimique d'énergie (ammoniac, LOHC) ou pour la production de produits chimiques (carburant synthétique, méthanol) à destination de l'industrie via la production d'hydrogène vert par électrolyse de l'eau. Cette filière « Power-to-Chemicals » devra être constituée de procédés capables de subir le caractère transitoire des flux entrants avec une capacité de production plus faible, étant donné le caractère intermittent et délocalisé de l'énergie renouvelable.

La combustion qui est la conversion chimique de l'énergie est impliquée dans une grande diversité de procédés et d'applications et s'appuie sur une démarche pluridisciplinaire incluant mécanique, thermique, chimie.

Les enjeux de ce domaine sont la décarbonisation (ou décarbonation), qu'elle concerne les industries, le transport ou la génération de chaleur mais doit prendre en compte la réduction des émissions qu'elles soient sous forme de gaz GHG (gaz à effet de serre), de molécules toxiques ou particulaires (suies). Les questions d'accidents et de sécurité sont aussi un des enjeux majeurs des recherches en combustion.

La combustion agrège une grande diversité de domaines de recherche qui sont développés à la fois à l'aide de dispositifs expérimentaux équipés de diagnostics de grande précision et d'outils numériques de simulation. Les objets d'étude sont larges peuvent être déclinés selon 3 axes : i) cinétique chimique, développement de modèles détaillés et réduits, mélanges de carburants où l'accès aux données expérimentales sont indispensables à la validation de modèles voire à leur exploitation via l'intelligence artificielle ; ii) structure de flammes qu'elles soient laminaires ou turbulentes avec mesures de vitesse de flamme couplées aux caractéristiques des émissions, suies et particules d'imbrulés associées aux études sur la pollution atmosphérique, iii) stabilité et sécurité incluant explosion-détonation, incendies (feux de forêts et accidents). Ces thèmes sont étudiés à la fois à l'échelle laboratoire et dans le cadre de systèmes réels de combustion incluant les injecteurs, les chambres de combustion, moteurs, turbines et propulseurs. Une partie de ces défis est couverte par le « RésoFeux » de la Société Française de Thermique.

La communauté des chercheurs est organisée autour du Groupe français de combustion. Elle est particulièrement réduite et concentrée sur quelques laboratoires bien reconnus au niveau international mais bénéficie de l'activité de recherche des organismes comme l'IFPEN, l'IRSN ou l'ex-IFSTAR et travaille en collaboration étroite avec les industriels du secteur comme les motoristes, ou dans le domaine de l'aéronautique.

L'impact environnemental constitue le fil directeur des travaux de recherche en combustion que ce soit par la réduction des carburants fossiles, la diminution des GES, l'adaptation au changement climatique et la prévention des risques naturels ou technologiques, la transition vers une économie circulaire, la gestion et la valorisation des déchets et la lutte contre les pollutions.

Les travaux en combustion sont pluridisciplinaires et s'appuient sur les collaborations au sein de l'institut comme à l'extérieur et les avancées sont souvent liées aux interactions avec les spécialistes de la mécanique des fluides, la thermique, les plasmas ou les procédés, tout en bénéficiant aussi des avancées dans le développement de capteurs intelligents en situation extrême.

#### **d. Génie des procédés**

La communauté scientifique du Génie des Procédés (GP) est en grande partie structurée au sein d'une dizaine de GDR, 11 Fédérations et la Société Française de GP qui, à travers ses nombreux groupes de travail thématiques, est un lieu d'échange avec les acteurs privés des secteurs applicatifs. Les travaux et perspectives révèlent un positionnement fort sur l'industrie du futur à faible impact environnemental et la transition vers une économie circulaire et la bioéconomie. Ils associent l'écologie industrielle, la production et le stockage de l'énergie, la capture, l'utilisation et le stockage du CO<sub>2</sub>, la valorisation de biomasses, l'intensification des procédés et bio procédés, l'automatisation, le contrôle et la conduite des procédés couplés au développement de nouveaux capteurs intelligents.

Les besoins en expérimentation sont importants et le resteront pour satisfaire les exigences d'exploration sur des échelles de temps et d'espace très variables, requérant une grande diversité d'équipements lourds, mi lourds mais également des technologies à très hauts débits développées aux échelles microscopiques (micro- bio- réacteurs, capteurs...). Cette expérimentation est très fortement associée à des travaux numériques de modélisation des processus aux différentes échelles et de calculs intensifs pour exploiter les données massives obtenues afin d'améliorer la connaissance, soutenir des développements en conception, aide à la décision, simulation de mécanisme, contrôle de procédés et analyse systémique.

**Un atout majeur du GP est sa capacité à associer recherche fondamentale et appliquée en partenariat avec de nombreux industriels.**

La communauté du GP et bio procédés est fortement impliquée dans le défi à relever d'une transition vers une économie biosourcée pour réussir la conversion de ressources renouvelables en molécules à forts potentiels applicatifs (vecteurs énergétiques à très hautes performances dont H<sub>2</sub>, biopolymères, bio-structurants, hydrogels, filmogènes, émulsifiants, compléments alimentaires, pharmaceutiques,...) ; ce défi exige une démarche systémique où la multidisciplinarité et l'interdisciplinarité prennent toute leur importance.

L'enjeu majeur pour la production de ces molécules est de mettre en synergie les propriétés d'usage, la maîtrise des interactions indésirables mais également la viabilité économique et environnementale.

Le choix des bioressources est capital. L'identification, la sélection, la disponibilité et la pérennité des bioressources sont les facteurs essentiels pour ce choix qui s'adosse par ailleurs à une réflexion territoriale. Le caractère hétérogène (composition, état solide, liquide ou gazeux, forme, granulométrie) de ces bioressources est aussi à l'origine de défis majeurs dans la préparation de ces matières premières comme étape initiale de la chaîne de valorisation : il s'agit de rendre compatible ces ressources avec les processus de conversion établis. Elle nécessite la compréhension et la maîtrise des mécanismes et phénomènes fondamentaux pour contrôler les rendements de la filière en limitant l'apparition de molécules inhibitrices ou contaminantes vis-à-vis des processus aval.

La diversité naturelle des catalyseurs biologiques et chimiques et les capacités actuelles d'ingénierie à très haut débit constituent de vastes domaines d'explorations scientifiques et technologiques. Des sauts technologiques et de récentes avancées scientifiques permettent désormais l'élaboration de catalyseurs (nano et micro) très performants en termes de rendement, avec une diversité étendue des substrats qu'ils sont capables de convertir, élargissant ainsi le panel des molécules produites. En parallèle, il est nécessaire de progresser dans le développement de ces catalyseurs non seulement du point de vue de leur activité, cinétique et rendement mais également de leur robustesse et de leur stabilité. Pour les biocatalyseurs (enzymes, microorganismes), la biologie de synthèse et des systèmes ouvre de nouvelles possibilités. Pour les catalyseurs chimiques, les enjeux résident dans l'utilisation de catalyseurs sans métaux rares et l'optimisation des performances et usages de nano catalyseurs tout en considérant leur recyclage.

Dans la chaîne de conversion, au-delà du réacteur, les étapes de séparation et purification des molécules produites, nécessitent des innovations importantes incluant des besoins en métrologie et mesures. Ces étapes impactent en effet les performances économiques et environnementales des filières, avec une contribution sur le coût total de production qui peut atteindre 50 %. Les défis actuels concernent l'exploration de couplages de procédés intensifs avec des configurations innovantes, économes en énergie et en eau et utilisant des solvants verts ou biosourcés.

De façon transversale, l'IA est explorée pour ses apports dans la compréhension, la conception et l'optimisation des catalyseurs (biologique et chimique), des procédés (modélisation multi échelles, jumeaux numériques, ...), de nouveaux produits (retro synthèse, prédiction des relations des propriétés des entrants – paramètres des procédés – propriétés des produits...) et des filières, en incluant une dimension technico-économique, environnementale et territoriale pour une gestion optimisée des données.

Le volume d'activités de recherche en ingénierie bio inspirée au sens « inspirée par la nature par l'exploitation de concepts présents dans la nature » est en forte progression selon différentes approches : 1) Par une imitation des structures, 2) Dans une approche inspirée par les relations structure/fonction, propriété ou processus. 3) Dans une approche reproduisant uniquement la fonction, la propriété ou le processus sans reproduire la structure. 4) Et enfin, dans une approche qui imite les interactions et les organisations inter-individuelles.

De nombreuses équipes s'associent à cette dynamique qui ouvre notamment de nombreuses questions scientifiques et technologiques pour le développement de procédés d'élaboration de nouveaux matériaux et gels (biopolymères, etc.) en collaboration avec des équipes des sections S9, de chimie et de physique, etc. De nombreuses équipes contribuent ainsi à la génération des nouveaux matériaux ou à leur remplacement par des matériaux et substances biosourcés.

Une partie de la recherche fondamentale est orientée vers l'amélioration des processus de mélange et de transferts avec des collaborations interdisciplinaires telles que la chimie, la MF, la thermique, la biologie mais aussi la robotique ou l'électronique pour les capteurs, la conduite et le contrôle des procédés.

Les procédés du recyclage prennent de plus en plus de place dans la communauté et leur mise au point nécessite des approches fondamentales qui peuvent amener à des conditions très complexes de mise en œuvre numérique ou expérimentale (procédés en présence de fluides supercritiques (CO<sub>2</sub>, etc.)). **Ces domaines gagneraient à plus d'interactions avec la MF pour la mise au point d'outils (mesure/modèles) spécifiques.** De même les procédés liés aux polymères et autres gels connaissent des développements importants au sein de la bioingénierie, pour le vivant (cosmétique, etc.). Ces procédés mettent en œuvre des fluides aux comportements souvent non Newtoniens qui nécessitent des outils spécifiques pour l'intégration de la turbulence, du transport (masse, chaleur), etc.

Aux échelles ultimes on trouve des sollicitations de plus en plus importantes liées aux matériaux micro nanostructurés mais aussi à l'élaboration de matériaux dont la génération de la structure atomique nécessite une pureté drastique (cristaux, silicium). Les changements de phase souvent propres à leurs

procédés **d'élaboration nécessitent des collaborations toujours plus poussées avec les communautés de la thermique, la MF, l'INP et l'INC.**

Certains pans de la recherche appliquées en GP sont bien supportés via les PEPRs hydrogène, recyclage, décarbonation, ProdBio, SolubioD. La recherche fondamentale est quant à elle supportée sur sa partie DD avec les GDRs bois, MBS, voire thermobio, etc. Une des difficultés principales de la communauté est la diversité des réactions de transformation dont la mise en œuvre dans des procédés nécessite l'adaptation permanente des outils de caractérisation en situation, de bilan énergétique et environnemental. **L'élaboration d'un GDR spécifique pourrait être soit lié à une filière (comme pour le bois avec thermobio) soit aux différents outils expérimentaux et numériques nécessaires tout au long de la mise au point des chaînes de procédés.**

## **e. Plasmas et lasers**

Bien que fortement sollicitée par les applications aval, la communauté Plasma-Laser reste impliquée dans le développement de recherche fondamentale. Une partie des études en plasma, pour la S10, ont trait à leur génération et donc à l'influence des différents éléments paramétriques (générateur électronique, guide d'onde, résonateur, gaz, conditions thermodynamiques d'établissement (niveau de pression, fréquence d'excitation), etc.). En parallèle est menée leur caractérisation/compréhension avec une focalisation sur les échanges thermiques et ioniques. Leurs mises en œuvre dans des situations complexes induisent souvent une forte interdisciplinarité (santé, matériaux (revêtement de parois), chimie (modifications de processus chimiques), etc.) ceci des systèmes nano/micro jusqu'aux systèmes interstellaires (propulseurs spatiaux électriques sans électrodes avec des propergols alternatifs, physique des décharges plasma hélicon et des tuyères magnétiques, etc.). L'étude des plasmas (générés dans des milieux (gaz moléculaires, liquides)) réactifs hors équilibre permet nombre d'applications liées à **l'énergie** (propriétés diélectriques des gaz tièdes et critères de claquage en fonction de la pression, de la température et de la composition des gaz au sein des disjoncteurs Haute-Tension, dépôts d'énergie dans les décharges Radiofréquence et micro-onde, etc. ), à **l'environnement** (dépollution chimique : traitement par décharges couronne et sources de rayonnement UV, des gaz, des liquides et des surfaces.) et à **l'interaction avec le vivant** (interactions cellulaires, désinfection des plaies, cicatrisation, etc.). Ce dernier domaine est représenté par le GDR Happybio. Les plasmas réactifs permettent d'étudier différents mécanismes en interaction avec des parois ou pour la génération de matériaux (couches minces homogènes de silice ou de diamant synthétique, nanoparticules de carbone, métalliques (argent, fer) ou d'oxydes métalliques (ZnO) ou nanostructurées (cœur-coquille), et multifonctionnelles, semi-conducteurs, céramiques, nanocomposites, etc.) ou d'objets spécifiques (nanoparticules encapsulées et/ou fonctionnalisées) la physique et la chimie hors équilibres sous-jacentes complexifiant la combinaison des processus de base. En particulier à basse pression avec le rajout nécessaire d'un champ de contrainte magnétique. De façon générale l'interaction avec les parois (électrodes (modélisation des cathodes émissives de propulseurs), lors de l'ablation des matériaux, etc.), en particulier en présence de champs magnétiques, reposent sur des principes physiques encore mal connus. De même pour la génération des sources à cause des nombreux phénomènes qui coexistent (effet corona, décharge barrière (DBD), etc.). On note enfin une forte activité pour les études d'interaction plasma avec le vivant (partie santé/vivant). Les fortes avancées technologiques et numériques permettent un regain d'études pour la compréhension des couplages avec les nombreux phénomènes physiques coexistant (turbulence, cinétique chimique, déséquilibres thermique et chimiques, instationnarités ...): instabilités et turbulence dans les plasmas froids magnétisés (propulseurs de Hall (sondes spatiales et satellites), etc.), transports électroniques anormaux dans ces plasmas (propulseurs à plasma), etc. La communauté des plasmas froids est regroupée au sein du GDR EMILI (GDR EMILI, Etude des Milieux Ionisés, Plasmas froids créés par décharge et laser).

La partie laser a bénéficié de gros progrès technologiques en termes de durée d'impulsions, de stabilité, etc. nécessitant d'étudier les spécificités pour leur utilisation en interaction (laser/matière, laser/chimie, etc.). Les générations plasma par laser femtosecondes au sein des matériaux permettent d'accéder par exemple à un régime d'absorption non linéaire ouvrant sur des phénomènes d'intérêt (effet tunnel, réduction des effets thermiques, etc.). Cela nécessite une modélisation accrue des phénomènes qui ont lieu lors des interactions avec tir laser. **Les champs d'extension sont nombreux en métrologie rapide pour la MF (fluorescence, etc.), la santé (chirurgie laser des yeux, ingénierie tissulaire, thérapie laser), etc. et se développeront en fonction de l'accès aux évolutions de cette technologie.**

### 3. Thèmes émergents-Signaux faibles

#### a. Mécanique des Fluides

De nombreux sujets pourraient être plus explorés. On en soulèvera quelques-uns de façon non exhaustive. **Les écoulements en milieux thermodynamiques extrêmes, avec Fluides Supercritiques** est un domaine qui mène à de nouveaux comportements d'écoulements, de transport, de transferts tant en mono qu'en diphasique. Cela nécessite des analyses systématiques d'écoulements génériques fondamentaux (turbulence, effets de rugosités, déclenchements de couche limite, etc.), à l'aide des outils d'observation (numériques et expérimentaux) développés ces dernières années. Ces fluides sont présents à l'état naturel au niveau planétaire (Vénus, ...) et sur terre (fonds océaniques). Le GP s'est emparé de procédés qui les mettent en œuvre, pour la santé, le recyclage (séparation des polluants, jet d'azote supercritique, etc.) l'extraction ou autre (génération de mousses, etc.). Des études en procédés micro-fluidique ou prenant en compte la turbulence en thermique (Rayleigh-Bénard) ont vu le jour. Une communauté « procédés » semble se structurer autour d'entreprises et du CEA (via l'IFS) ou du GDR 03 en chimie. Quelques laboratoires (Rhapsodee, LRGP, LEMTA, LGC, M2P2, GEPEA etc.) en lien avec des laboratoires de l'INP et de l'INC (ICMCB, etc.) se sont emparés du sujet mais **il nous semble que la communauté fondamentale MF (turbulence, milieux polyphasiques, etc.) pourrait y porter une attention plus importante afin de lever les verrous rencontrés dans le domaine des procédés, du mélange, etc.** Les aspects réactifs (mélange réactif) ouvrent un champ phénoménologique qu'il nous semble devoir être questionné. Le sujet est d'intérêt fondamental pour l'énergétique et le développement durable et gagnerait aux collaborations avec l'INC et l'INP. La MF a beaucoup à y apporter via l'adaptation de ses technologies d'observation et de modélisation. Un autre sujet de même ampleur est celui des écoulements avec des superfluides. Même si certaines équipes se sont emparées du sujet via des études sur la génération de la turbulence à de très grands nombres de Reynolds la communauté MF a pour le moment peu œuvré à développer des techniques d'observation ou de calcul dédiées pour la compréhension de tels écoulements. De même pour **la MF qui met en jeu des polymères (solutions de polymères dans des solvants et polymères fondus)**. Le caractère non Newtonien de leur écoulement implique des couplages dynamiques spécifiques qui ne se résument pas à des problématiques de viscosité. Pour les transports, les transferts, multiphasiques, en régime turbulent ou pas, **bon nombre de couplages ne sont pas élucidés**. La conformation des polymères en sus de l'équation de NS introduit des complexités supplémentaires d'échelles (spatiales et numériques) mais aussi de résolution numérique (équation non diffusive). Peu d'équipes en MF sont concentrées sur ces sujets même si les propriétés polymères sont prises en compte dans les processus étudiés, entre autres, par le GP et pour la physiologie. Un dernier sujet qui pourrait être d'intérêt est l'étude des écoulements, transports et transferts (thermique/masse) **en milieux raréfiés à la limite ou hors des milieux continus**. Outre les problématiques aéronautiques, aérospatiales en altitude, il y a par exemple la physico chimie (catalytique ou non) des processus réactionnels dont l'étude expérimentale par rayonnement est limitée par des milieux trop denses et les processus d'épitaxie (phase vapeur, jet) qui nécessitent des études MF fondamentales plus poussées. **Pour leur modélisation la variation des paramètres thermodynamiques et intrinsèques (viscosité, etc.) mériterait d'être soulevée.**

D'un point de vue analytique et théorique, au vu de l'évolution des dernières technologies d'inspection comme la PTV, il devient important **d'adapter les modélisations des transferts (masse/chaleur) turbulents pour tirer la quintessence de l'analyse Lagrangienne.**

Bon nombre de sujets en aérodynamique devraient être revisités systématiquement à l'aune des capacités de la FA à générer des structurations et nanostructuration dans des matériaux jusqu'ici improbables, au vu des évolutions technologiques (PIV/PTV rapide) mais aussi au vu des capacités offertes par de nouveaux acteurs pour la manipulation et le contrôle. Des sujets clefs comme l'étude des lois de couche limite, la transition à la turbulence pourraient y trouver un repositionnement théorique de leur modélisation pour les simulations numériques.

#### b. Thermique/Energétique :

Parmi les thèmes importants, qui pourraient prendre de l'ampleur, vu les développements amonts forts des matériaux, on trouve la compréhension et la caractérisation des transferts thermiques dans ces nouveaux matériaux qu'ils soient à changement de phase (MCP), soumis ou non à rayonnement, mais aussi dans les métamatériaux, composites architecturés dont les combinaisons



morphologiques et topologiques peuvent être déclinées mathématiquement ou numériquement à l'infini. L'intérêt graduel pour les matériaux biosourcés va poser de nouvelles questions dans ce domaine.

D'un autre côté, **la possibilité accrue de génération de micro/nano particules fonctionnalisées devraient ouvrir de nouvelles possibilités de mesures thermiques locales dans bon nombre d'écoulements de toute taille. La microscopie thermique en champ proche pourrait en bénéficier.** Probablement le coût de fabrication et leur accès a pour le moment limité leur utilisation. **Les techniques de caractérisation thermo-physiques restent à développer et à optimiser (méthode 3-omega par exemple, via l'effet thermorésistif, pour la caractérisation des matériaux micro/nanostructurés).** Les transferts thermiques liés aux matériaux supraconducteurs ou aux interfaces écoulements fluides pourraient aussi être plus abordés malgré les difficultés de mise en œuvre. Les caractérisations thermiques non destructives aux petites échelles dans des matériaux architecturés restent à développer : microscopie Raman, microscopie infrarouge ou thermographie infrarouge locale. Une action clé que doit mettre en place les thermiciens est la jonction avec la compréhension des comportements thermo-mécaniques des matériaux à hautes températures afin de développer de nouveaux systèmes thermiques non seulement efficaces sur le plan énergétique mais aussi durables.

### **c. Combustion :**

Les transitions imposées par le changement climatique et l'accès aux ressources impactent fortement les orientations. Concernant les combustibles, la recherche s'oriente en premier lieu sur le remplacement des combustibles fossiles par des combustibles verts issus de la biomasse et des déchets mais aussi leur mélange avec des nouveaux vecteurs énergétiques comme l'hydrogène H<sub>2</sub> ou l'ammoniac NH<sub>3</sub>. L'utilisation de carburants carbonés renouvelables type biocarburants et leur mélange sont les premiers à être envisagés permettant la décarbonisation et de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Ces bio carburants qui constituent la voie de remplacement des carburants fossiles en situation embarquée des avions et des bateaux qui sont souvent moins raffinés ou utilisés dans des mélanges impliquent des recherches sur leur production, leur mise en œuvre, l'optimisation de l'efficacité et le contrôle de l'impact environnemental s'inspirant des études et connaissances déjà acquises. Les modèles de cinétique chimique se complexifient et nécessitent d'être adaptés et les systèmes de combustion doivent prendre en compte des modes de fonctionnement différents comme des mélanges pauvres voire ultra pauvres, sans flamme ou des mélanges très réactifs induisant des variations sur les émissions de polluants, des flammes plus lentes et moins caloriques potentiellement instables ou des flammes extrêmement rapides associées à des températures et des pressions élevées. La transition à d'autres carburants non carbonés est aussi une piste alternative aux carburants fossiles qui s'inscrit dans la stratégie nationale bas carbone. Hydrogène, ammoniac, et leurs mélanges ont commencé à être investis dans différentes situations tout en préservant les infrastructures existantes. Les travaux de recherche s'appuient sur les connaissances acquises sur la combustion des carburants carbonés mais nécessitent aussi de résoudre des questions nouvelles liées aux émissions, à la stabilité de flamme, avec le développement de modèles de cinétique chimique et la définition de conditions optimales d'utilisation mais aussi la prise en compte des données de sécurité. De nouvelles voies de combustion nécessitent aussi de s'intéresser au comburant, la concentration en oxydant pouvant être modulée.

Une ouverture sur d'autres matériaux qui en s'oxydant permettent de produire de la chaleur constitue de nouvelles pistes. Les particules métalliques font l'objet de projets nationaux et internationaux sur des cycles oxydation/réduction permettrait de délivrer et de stocker de la chaleur. Le principe est de récupérer les oxydes produits et réinjecter de l'énergie pour revenir à l'état métallique. Actuellement des microparticules de Fer sont étudiées mais d'autres métaux sont possibles. A noter la production d'hydrogène quand la réaction a lieu dans l'eau.

Les hydrures métalliques ou des matériaux poreux où l'hydrogène peut être stocké avant d'être extrait (LOHC) ou « brûlé » constituent des solutions alternatives bas carbone qui mériteraient d'être investigués.

Ces solutions ouvrent tout un domaine de recherche tant au niveau de la réactivité et la cinétique que des systèmes capables de les mettre en œuvre de façon efficace et durable compte tenu des conditions qui peuvent être sévères (températures élevées, corrosion).

Les dispositifs de combustion devront intégrer ces nouveaux combustibles ouvrant de nouvelles questions scientifiques associant MF, thermique, science des matériaux et réactivité chimique : l'injection (selon que le combustible est liquide, gazeux ou particulaire ou encore diphasique), l'espace

de combustion et sa capacité à restituer l'énergie de combustion mais aussi de résister aux forces et aux températures en présence (nouveaux matériaux, nouveaux lubrifiants), à l'abrasion et aux produits de la combustion.

Les questions de sécurité et incendie où la combustion est non contrôlée sont aussi au cœur des recherches en combustion et devront s'adapter avec les évolutions des combustibles (production, stockage et exploitation d'hydrogène), des systèmes et de leur environnement, en particulier celles dues au changement climatique. Les feux de forêt devront prendre en compte à la fois les nouvelles essences de bois qui sauront s'adapter au changement climatique mais aussi les phénomènes climatiques (sécheresse, vent violent, ...) et d'urbanisation.

La sécurité des systèmes industriels constituera aussi de nouvelles sources d'études du fait du changement des combustibles, de leur capacité à réagir et des conditions de leur stockage, des moyens de leur exploitation et des effluents, sans oublier les dispositifs nucléaires. Ces travaux devront faire appel à des spécialistes des transitions des systèmes instables vers la déflagration/détonation.

#### **d. Génie des Procédés**

La décarbonation de l'industrie est un des moteurs des thèmes émergents comme l'élaboration de nouveaux procédés efficaces, économes en énergie, via des transformations pour une valorisation « zéro déchet », les biotransformations de résidus ultimes pour générer des vecteurs énergétiques (méthanisation, hydrogène, etc.) etc. Les procédés de façon générale doivent travailler sur 3 notions : la réduction de l'impact en amont (écoconception), la transition vers une économie verte en intégrant de nouveaux moyens de produire et enfin les nouveaux matériaux, nouveaux solvants verts et leur remédiation (traitement des résidus et déchets, eaux, gaz). Les thèmes qui nécessiteront un fort développement relèvent de ces domaines et de la prise en compte du développement durable dans les procédés et de la transition énergétique. En émergence ou en développement l'introduction de l'énergie solaire dans les procédés est une piste à considérer que ce soit dans la production de « carburants solaires » basés sur la photosynthèse, les réacteurs solaires ou encore la mise en œuvre de photo-réactions type photocatalyse, génération de photoréactifs, ou le watersplitting pour la production H<sub>2</sub>.

Les procédés low tech, sobres en ressources, en énergie constituent ici aussi une piste intéressante particulièrement dans le domaine de l'écologie industrielle. C'est la problématique de l'intégration de procédés de production avec l'ensemble des procédés conduisant à la fois à production et au stockage de l'énergie nécessaire jusqu'au traitement des effluents et résidus. Les fluctuations de fourniture de l'électricité et le coût associé devront conduire à revoir la conduite et le contrôle de procédés énergivores en se basant sur des méthodologies d'aides à la décision.

La science des systèmes bénéficie ces dernières années d'un développement toujours plus intense des capteurs/émetteurs (c/e) miniaturisés, autonomes et communiquant à distance qui doivent trouver une part croissante dans le contrôle en temps réel des processus sur lesquels le GP intervient. Les évolutions des systèmes intégrant ces processus doivent prendre en compte l'amélioration de toutes les propriétés croissantes de ces c/e dans l'élaboration de nouveaux modèles pour le contrôle des procédés dans toutes leurs dimensions (mélange MF, physico chimie, thermodynamique). L'évolution fortes des propriétés de ces c/e doivent permettre d'intégrer plus systématiquement les modèles nécessaires à la supervision et à la commande en s'alimentant en ligne de l'information nécessaires à ces modèles. « L'intelligence » de ces capteurs pourrait être améliorée aussi en temps réel via des modèles ad hoc d'IA.

Ici encore la prise en compte des différentes échelles spatiales et temporelles impliquées dans les procédés de transformation est cruciale. Le développement d'approches multiéchelles considérant à la fois les échelles micro, macro et système sont essentielles et c'est sur ce thème que des efforts devront être consentis.

Le GP d'élaboration des matériaux est en pleine révolution du fait des avancées dans la conception des nouveaux matériaux (matériaux filaires et fusibles pour alimenter la FA, matériaux biosourcés, métamatériaux...). Petite communauté au sein de l'INSIS, elle travaille en étroite collaboration avec les équipes de l'INC.

#### **e. Plasmas et lasers**

La recherche impliquant des **Plasmas en Interaction avec les Liquides** (PIL) pourrait devenir un sujet plus fort ces prochaines années avec la diversité offerte par le choix des liquides. Les applications potentielles à l'environnement, les sciences de la vie (biologie, agriculture, médecine) et la

synthèse de (nano)matériaux pourraient tirer cette thématique vers le devant. La même variabilité qu'avec les gaz est ouverte, pour les réacteurs plasma et les modes d'interaction des décharges avec les liquides (en spray, en gouttes, dans ou sur le liquide). Ces plasmas sont le siège de nombreux phénomènes physico-chimiques différents de ceux rencontrés pour les gaz ionisés (forte réactivité chimique, génération d'ondes de choc et de rayonnement UV) traduisant également une grande complexité.

Pour l'utilisation des lasers femtoseconde pour les plasmas immergés dans un liquide on pourrait avoir en particulier de nouveaux procédés d'élaboration de nanoparticules spécifiques.

La propulsion électrique pour les engins spatiaux devrait retrouver un gain d'intérêt avec le développement des moyens de génération électrique embarqués, les progrès en termes de batterie, etc. Les relations plasma santé et laser santé (abordés dans la partie santé) devrait accroître leurs recherches à la suite des développements importants des sources et du contrôle qui permet des précisions toujours plus importantes et nécessaires.

## 4. Outils (expérimental/numérique)

### a. Mécanique des Fluides

La mécanique des fluides (MF) expérimentale bénéficie de l'évolution ou de la mise au point de nombreuses technologies (lasers, matériaux, optique, etc.). Il est souvent nécessaire de les adapter aux contraintes contextuelles (thermique, particules solides) d'une installation. Il serait intéressant de créer, **au-delà d'un laboratoire, un (ou des) réseau(x), pour que tout chercheur MF sans support contractuel, puisse y accéder dans son contexte de recherche. Elles permettent souvent une rupture (La description Lagrangienne versus Eulérienne pour la turbulence ou le mélange par exemple). Leur utilisation dans le contexte d'une installation peut s'avérer lourde (PTV rapide, PIV3Dscan rapide, PLIF, microscopie 2 couleurs, champs à densité variable par interférométrie, etc.) et difficile à maîtriser.** Une des difficultés de la mise en place de ce type de réseau est l'intégration des nouvelles technologies (scanning ultrasons, microscopie multilongueurs d'ondes, etc.) pour une adaptation à la thématique MF (de même pour la thermique, la combustion, le GP et les plasmas). Ces nouvelles métrologies amènent toujours plus d'informations à traiter via des analyses toujours plus diverses (IA, POD, fractalité, etc.). Même si le chercheur sait trouver l'accès à ce type d'outil il le fait souvent à contretemps de son objet de recherche et de façon non optimale par rapport aux capacités applicatives de l'outil. **La mise en place de réseaux logiciels d'analyse avec le support associé semble aussi nécessaire. Ce type de réseau pourrait être commun avec l'analyse des résultats issus des calculs numériques.** Cela est d'autant plus prégnant que les avancées technologiques ont ouvert un **paradigme lié au couplage de mesures** (vitesse/température, vitesse/concentration, etc.). Ces réseaux devraient en particulier porter régulièrement des écoles pour l'appropriation des outils numériques et d'analyse et de traitement des données (tant numériques qu'expérimentales) semblent nécessaires.

Les innovations récentes en termes de micro-capteurs/actuateurs, micro-fabrication doivent être maîtrisées par des équipes en micro/nano fluidiques (GDRs MNF, POLYNANO 2), en contrôle actif (GDR CODE), en santé, en milieux poreux, etc. **Il semble important de donner la possibilité aux équipes de recherches de s'approprier l'accès à ces techniques.** La notion de contrôle actif est de ce point de vue symptomatique. On va la retrouver dans des domaines « classiques » de la S10 pour l'aérodynamique mais elle pourrait s'étendre aux domaines du mélange, de la santé, etc. Cela nécessite un couplage fort entre positionnement des capteurs, obtention des données, analyse et réaction (temps réel ou non). Hors du contrôle actif la manipulation d'écoulements peut permettre de nouveaux types d'analyses. **L'institut doit se poser de façon globale la question de l'accès aux nouvelles technologies (« FA adaptée », mesures, Plasma pour l'élaboration de systèmes ou de matériaux multifonctionnels (micro-usinage, fonctionnalisation 3D, écriture de guides d'ondes, canaux fluidiques, et autres fonctionnalités lab on chip), nanomatériaux (encapsulation de nano/micro-particules, nanostructuration en surface et en volume, films nanocomposites, etc.)), qui sont pour le moment disponibles sur des plateformes locales bien identifiées mais pas toujours accessibles aux chercheurs en MF qui en sont éloignés.**

Les outils numériques en MF sont très présents. La communauté continue à développer des codes pour des phénomènes complexes à l'aide de techniques précises, souvent en collaboration avec les Mathématiques Appliquées (interfaces polyphasiques (point triple, cavitation), etc.). Ces développements ont permis de traiter des domaines spatiaux toujours plus complexes (déformabilité

des interfaces liquide, gaz ou solide (mousses, lits de rivières, sols, etc.)), avec une prise en compte multiphysique (forces intermoléculaires, photocatalyse, élasticité solide, etc.). La communauté bénéficie de la mise en place de centres de calculs HPC (High Performance Computing) communautaires toujours plus performants (Jean Zay) permettant le développement de modélisations particulièrement adaptées au calcul parallèle (SPH, Lattice Boltzman (LBM), Euléro-Lagrangien du transport diphasique de gouttes, bulles et particules solides). Cela tend à produire des codes, plus à même de traiter des problèmes à physique complexe, utilisables pour une plus grande interdisciplinarité.

D'un autre côté le monde scientifique et la MF en particulier bénéficie d'accès généralisés au monde Open en particulier pour les logiciels (openfoam, etc.), les bibliothèques (Python, etc.). Il serait intéressant d'avoir une réflexion pour l'optimisation de l'utilisation de ces outils (partie II-V plateformes).

Le numérique prenant place de plus en plus dans la société on se doit d'être attentif à la possibilité d'apport de savoir-faire soft ou hard issue de domaines appliqués variés.

**Que ce soit en numérique ou en expérimental, la communauté manque probablement de vecteurs de mise en place (apport de nos outils vers d'autres communautés) pour des interdisciplinarités spécifiques à long terme (Océan, atmosphère) et est pour le moment à discrétion de la pugnacité individuelle des chercheurs. Le rapprochement avec les communautés d'autres instituts (INSU) ou d'autres établissements (IFREMER, Météo, etc.) pourrait avoir lieu a minima via des sites d'échanges virtuels sur des sujets précis à discrétion du chercheur.**

## **b. Thermique-Energétique :**

La thermo-énergétique soulève de nombreux problèmes interfaciaux pour lesquels les verrous restent à lever tant via la modélisation que via les techniques expérimentales et/ou numériques. Pour les transferts l'interférométrie jusqu'à l'holographie et les méthodes inverses sont encore le sujet de nombreuses recherches. Les couplages (avec la mesure dynamique (PIV, PTV)) restent un enjeu fort en particulier en présence de turbulence (flux thermiques ou/et de masse) ou de gaz (changements d'indices de réfraction si gradient de température (idem en compressible)). Les derniers développements d'autres métrologies par onde (imagerie ultrasonore, X, etc.) laissent entrevoir des avancées en cas de non-transparence optique, diphasique, etc. Une autre problématique est l'amélioration et de la sensibilité et de la dynamique des mesures locales et instantanées, non intrusives, à très basses ou hautes températures. **Comme en MF la question principale est l'accès à toutes ces technologies pour les différentes équipes du domaine.**

Les méthodes numériques suscitent de nombreuses recherches pour les couplages convection/conduction/radiation en particulier d'autant plus complexes en situation instationnaire. Aux échelles millimétriques cela passe par le développement de codes stochastiques (Monte Carlo et formulation en espace de chemins) ou déterministes (éléments finis vectoriels) où la parallélisation massive est requise. Pour les couplages aux interfaces (G/L, S/L, etc.) il y a une forte gamme de techniques numériques qui sont utilisées en particulier pour la prise en compte des couplages aux interfaces (F/S via (Navier-Stokes ou LBM)/Dynamique Moléculaire), S/S des semi-conducteur/métaux via des couplages électron-phonon, d'autant plus complexes dus aux problèmes de résistance thermique (films, nanotubes, membranes, etc.) dans les systèmes et matériaux micro et nano structurés (dynamique moléculaire (AEMD) et ab initio). Les derniers développements des LBM pour les transferts thermiques méritent d'être soulignés en particulier en présence de matériaux à changement de phase (MCP). Que cela soit pour des études théoriques ou plus appliquées, **il serait pertinent que l'INSIS soutiennent la mise en œuvre d'une plateforme nationale en génération de matériaux numériques pour toutes les échelles d'intérêt de manière à éviter la dispersion des efforts.**

## **c. Combustion**

La transition s'appuie sur les installations existantes et l'expertise technique en adaptant le combustible à la technologie. L'introduction de nouveaux carburants avec des propriétés très différentes des combustibles actuels nécessitera de recherches sur de nouvelles voies technologiques de les stocker, les distribuer et les mettre en œuvre.

Si certains domaines ont développé une masse de données permettant un traitement par les moyens de l'intelligence artificielle comme les données d'un mélange de carburants en combustion ou les paramètres de qualité de l'air couplée à la météorologie, quand il s'agit d'introduire de nouveaux moyens de production, les données sont peu disponibles et peu fiables ce qui ralentit l'utilisation de

nouveaux outils numériques tels que l'apprentissage machine, les réseaux de neurones ou l'intelligence artificielle. Dans ce domaine, la voie est l'hybridation des modèles mécanistiques préexistants adaptés aux nouveaux modes de combustion avec l'IA.

Là encore, il est difficilement concevable d'introduire de l'IA compte tenu du peu de données disponibles pour élaborer des prédictions d'accidents ou d'incendies. Il serait cependant intéressant de mettre en place une base de données de résultats avec un cahier des charges établi.

Petite communauté au sein de l'INSIS l'importance des questions de transition énergétique soulève la question de l'adaptation des moyens humains et matériels à ces défis.

Au niveau matériel, des diagnostics performants et résistants de plus en plus sophistiqués pourraient justifier l'existence d'une ou plusieurs plateformes qui ne sont pas clairement identifiées actuellement.

Si la simulation numérique à partir de modèles détaillés incluant cinétique chimique, CFD pour le transport de masse, de chaleur et émissions sont à la pointe de la recherche française tant au niveau académique que dans les grands groupes du secteur (motoristes, secteur énergie), la question de la capacité à prendre en charge les transitions et toute leur diversité reste posée. L'introduction de nouvelles technologies numériques basées sur l'utilisation de banque de données, apprentissage machine et intelligence artificielle ne sont que très peu envisagées et dans des situations très particulières.

#### **d. Génie des Procédés**

La montée en puissance du numérique et l'essor de technologies telles que l'IA ou la FA d'une part, et des questions sociétales liées à l'environnement et en particulier au changement climatique d'autre part, sont-ils en train de « changer la donne » pour les équipes du domaine comme dans d'autres domaines de l'industrie et de la société ?

Pour la communauté scientifique du GP un changement est déjà perceptible à travers le positionnement des recherches sous l'angle des transitions (énergétique, alimentaire, matériaux, numérique ...) et plus généralement de l'Usine 4.0. Pour autant, cela ne semble pas avoir modifié la manière de faire de la recherche à l'échelle de la communauté :

Le numérique reste complémentaire de l'expérimental pour la compréhension des phénomènes, et l'utilisation de la FA ou de l'IA restent limitées à des niches. Pour l'IA, cela peut s'expliquer par le fait que la génération de la masse critique de données nécessaire demande beaucoup plus de moyens et de temps si elle est faite expérimentalement que numériquement. Parallèlement, la FA a permis le passage du modèle numérique au prototype de manière remarquable principalement en ingénierie des réacteurs intensifiés et en ingénierie du produit, notamment en agroalimentaire et santé, c'est-à-dire là où un objet était nécessaire à une preuve de concept et ne pouvait pas, ou pas facilement, être fabriqué par d'autres procédés.

Un scénario où la FA et l'IA deviendraient des outils indispensables et omniprésents dans tous les laboratoires est donc peu probable en termes de besoin pour répondre à la variété des questions scientifiques traitées. Par ailleurs, le coût énergétique/carbone de ces technologies numériques plaide plus pour une utilisation raisonnée, avec la mutualisation des moyens matériels et humains, et la constitution/animation de communautés scientifiques interdisciplinaires à l'échelle nationale. Néanmoins, comme pour les plateformes expérimentales existantes, la question stratégique se pose du rapport coût/bénéfice du recrutement ou de la formation de spécialistes, chercheurs ou IT, de ces techniques, pour la communauté scientifique, dans la durée. En revanche, l'influence combinée des questionnements individuels et collectifs des chercheurs sur l'impact environnemental de leurs recherches, et de l'évolution du cadre réglementaire et institutionnel associé, est plus incertaine. Actuellement, les changements de manière de faire de la recherche, voire de thématiques de recherche, semblent rester marginaux, mais sont difficiles à quantifier. Néanmoins, quelle que soit son ampleur actuelle et à venir, la question est peut-être plus de savoir canaliser ces changements au sein de la communauté GP, en s'appuyant sur des outils et des structures émergentes (GTs de la SFGP, GDR labo1.5, évaluation environnementale inspirée du « budget vert »).

#### **e. Plasmas et lasers**

L'amélioration pour les diagnostics des plasmas concerne aussi bien l'amélioration de la résolution spatio-temporelle que celles de la sensibilité, de la sélectivité et de la précision de mesures.

Les plasmas sont des milieux contenant de multiples espèces de façon inhomogène et instationnaire, rendus plus complexes à cause de la variété des sources de plasmas. Au-delà des sondes intrusives, il existe un fort développement des méthodes optiques ainsi que des capteurs intégrés aux parois pour l'analyse de la composition des gaz (spectrométrie OES (Optical Emission), FTIR (Fourier Transform InfraRed)), la densité des espèces, les températures, etc). On notera en particulier l'utilisation des grands instruments (synchrotron, laser de puissance, maser X) et des cartographies de plus en plus précises spatialement (précision au micron) et temporellement (précision à la nanoseconde).

La simulation est énormément utilisée mais reste très complexe au vu des nombreux phénomènes physiques qu'il faut coupler lors de la modélisation (dynamique des fluides, champs électromagnétique, interaction fluide/solide, chimie du milieu, collisions électron-électron, etc.). Diverses approches permettent les descriptions des interactions à l'échelle moléculaire et atomique (dynamique moléculaire), ou des distributions des particules (méthode « Particle-In-Cell », de simulation directe Monte Carlo) à l'échelle mésoscopique, et enfin plus globale pour les écoulements fluides des différentes espèces d'un plasma. De façon plus générale une des difficultés est d'appréhender, de façon simultanée, les processus de transport et de cinétique chimique (avec prise en compte de gaz et molécules de plus en plus complexes). Cela doit inclure les processus collisionnels comme dit plus haut mais aussi radiatifs et moléculaires (modèle couplés collisionnels radiatifs). Cette problématique est encore accrue en fonction des gammes de pressions des milieux ionisés. La complexité des phénomènes mis en jeu aux différentes échelles nécessite néanmoins bon nombre d'outils et de méthodes spécifiques qu'il est difficile de regrouper en un seul outil de simulation. **Un travail pourrait être fait de synthèse des outils et de leur efficacité vis-à-vis d'un phénomène précis.** On notera la mise en place d'une base de données (projet LXCat) pour le partage international des données expérimentales et numériques pour une meilleure compréhension des phénomènes en jeu lors de l'observation/simulation d'un plasma froid **mais il n'existe pas de plateforme d'aide à la simulation numérique via la gestion logiciel spécifiques.**

## D. Santé

### 1. Evolutions-Orientations

Les travaux menés à l'INSIS en lien avec les Technologies pour la Santé vont de la recherche fondamentale aux applications et répondent à l'un des 6 grands défis sociétaux du Contrat Objectif Performances. Ils couvrent historiquement différents domaines tels que les biomatériaux et implants (s9), la biomécanique des solides (s9) et des fluides (s10) à différentes échelles, l'imagerie médicale (s28, S10), l'ingénierie tissulaire (s28), les biocapteurs issus des avancées des microtechnologies et de la microélectronique (s8), la robotique médicale (s7) et l'ingénierie des cultures de cellules souches (s10). On trouvera dans les rapports de conjoncture de ces sections une vision des recherches qui sont menées dans les nombreux laboratoires. Dans cette partie du rapport, nous avons cherché à **proposer une analyse plus globale qui sort des périmètres disciplinaires**.

En effet, les technologies pour la Santé sont abordées de façon transversale entre ces sections, ainsi qu'au sein de la CID54 - qui s'est néanmoins éloignée des applications en Santé pour se concentrer des questions plus amont. Par essence, ils nécessitent également un positionnement interdisciplinaire à l'interface avec d'autres Instituts du CNRS (INC, INP, INSB, INS2I notamment) liés aux domaines de la physique, de la chimie, de la biologie, de l'informatique et des mathématiques appliquées. Il est également essentiel de travailler en amont avec des spécialistes d'autres établissements de recherche comme les cliniciens pour proposer des solutions en adéquation avec leurs attentes (*unmet clinical needs*) tout en restant très vigilant sur les évolutions de la réglementation, dans une perspective de transfert de technologie.

La thématique des **organoïdes et organes sur puces** (Organ-on-a-chip ou OoC) est une très bonne illustration de cette démarche intégrative. Un tel sujet nécessite à la fois des travaux de recherche fondamentale sur la compréhension des interactions entre objets biologiques (CID54) et la caractérisation mécanique des tissus (s9), ainsi que des développements technologiques de systèmes microfluidiques intégrant des fonctions actives (s8, 10) et des capteurs miniaturisés pour le suivi en temps réel et le contrôle des conditions de culture et des sécrétions (s8, CID54, s10). Ces nouveaux modèles reproduisant partiellement un organe y compris dans des conditions pathologiques permettent la recherche de nouvelles cibles thérapeutiques (s28). Ils ouvrent la voie à la médecine de précision en permettant le test de thérapies personnalisées sur des cellules issues de patients. Ils offrent également une alternative à l'expérimentation animale pour certaines études, même s'il faut encore les complexifier (vascularisation, microenvironnement, microbiote...) et mieux prendre en compte les relations entre organes pour pouvoir produire des unités fonctionnelles et parvenir à s'affranchir des modèles animaux, pour des études fondamentales ou en pharmacologie/toxicologie prédictive. Le domaine des organoïdes, pourtant noté comme « peu représenté en France » par le rapport de conjoncture de la section 28 en 2019, a ainsi connu récemment un essor remarquable, grâce au rassemblement des forces en présence dans les laboratoires du CNRS mais aussi de l'INSERM, de l'INRAE et du CEA. Cela s'est traduit la création en 2021 du GDR Organoïdes, qui vient compléter les approches « Organ on Chip » déjà présentes dans le GDR Micro et Nano Fluidique (MNF). Les recherches sur cette thématique devraient encore s'intensifier au cours des prochaines années. En particulier, le développement de dispositifs et protocoles permettant de cultiver des organoïdes ou organes sur puce de façon standardisée et reproductible, propre à l'analyse statistique, reste un défi qui s'adresse plus particulièrement aux laboratoires de l'INSIS (CID54). Sur le plan fondamental, il conviendra d'apporter aux cellules ou aux tissus déjà constitués un environnement biomimétique contrôlé (matrice extracellulaire avec des propriétés mécaniques et physico-chimiques adéquates, système de vascularisation et d'innervation guidé, contraintes mécaniques, ...), mais aussi les moyens de mesure en ligne adéquats, par le biais de biocapteurs miniaturisés ou de systèmes d'imagerie adaptés (s8 CID 54). Ces biodétecteurs tirent profit des avancées en photonique (composants, systèmes et traitement numérique) pour aller vers plus de sélectivité, sensibilité, intégrabilité. En dehors de son expertise dans ces domaines, l'INSIS devra se positionner pour favoriser le transfert de technologie vers la clinique ou

l'industrie pharmaceutique. Cela fait partie des objectifs du PEPR MED-OOC porté par l'INSIS pour le CNRS, le CEA et l'INSERM.

Les sections 8, 9, 10 et 28 se retrouvent également autour de la **conception et la mise en œuvre de systèmes implantables *in vivo***, impliquant le développement de matériaux fonctionnalisés biocompatibles voire biorésorbables ou hybrides (hébergeant des cellules) (s9/28), l'étude des interactions potentielles avec le flux sanguin (stents, endoprothèses, valves, vectorisation) (s10) ou autres fluides biologiques, ainsi que la mise au point d'interfaces bioélectroniques tolérables par l'organisme. On peut citer par exemple la stimulation de l'activité neuronale ou la communication par ondes de paramètres mesurés (s8, liens avec le GDR SOC2). Les biocapteurs déjà mentionnés ci-dessus profiteront des avancées de l'électronique organique, traitée en particulier dans le GDR OERA.

En ce qui concerne les nouveaux matériaux multifonctionnels, nano/microporeux, biomimétiques, l'un des enjeux, en dehors de leur synthèse qui est plutôt du ressort des chimistes, concerne les méthodes de fabrication et de caractérisation dédiées, passant par des études rhéologiques pour les bioencres ou les hydrogels, des caractérisations mécaniques à des échelles de plus en plus fines, *in vitro* ou *in vivo* (en s'appuyant notamment sur les progrès de l'imagerie sur petit animal, en IRM ou  $\mu$ CT, ou sur de nouvelles modalités de microscopie en *in vitro* – GDR IMABIO)). On peut citer par exemple les travaux sur les matériaux fibreux regroupés dans le GDR MecaFib. Un point d'attention particulier concerne les interfaces avec le tissu environnant (bio-tribocompatibilité) permettant une meilleure intégration. Des modélisations plus complexes (biomécanique du solide avec l'interface entre tissus/objets possédant différentes propriétés mécaniques, biomécanique des fluides pour les interactions fluides biologiques/implants, ...) devront également être implémentées, en s'enrichissant de travaux en cours pour d'autres types d'application. Les recherches sur la robotique « molle », qui fait appel à de nouveaux matériaux et actuateurs (s8), mais aussi à des expertises en rhéologie (s10), pourront déboucher sur de nouvelles méthodes d'exploration fonctionnelle ou de traitement. Couplées à des modalités d'imagerie (IRM, CTscan), ces nouvelles approches serviront également d'aide au diagnostic en amont et à une chirurgie personnalisée. Une fois l'implantation réalisée, un effort important est nécessaire pour permettre le suivi au long cours de l'implant. En effet, ces nouveaux matériaux seront potentiellement soumis à des déformations de plus grande amplitude, à des risques de rupture ou de détérioration, qu'il sera nécessaire d'évaluer de façon non invasive (capteurs intégrés, imagerie plus spécifique, ...).

Les **interfaces humain/machine** constituent également un des sujets d'étude de la s9 (interactions homme/exosquelette, retour haptique, cobotique, robotique chirurgicale...), en lien avec l'INSII (s7). On retrouve un espace d'échanges entre les chercheurs de ces domaines connexes au sein de différents GDR (ex: "Réparer l'Humain", "TACT"). Les innovations technologiques autour des prothèses robotisées et des implants s'accompagnent inévitablement de questions éthiques. Les liens avec les SHS sur ces questions semblent cependant relativement peu développés (voir partie II).

On notera également que si les nouvelles approches de fabrication additive, en particulier la bioimpression, ont permis des avancées importantes dans le domaine de **l'ingénierie tissulaire et de la médecine régénérative**, la fabrication d'organes complexes reste un défi à relever. A l'heure actuelle, des travaux collaboratifs impliquant des équipes INSIS ont pu/sont menés au sein de plusieurs IHU/RHU, ou de sites locaux (Nantes, Montpellier, Lyon), mais il n'existe pas d'initiative fédérative de « biofabrication de tissus et d'organes », comme on peut le voir à l'international. En termes de recherche en sciences de l'ingénierie, un premier point concerne la nécessité/l'opportunité d'associer plusieurs approches sur le plan mécanique/matériaux (GDR MecaBioSanté, Repair). On a déjà évoqué les attentes consistant à « mimer » la matrice extracellulaire et les contraintes mécaniques qui s'exercent, de façon dynamique sur les composantes biologiques (s9/s28). Mais l'un des verrous du domaine reste l'accès à une quantité de cellules, une « biomasse » suffisante pour envisager de proposer une alternative à la transplantation de tissus ou d'organes. Les avancées en biologie permettent désormais d'envisager le recours à des cellules souches pluripotentes (adultes, embryonnaires ou induites iPSC), si l'on parvient à dépasser deux limites actuelles : une différenciation induite chimiquement mais limitée, qui amène plutôt les cellules vers un caractère « fœtal » et une production qui reste « confidentielle ». Depuis quelques années, le génie des bioprocédés et les approches biomécaniques (s10) sont mobilisés autour de ces questions, pour définir les conditions de culture industrialisables et



extrapolables, en bioréacteurs. Cela rejoint les problématiques liées aux populations d'organismes cellulaires, à leur croissance et leur migration dans des milieux ou sur des substrats variés. Cela devrait permettre d'une part d'améliorer la différenciation cellulaire vers un phénotype mature ou « adulte » grâce au contrôle des contraintes mécaniques/physico-chimiques exercées sur les cellules, et d'autre part de définir les conditions environnementales et le suivi des paramètres en ligne compatibles avec une conduite contrôlée en bioréacteurs selon des configurations pertinentes pour un changement d'échelle.

La **caractérisation biomécanique des écoulements physiologiques**, à différentes échelles, bénéficie des capacités accrues en méthodes expérimentales et numériques pour la description et la compréhension de nombreuses pathologies (dissection, fistules, AVC, etc.). Les approches combinant des modèles *in vitro/in silico* enrichis à des données issues de l'exploration fonctionnelle (ultrasons, IRM ...) débouchent sur de réels couplages fluide-structure, allant vers des résultats patient-spécifiques, qui restent gourmands en temps de calcul. Cette démarche nécessite une collaboration forte entre mécaniciens des contacts et des structures (s9), mécaniciens des fluides (s10), biologistes (INSB/INSERM) et praticiens hospitaliers pour reproduire des phénomènes aux parois des vaisseaux, qui sont souvent un des vecteurs à l'origine des pathologies. En particulier, le rôle des « irrégularités » de structure qui altèrent le fonctionnement physiologique aux parois (athérome, microbiote, etc.) doit pouvoir être pris en compte. Cependant, la génération de modèles biomimétiques (expérimentaux ou numériques) à chaque échelle ne suffit pas pour donner une vision globale des mécanismes aboutissant à une pathologie, ou à l'effet d'un traitement. Si des techniques d'homogénéisation se déploient pour combiner les différentes échelles, il faut reconnaître qu'on ne comprend pas encore, notamment, les mécanismes à l'échelle cellulaire. Cela milite pour soutenir un effort important de recherche amont en mécanobiologie (S9, CID54 ou CID51 dont INSIS ne fait pas partie), en association avec les biologistes, mais aussi des équipes de l'INSII, profitant de la dynamique soutenue par le CSI INSII ([https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/INS2I/CS-INS2I\\_Recommandation\\_Interface-INS2I-INSB.pdf](https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/INS2I/CS-INS2I_Recommandation_Interface-INS2I-INSB.pdf)). L'objectif serait d'intégrer les différentes données « omiques » dans une vision de biologie des systèmes qui comprendrait aussi les composantes mécaniques.

Par ailleurs, à l'échelle microscopique, la prise en compte des spécificités des cellules adhérentes ou circulantes, ou de capsules artificielles, est aussi un défi pour prévoir le largage de médicaments dans des zones précises du corps humain (vectorisation), ou comprendre l'activation de cellules circulantes, l'extra ou l'intravasation de cellules tumorales, etc. On peut également citer des problématiques spécifiques à la microvascularisation de certains organes (poumon, paroi intestinale, ...). A cette échelle, les études expérimentales peuvent être désormais réalisées dans des dispositifs microfluidiques « biomimétiques », mais qui nécessitent une meilleure analyse des écoulements qui s'y produisent (s8/s10). D'autres phénomènes physiques peuvent y être associés, tels que les problématiques d'échanges gazeux, de transfert de masse ou de perméabilisation sous des effets physiques ou chimiques. Leur prise en compte implique la mise en œuvre de modèles physiques fortement couplés.

De façon plus globale, il faut aussi considérer les approches « corps entier » qui devraient permettre d'acquérir une vision intégrée et systémique et de définir les conditions aux limites à implémenter dans les modèles numériques ou expérimentaux. A ce niveau, les défis sont nombreux : comment intégrer l'impact de l'évolution mécanique des tissus environnants (contraction musculaire, fibroses, par exemple) sur l'écoulement en local ou sur l'ensemble de la circulation ? En retour, quel est l'impact d'une modification d'une partie du réseau sanguin (fistule, occlusion, etc.) sur l'ensemble du corps ? Toutes ces questions bénéficieront sans nul doute d'utilisation d'outils d'IA pour accélérer certains processus, mais surtout d'un dialogue accru avec l'imagerie médicale.

Le domaine de **l'imagerie pour la santé** (s28 essentiellement) semble avoir atteint un certain niveau de maturité, notamment grâce à la structuration de la recherche autour des plateformes France Bioimaging (imagerie biologique) et France Life Imaging (imagerie médicale). On note également la

création en 2019 d'un réseau européen "EuroBioImaging", offrant l'accès à 35 plateformes d'imagerie biologique réparties sur 16 pays. Une initiative comparable pour l'ingénierie médicale pourrait s'avérer intéressante, notamment pour permettre un meilleur partage des données. Cette question s'avère en effet cruciale, pour ne pas reproduire inutilement les mêmes expériences et avoir accès à des cohortes plus larges, notamment pour le traitement des données par IA. Le défi est important, car cela impliquerait une homogénéisation nécessaire des protocoles, mais il s'agit d'une piste à considérer pour répondre aux nouvelles exigences de sobriété. Par ailleurs, l'appel à projets « Innovation en imagerie médicale » s'inscrivant dans le cadre du plan "France 2030" devrait contribuer à redynamiser la filière industrielle de l'imagerie. En effet, bien qu'un réel savoir-faire existe en France dans ce domaine, la plupart des entreprises du secteur sont aujourd'hui étrangères.

Les développements actuels en imagerie médicale portent principalement sur la mise au point d'approches hybrides combinant plusieurs techniques pour avoir accès à une information multiéchelle, multimodale et multiparamétrique et cumuler les avantages de plusieurs technologies (exemple : TEP-IRM associant l'imagerie moléculaire de la TEP et l'imagerie morphologique et fonctionnelle de l'IRM). Il faudra bien sûr apporter pour chaque nouveau développement la preuve par des essais cliniques du réel gain apporté par rapport à chaque modalité employée séparément. Parallèlement au développement de ces appareils, on note l'émergence d'équipements de plus en plus accessibles (bas coût, transportables, au lit du patient), basés par exemple sur l'IRM bas-champ ou encore l'imagerie micro-ondes, qui peuvent apporter des solutions pour la médecine d'urgence ainsi que pour les zones rurales ou éloignées. Dans le domaine de l'IRM, l'amélioration des performances passe par la mise au point d'antennes radiofréquences plus sensibles et éventuellement flexibles pour s'adapter à l'anatomie du patient et accroître ainsi la sensibilité de détection. L'apport de la technologie plastronique peut s'avérer très utile à cet égard.

Les thérapies guidées par l'imagerie poursuivent également leur développement avec la mise au point de procédures mini-invasives basées sur la laparoscopie, l'endoscopie, etc. La localisation par l'image permet une administration mieux contrôlée des vecteurs thérapeutiques, pouvant être combinée avec l'application de stimuli physiques de nature optique, ultrasonore, radiofréquence, etc. Les traitements ciblés par laser nécessitent néanmoins un contrôle beaucoup plus complexe de la gestion des sources de chaleur en milieu biologique et le développement théorique des interactions laser-vivant (s10). De plus, de nombreux développements expérimentaux d'imagerie thermique 3D restent nécessaires pour atteindre et neutraliser des tumeurs. Tous ces travaux sont à mener en étroite interface avec l'INP.

On voit également émerger de nouvelles approches thérapeutiques basées sur l'utilisation d'autres procédés physiques (champs électriques pulsés (PEF), thérapie photodynamique (PDT), gaz ionisés (plasmas), cavitation acoustique, etc). La possibilité de générer des champs électriques pulsés de durée sub-nanoseconde ouvre par exemple de nouvelles perspectives pour le traitement sans contact des tumeurs profondes. Ces recherches nécessitent une meilleure compréhension des mécanismes d'action combinant approche expérimentale et modélisation multi échelle (s4/s10/s8). L'INSIS a également son rôle à jouer dans le domaine pour amener ces travaux vers des dispositifs médicaux. Cette démarche interdisciplinaire est notamment portée au sein du GDR HAPPYBIO.

**Santé et Environnement** sont par ailleurs intimement liés. Les relations entre santé humaine, santé animale et écosystèmes sont mises en lumière avec le concept "One Health" autour duquel une communauté interdisciplinaire doit se structurer pour mieux décrypter la complexité des systèmes et la part des facteurs environnementaux dans certaines pathologies. Le développement de dispositifs nomades autonomes en énergie et de l'IOT au sein de la section 8 s'avère précieux pour assurer la surveillance de l'environnement (suivi de la qualité de l'air, de l'eau, etc). Les études des interactions ondes/environnement (S8) doivent également être renforcées, notamment dans le cadre du déploiement de la 5G et du développement à venir de la 6G. Ces travaux relevant du bioélectromagnétisme impliquent notamment le développement de nouvelles méthodes de caractérisation de la cellule au tissu en passant par l'organoïde, des basses fréquences jusqu'au domaine du THz, ainsi que la mise au point de nouveaux modèles multiéchelles.

## 2. Thèmes émergents-Signaux faibles

En complément des thématiques précédentes, il nous a semblé également utile de mettre en lumière certains sujets peu explorés à l'heure actuelle mais méritant d'être développés et soutenus.

Les techniques d'imagerie à l'échelle mésoscopique, permettant l'exploration en profondeur de sphéroïdes/organoïdes doivent encore se développer avec l'essor des OoC, afin d'offrir une alternative aux procédés chimiques de "transparisation" optique des tissus, limitant le suivi des processus dynamiques de la réponse cellulaire dans un environnement 3D. Le défi est ici d'obtenir à la fois une bonne résolution spatiale et temporelle. Il faut s'appuyer sur le développement de l'imagerie en profondeur et sans marquage basée sur l'optique non linéaire, et entamer des démarches de co-conception de l'imageur et de l'analyse exploitant des algorithmes d'apprentissage profond.

Si l'on assiste à une démocratisation de l'impression 3D qui enregistre un nombre d'utilisateurs sans cesse croissant, notamment avec l'émergence des fablabs, on observe paradoxalement assez peu de développements de nouvelles méthodes ou technologies d'impression pour les applications à la santé. Il pourrait être intéressant de promouvoir le développement de telles approches au sein de l'INSIS, en interaction avec l'INC, par exemple pour faciliter l'impression de scaffolds à base de matériaux hybrides permettant de stimuler les cellules ou tissus (polymères électrostrictifs, magnétiques...) en mimant une paroi déformable, ou encore pour tenir compte dans la fabrication de spécificités liées à une pathologie (calcification...).

Le domaine de la biologie synthétique, à l'interface entre la biologie et l'ingénierie, reste encore un domaine relativement peu exploré, ou tout du moins dont l'affichage n'est pas clair au sein de l'INSIS. On le retrouve essentiellement au sein des sections 28 et CID54. Il permet d'envisager par exemple la reprogrammation de bactéries pour produire et détecter des molécules in situ, avec de possibles retombés médicales ou environnementales importantes, à partir de techniques telles que l'optogénétique. Le défi consiste à pouvoir créer des circuits de synthèse robustes, en s'appuyant sur les approches de commande des systèmes propres à l'ingénierie. Dans le domaine du stockage de données, la biologie synthétique s'avère prometteuse pour la mise au point de mémoires à base d'ADN, qui s'avère l'un des objectifs du PEPR MolecuArXiv. Détourner certaines fonctions du Vivant pose toutefois des questions éthiques nouvelles et complexes pour lesquelles des collaborations avec l'INSHS sont à encourager.

## 3. Outils (expérimental/numérique)

Si la simulation/modélisation ne peut pas se substituer entièrement à l'expérimentation pour la validation des concepts, elle permet de tester la robustesse des modèles et de limiter les nombres de tests à effectuer pour la mise au point de nouveaux procédés.

Le développement des outils numériques et de l'IA devrait dans les prochaines années révolutionner des domaines qui reposaient historiquement sur des approches empiriques et expérimentales. C'est par exemple le cas dans le domaine des bioprocédés et des biomatériaux, où le développement de jumeaux numériques basés sur des modèles physiques et biologiques, des théories statistiques ou d'apprentissage automatique et sur la fouille de données devrait permettre de réduire le volume des essais et erreurs, améliorer les performances et raccourcir le temps entre la conception et la production. Les approches expérimentales restent toutefois essentielles et complémentaires à la simulation pour la validation des lois physiques et biologiques mais également pour la constitution des bases de données sur lesquelles pourra s'appuyer l'IA.

Dans le domaine de la Santé, le champ d'application potentiel des jumeaux virtuels est large. Ces derniers peuvent aider par exemple à choisir une stratégie à évaluer dans un essai clinique, simuler la pose de prothèses, ou tester in silico l'efficacité d'une molécule sur l'organisme afin de mettre au point plus rapidement un médicament ou un traitement. Leur utilisation en complément des nouveaux modèles de culture in vitro (organoïdes, OoC) pourrait à terme constituer une alternative à l'expérimentation animale. Encore faut-il pour cela aboutir à une modélisation suffisamment précise et représentative du réel, intégrant les mécanismes observables à différentes échelles (exemple d'un modèle qui permettrait de faire le lien entre l'expression des gènes, l'activité cellulaire, l'organisation

tissulaire et la fonctionnalité de l'organe). En plus des aspects multiéchelles, les aspects multiphysiques sont à prendre en compte dans de nombreux cas. Ces dernières années l'outil numérique, via des collaborations entre mécanique des structures, robotique et mécanique des fluides a permis un support d'aide à la décision auprès des praticiens hospitaliers via la reproduction et la compréhension de la pose d'outils au sein des objets d'étude (dissection, fistules, prothèses, etc.).

Il ne semble pas exister au sein de l'INSIS de plateforme commune dédiée à la simulation et à la modélisation, et les interactions entre chercheurs semblent plutôt se faire par des communautés constituées autour des différents domaines applicatifs (ex : simulations biomécaniques, interactions ondes/vivant...).

D'un point de vue expérimental on note des progrès majeurs des techniques d'inspection via les ondes acoustiques, ou la pénétration optique en profondeur par exemple ; elles permettent des observations des écoulements sanguins ou des états cellulaires de plus en plus détaillées. L'augmentation de la résolution spatiale (IRM) et temporelle des observations est une réalité qui permet par exemple d'améliorer la précision indispensable aux les jumeaux numériques artériels. Ces domaines sont en constante évolution et très bien représentés au sein du GDR IMABIO, avec fortes collaborations entre S10, S9, S8 et S7.

Un nombre croissant de chercheurs de l'INSIS se forment aujourd'hui à l'IA, mais on manque encore de spécialistes de ces approches au sein de l'Institut. Dans le domaine de la Santé, et notamment de l'Imagerie, de nombreux travaux se font dans le cadre de co-développements avec l'INS2I.

---

## II. Thématiques transverses

---

### A. Développement durable :

Le CNRS s'est engagé dans son contrat d'objectifs et de performance 2019-2023 à contribuer aux objectifs de développement durable (DD) de l'agenda 2030 des Nations Unies. En complément des recherches faites dans ce domaine dans lequel l'INSIS est particulièrement actif, le CNRS a aussi adopté un plan de transition en 2022 qui vise à réduire son propre impact environnemental. Les aspects environnementaux sont donc déclinés sur les deux aspects : a) impact sur l'activité de recherche, et b) recherches contribuant aux objectifs de développement durable.

#### 1. Prise de conscience des chercheurs ? Impact sur l'activité ? Quelles contributions de l'INSIS ?

Le coût environnemental et énergétique des recherches n'est pas sans interpeller les chercheurs de l'INSIS et leur prise de conscience a été favorisée par le travail du collectif labo1.5 qui a proposé dès 2019 un ensemble d'outils de diagnostic et de trajectoires d'évolution pour réduire l'empreinte carbone des activités de recherche des laboratoires.

Un grand nombre de laboratoires se sont engagés dans la démarche labo1.5 et ont effectué dans un premier temps un diagnostic avant d'adopter des mesures concrètes destinées à réduire leur empreinte carbone. A noter que l'empreinte carbone n'est pas le seul paramètre dans le diagnostic de l'impact environnemental des activités de recherche.

Si la démarche collective labo1.5 semble bien acceptée dans les unités de recherche, **l'estimation de l'impact avant d'effectuer une recherche**, comme le demandent déjà certains financeurs, **et/ou la nécessité de limiter son impact environnemental, soulèvent de vraies questions sur l'évolution de nos activités.**

L'un des premiers postes est lié aux déplacements et aux missions. La réduction est en cours avec l'adoption par de nombreux laboratoires de mesures visant à privilégier l'usage du train pour les déplacements à l'échelle nationale et la généralisation d'activités en distanciel. Cependant, la participation aux conférences internationales est l'occasion de rencontres et d'échanges bien plus fructueux en présentiel. Certains chercheurs proposent de supprimer tout déplacement professionnel longue distance, ce qui limite la création de réseaux informels, et pourrait avoir un impact sur leur intégration dans la communauté internationale. Un nouvel équilibre est à trouver pour assurer un bon développement de carrière tout en limitant les voyages à fort impact. Le développement de modalités hybrides et le cumul de différentes activités sur des missions plus longues sont des pistes à considérer. Par ailleurs, il est indispensable que les critères d'évaluation des chercheurs soient réexaminés à la lumière de ces évolutions.

Les travaux expérimentaux sont indispensables dans le cadre des recherches à l'INSIS. Cependant, expérimentation et développement durable apparaissent souvent difficilement conciliables. Faut-il réduire, dans certains domaines (souffleries, pilotes de production...), les travaux expérimentaux au profit de modélisations numériques a priori moins coûteuses en énergie ? Une comparaison globale des impacts énergétiques des approches numériques avancées (qui sont aussi coûteuses en énergie, puissance de calcul, stockage de données) et des approches expérimentales (et de leur mutualisation sur des plateformes d'essais), ainsi que le développement de jumeaux numériques permettrait de mieux gérer cette interaction, tout en préservant la possibilité de valider les recherches dans des conditions expérimentales adéquates.

A l'échelle des consommables et matériaux dans le laboratoire, il est aussi possible de réduire l'empreinte. Par exemple, la substitution de substances chimiques à fort impact par des composés moins nocifs est déjà en cours dans les laboratoires (règlement REACH). Cependant, les produits de

remplacement ont des propriétés différentes, ne permettent pas toujours d'accéder aux résultats escomptés, avec l'efficacité attendue, et demandent des études complémentaires. En biotechnologie, on peut citer l'usage d'organismes génétiquement modifiés (OGM) dont l'impact environnemental est mal connu. Concernant les déchets, une part importante de l'activité pour l'étude des fluides complexes ou biologiques, s'appuie sur des fournitures plastiques, certaines immédiatement jetables (pipettes, tubes, cônes de pipette...) ; d'autres utilisables à plus long terme (béchers, ...). Il faudrait dans un premier temps recenser les différents cas pour lesquels les substitutions sont possibles et quantifier leur coût et les contraintes supplémentaires induites.

Les laboratoires de l'INSIS sont déjà largement impliqués dans des initiatives locales, ou au niveau du CNRS. On pourrait envisager au niveau INSIS de contribuer à recenser et coordonner ces initiatives pour un meilleur partage des solutions alternatives envisagées et une utilisation optimale des outils expérimentaux. Notamment, dans différents secteurs, un meilleur partage des données pourrait permettre d'éviter de reproduire inutilement des expériences déjà réalisées. Il serait utile également d'accompagner les chercheurs dans cette transition en généralisant la formation à la démarche d'éco-conception ainsi qu'aux outils d'ACV. Le développement d'actions de sensibilisation telles que l'atelier "ma terre en 180 minutes" est également à encourager.

## 2. Recherches de l'INSIS contribuant au développement durable

La communauté INSIS est au cœur de nombreuses recherches dans les domaines des nouveaux matériaux et méthodes de mise en œuvre à plus faible impact (ainsi que de recyclage), de la production d'énergie plus verte, de méthodes de stockage, d'amélioration de la combustion, réduction de pertes thermiques, d'instrumentation permettant une meilleure utilisation des ressources et des conduites de processus optimisées, etc... De plus, la plupart des financements de recherche comprennent maintenant des volets d'analyse de l'empreinte environnementale en parallèle des jalons de recherche pour éviter de déplacer des impacts ou aboutir à des techniques ou produits plus impactants. Il ne s'agit pas ici de dresser une liste exhaustive des activités qui sont détaillées pour chaque section dans le document, mais de souligner quelques synergies possibles.

Dans le domaine des couplages thermique/énergétique/flux de matière, on observe un besoin de couplage fort entre Thermique, Combustion, Mécanique des Fluides, Transferts d'espèces, développement de matériaux et de capteurs pour une meilleure optimisation du contrôle en temps réel de l'efficacité énergétique des systèmes (à toutes les échelles (villes, bâtiment, etc.).

Les problèmes induits par le changement climatique (CC) conduisent à de nombreuses collaborations transverses internes à l'INSIS ou avec d'autres organismes (INSERM, IFPEN, etc.). En S10, le génie des procédés, la MF et la thermique collaborent pour l'optimisation des procédés, pour l'élaboration de nouveaux matériaux et de combustibles mais aussi pour le recyclage des matériaux, en particulier celui des terres rares, et pour le traitement des eaux. Les concepts d'économie circulaire, ainsi que de frugalité (ou utilisation raisonnée des ressources) sous-tendent de nombreux projets. **L'INSIS pourrait œuvrer pour la mise en place d'un GDR axé autour de 3 notions : 1) réduction de l'impact en amont (écoconception), 2) transition vers une économie verte en intégrant de nouveaux moyens de produire, de nouveaux matériaux notamment biosourcés, des solvants verts et 3) remédiation (traitement des résidus et déchets, eaux, gaz).** Dans ces domaines où la dynamique du mélange est très présente, les développements récents au niveau des capteurs, de la transmission de données et du traitement « embarqué » créent un nouveau paradigme vers le contrôle temps réel au même titre que pour l'aérodynamique des transports et l'optimisation de la construction des bâtiments. Un GDR contrôle temps réel sur ces questions permettrait de regrouper les activités de la S10 avec celles de la S7 et S8 pour la prise en main et l'optimisation des capteurs, actuateurs, etc. pour les phénomènes dynamiques instationnaires.

Ce dernier exemple montre une difficulté pour l'INSIS d'utiliser de plus en plus de capteurs pour l'optimisation des systèmes sur lesquels ses chercheurs et laboratoires travaillent. Le développement de ces capteurs est exponentiel et risque alors de devenir contradictoire avec les objectifs intrinsèques du DD.

Une autre thématique partiellement liée à la première est celle concernant la production et le stockage d'énergie. Ce domaine très riche est bien implanté dans les laboratoires INSIS dans le domaine du solaire, de l'hydrogène, etc. On peut aussi citer le développement de **matériaux nouveaux**, aux propriétés (opto-électroniques) prometteuses en particulier pour la conversion en énergie. La recherche plasma est aussi impliquée dans la fabrication de nombre de matériaux nécessaires à la filière énergie (filiale hydrogène, photovoltaïque, reconversion du CO<sub>2</sub>) ou environnement (dépollution des eaux et des gaz, etc.). L'étude et l'optimisation des processus de transformation de la biomasse pour la valorisation énergétique des rejets thermiques industriels basse température et de source géothermale sont aussi à souligner.

L'optimisation de systèmes énergétiques hétérogènes (sources, stockages, transports, etc.) permet l'émergence d'une nouvelle gamme de systèmes : convertisseurs électroniques de puissance dédiés à ces applications (convertisseurs modulaires multiniveaux : MMC) ainsi que des études fondamentales sur les matériaux diélectriques associés à ce type de réseaux.

Un point de synergie intéressant pour l'INSIS réside dans l'intérêt de capter de l'énergie dans des petits systèmes isolés ou implantés dans un organisme. Ainsi, le grappillage énergétique et la télé-alimentation doivent continuer à faire l'objet de recherches soutenues en vue d'innovations. Cela recouvre les secteurs comme les matériaux photovoltaïques, la production d'hydrogène par photocatalyse, la transmission ultrasonore d'énergie dans des organismes et d'un autre côté le stockage dans des dispositifs miniaturisés innovants (via la micro- et nanofabrication par exemple (nanostructuration, matériaux électro-actifs, magnéto-actifs, électrothermiques, magnétothermiques...)) comme les micro-batteries de type lithium-ion couplées à un micro-supercondensateur fabriqué sur substrat par les techniques de micro-fabrication. Des solutions plus « système » comme le « edge computing » peuvent nécessiter plus d'énergie locale. L'optimisation passe alors par une focalisation sur l'amélioration (intégration de matériaux ferroélectriques dans le Front-End-Of-Line, photonique en silicium, spintronique, etc.) de l'efficacité énergétique, la puissance de calcul et la robustesse. L'INSIS pourrait aussi proposer la mise en place d'un GDR réunissant les besoins et les solutions potentielles adaptées aux microsystèmes, analysés par des méthodes communes de l'impact environnemental et de l'efficacité énergétique de ces approches.

En ce qui concerne les technologies pour la santé, la sensibilisation de la communauté INSIS semble paradoxalement plus limitée. En effet, celle-ci s'est très longtemps appuyée sur sa contribution à l'ODD 3 pour justifier sa recherche (à noter que cette posture n'est pas spécifique à l'INSIS, le secteur médical et hospitalier n'ayant pris conscience de ses impacts environnementaux que très récemment). On a néanmoins mentionné dans la première partie de ce rapport des approches plutôt de type « low tech », qui démarrent, dans le secteur des dispositifs médicaux et du recyclage. Un apport majeur de l'INSIS pourrait concerner les procédés de désinfection/stérilisation afin de sortir du marché de l'usage unique de la plupart des dispositifs plastiques.

## **B. Ethique : quels sont les questionnements issus des recherches menées à l'INSIS ?**

Les recherches de CNRS ingénierie amènent à proposer des dispositifs et des procédés qui interagissent avec le vivant, la société et l'environnement. La communauté scientifique, et en particulier la recherche publique, ne peut pas se contenter de considérer les avancées scientifiques et techniques uniquement sur le plan technologique et économique. Les conséquences des développements technologiques pointent la responsabilité des chercheurs vis-à-vis de la société en termes de sécurité, d'éthique et de développement durable. Les informations et la formation délivrées aux populations ne peuvent pas uniquement viser à faire « accepter » le progrès (COMETS avis n°2018-37 : « *Quelles nouvelles responsabilités pour les chercheurs à l'heure des débats sur la post-vérité ?* »). Les chercheurs ont aussi la responsabilité de mener une réflexion sur les moyens de rendre accessibles les avancées scientifiques au plus grand nombre quand elles sont socialement utiles.

Le développement de l'intelligence artificielle fournit un exemple d'actualité pour illustrer ce propos. En effet, l'intelligence artificielle est certainement utile pour développer, répéter et enchaîner des tâches élémentaires sur base d'ordres simples (informatique et robotique). Elle permet d'enrichir une argumentation d'un semblant d'érudition (journalisme). Elle corrige et accompagne l'enseignement et l'apprentissage (auto-apprentissage) ; ainsi que la communication (rédaction). Elle est indéniablement efficace pour opérer des traitements de données et pour accélérer la fouille de données. - Encore faudrait-il, si on envisage la responsabilité sociale des producteurs d'IA, favoriser une accessibilité de la technologie au plus grand nombre pour prévenir la marginalisation des exclus de la technologie. - Encore faudrait-il que la fiabilité des conseils des outils d'aide à la décision soit garantie, que les critères de « décision » soient explicités et consentis ; et que les règles légales de responsabilité préservent le libre arbitre des usagers. (L'IA est enfermée dans une logique combinatoire régie par des règles statistiques. Ses productions dépendent de l'information utilisée pour la conditionner. Ces informations peuvent contenir des biais). - Encore faudrait-il imaginer des garde-fous pour préserver la démocratie en empêchant les usages qui produisent un asservissement (dépendance, addiction), et en limitant les pratiques de contrôle des populations (manipulation des informations et enfermement en silo). Or, le technologue est peu au fait des enjeux de société, et mal à l'aise pour les appréhender ; le sociologue et le légiste sont désarmés par les aspects techniques. Un travail sur l'éthique de la dissémination de la technologie demande une intervention spécifique pour rassembler ces compétences au sein d'un groupe de travail interdisciplinaire spécialisé.

Le développement des communications à haut débit (futurs réseaux 5G, méga-constellations de satellites) appelle de nouvelles applications pour le quotidien (communications et loisirs, IoT (Internet of Thing), IoE (Internet of Everything)), la sécurité, la défense, la santé, l'imagerie. Les chercheurs ne peuvent s'abstraire des enjeux de société qu'elles portent. Certains enjeux ne sont pas que technologiques. - L'ambition d'atteindre une « connectivité en tout point » fait que les objets et les instruments baignent dans un champ électromagnétique omniprésent. Chaque appareil doit être capable de supporter les interférences, sans en produire lui-même. Ainsi, le développement technologique cause de nouvelles nuisances et appelle de nouvelles solutions. (Il faut assurer la « compatibilité électromagnétique »). - L'incorporation des technologies de la communication dans un nombre d'objets toujours plus large les expose aussi à de nouvelles vulnérabilités : stabilité de fonctionnement et dépendance à la communication, confidentialité des données produites et transmises, protection contre les risques d'endommagement par une interférence excessivement puissante ou une « attaque » électromagnétique. D'autres enjeux concernent la santé de la population. En effet, les champs électromagnétiques des nouvelles sources d'émission et de transmission interagissent plus intensément avec les organismes vivants. De nouveaux critères de sécurité doivent être étudiés, définis et imposés. La communauté de la recherche scientifique publique a la responsabilité d'informer et d'éclairer les décideurs à ce sujet.

Des questions d'éthique similaires se posent lors du développement de nouveaux matériaux et de nouveaux procédés industriels. Il s'agit de prendre en considération l'approvisionnement en matière première, la consommation en énergie et en produits intermédiaires, le cycle de vie des produits (ACV), le démantèlement ou la fin de vie des installations industrielles, le recyclage et l'élimination des déchets. Ces questions méritent d'être posées dès que les recherches atteignent des niveaux de développement technologique TRL 3 ou 4. Pour que cette préoccupation ne reste pas un vœu rhétorique, il convient de développer les moyens d'analyse et d'expertise (bases de données pour procéder aux ACV, développement de l'expertise, formation d'experts).

Dans le domaine de l'ingénierie pour la santé, on peut citer le rôle des laboratoires dans le développement de méthodes alternatives à l'expérimentation animale, mais aussi la nécessité de questionner le droit des patients vis-à-vis de l'émergence de nouvelles technologies pas forcément accessibles ...). On retrouve un espace d'échanges entre les chercheurs de ces domaines connexes au sein de différents GDR (exemple : "Réparer l'Humain", "TACT"). Les innovations technologiques autour des prothèses robotisées et des implants s'accompagnent inévitablement de questions éthiques. Il conviendrait de développer des équipes pluridisciplinaires rassemblant scientifiques des matériaux, médecins, philosophes, sociologues et juristes pour traiter convenablement de ces questions. La responsabilité sociale des chercheurs se manifeste aussi à travers les choix de politique scientifique. Il s'agit de s'interroger en particulier sur le rôle spécifique du service public de la recherche. Cela dépasse les préoccupations : - relatives à la déontologie, l'intégrité / fiabilité, l'éthique des chercheurs



dans leur travail, soulevées par les rapports du COMETS et de l'ANR (rapport COMETS mars 2017 : « *Guide : Pratiquer une recherche intégrée et responsable* » ; ANR : « *Ethique, intégrité scientifique et déontologie à l'ANR. Principes et dispositifs opérationnels.* »), - et/ou aux conséquences des recherches et des développements industriels sur les domaines déjà cités (COMETS avis n°2022-43 : « *Intégrer les enjeux environnementaux à la conduite de la recherche – Une responsabilité éthique* »). En effet, une réflexion pourrait être menée sur : - l'accessibilité et le partage des connaissances (rapports de domination, recherche participative, expertises à destination des collectivités), - les conséquences de la recherche sur les plus démunis (choix technologiques), - les besoins de recherche pour la société qui ne sont pas portés par une valorisation économique immédiate ou qui conduisent à des économies (sobriété).

Naturellement, cette proposition dérange, et les chercheurs se retranchent derrière des problèmes de compétence, de légitimité ; et une perte d'opportunité (comment financer une recherche « low tech » et/ou vers plus de sobriété ?). Il serait pourtant tout à fait socialement utile de générer de la valeur ajoutée en réduisant le gaspillage. A titre d'exemple, des recherches socialement utiles pourraient être menées sur des méthodes de prolongation de la durée de vie des biens et services et/ou visant à lutter contre l'obsolescence programmée (réduction de la consommation, emploi, réparation, partage, mise à jour et amélioration de performance). D'autres recherches socialement utiles pourraient être entreprises sur le développement et la fiabilité de sources, de stockage et de distribution d'énergie collectives à faible besoin en capital. Les exemples ne manquent pas (service collectif de retraitement des déchets, économie circulaire, ergonomie et santé au travail, démocratisation des outils de la recherche (fabrication additive), science participative, Science et éducation populaire...).

Des actions exploratoires pourraient être lancées pour favoriser la formation d'équipes pluridisciplinaires, en lien avec les collectivités locales et la population en vue d'identifier des besoins, et d'évaluer les possibilités de réfléchir et de travailler sur ces questions.

Enfin, des conditions propices doivent être instaurées pour permettre la réflexion éthique aux premiers stades des développements des recherches afin d'éviter qu'un engagement trop avancé des recherches altère le discernement. ***Il faut aussi rendre de la souplesse à la recherche pour faciliter les réorientations thématiques lorsqu'elles sont rendues nécessaires pour des questions éthiques.***

### C. IA : quelle place ?

Le CSI INSIS a produit une recommandation relative à l'IA pour l'INSIS (<https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/insis.htm>), qui comporte une enquête sur les pratiques, une analyse et un certain nombre de recommandations. En parallèle, des démarches ont conduit à la création du GDR i-GAIA auxquels de nombreux laboratoires ont adhéré.

Au sein des activités de l'institut, l'IA est aussi bien vue comme un objet que comme un outil de recherche. Comme objet de recherche, les sections 7 et 8 travaillent sur le hardware (composants pour la collecte de données, composants pour le traitement de données, composants pour le stockage des données), sur le software (IA symbolique, apprentissage profond, « réservoir computing »), voire sur les deux quand il s'agit d'adapter (ou d'inventer) de nouveaux algorithmes aux nouvelles architectures (puces neuromorphiques, réseau de neurones à impulsions). Diminuer la consommation énergétique de ces systèmes (IA frugale, IA bio-inspirée) est une préoccupation de l'INSIS, rejoignant ainsi les enjeux sociétaux actuels autour du développement durable.

Par ailleurs, toutes les communautés INSIS sont fortement impactées par la production de données. Leur stockage, visualisation et analyse sont des problèmes de base qui bénéficieraient du partage de bonnes pratiques. La consommation énergétique associée, de plus en plus importante, présente un problème que le chercheur individuellement peut difficilement contrôler.

Certaines communautés se sont emparées de la problématique comme le GP avec le groupe de travail SFGP sur l'Ingénierie avancée des procédés (IAP), des webinaires sur l'IA en GP et jusqu'à une conférence en juin 2022 ESCAPE 32 à Toulouse (European symposium on computer aided process engineering) avec un thème digitalisation et IA.

Une caractéristique propre à l'INSIS concerne l'IA distribuée ou embarquée (Edge Computing) et les contraintes temps réels qui associent nécessairement étroitement les aspects matériels et logiciels.

On trouve bon nombre d'exemples d'utilisations de l'IA, en tant qu'outil de recherche, au sein des activités de l'institut. Ainsi on peut relever l'usage de l'IA pour traiter des données, traiter des signaux, apprendre au sens du "Machine Learning", optimiser des systèmes complexes ou rechercher des solutions innovantes, dans les domaines d'application spécifiques aux sections 9 et 10. De façon transversale, l'IA est explorée pour ses apports dans la compréhension (par exemple interprétation des observations et l'élaboration du diagnostic dans le domaine audio ou dans les applications non destructives en section 9), la conception et l'optimisation (de matériaux ou méta-matériaux en section 9 ou de catalyseurs biologiques et chimiques pour la section 10), l'optimisation des procédés (modélisation multi échelles, jumeaux numériques), la conception et l'optimisation de nouveaux produits (retro synthèse et prédiction des relations des propriétés des entrants en section 10) via les paramètres des procédés et les propriétés des produits, en incluant une dimension technico-économique, environnementale et territoriale pour une gestion optimisée des données.

Ces utilisations, souvent issues d'initiatives personnelles de chercheurs, n'ont pas attendu les propositions top down, faite par le CNRS, via la CID55 et autres PEPR d'accélération Intelligence artificielle mais devrait être structurées autour de thématiques précises.

**L'INSIS pourrait envisager un questionnement de ce type pour les différentes communautés thématiques des sections, afin de quantifier les besoins spécifiques par rapport aux outils IA.**

**Il est impératif que les outils IA soient adaptés aux physiques spécifiques aux différents domaines thématiques des recherches de l'institut, que les chercheurs débutants soient initiés à ces techniques, que les chercheurs dans leur ensemble puissent bénéficier d'une plateforme d'aide à la mise en place des outils pour l'analyse IA. La question peut aussi être posée de l'adaptation des outils IA. Existe-t-il une méthodologie pour déterminer les combinaisons menant à de nouveaux systèmes (IA ?)**

## **D. Fabrication additive**

### **1. Un ensemble de technologies émergentes**

La fabrication additive par stéréolithographie ou écriture directe consiste à reproduire en trois dimensions des objets numériques en déposant de la matière ligne par ligne, et/ou couche par couche, en suivant un patron numérique. La fabrication additive exploite une variété de technologies : - projections, - frittage d'un sol-gel, - extrusion, déliantage et recuit, - fusion et re-solidification, - polymérisation, - dépôt de cellules souches puis culture, - projection de ciment. Ces technologies produisent des objets de forme complexe comprenant des détails de quelques dizaines de microns, jusqu'à des pièces de plusieurs dizaines de centimètres. Cela permet d'envisager du prototypage rapide, des fabrications « sur mesure », la production de pièces de remplacement ou de substitution, la production de petites séries ; et enfin, des pièces intermédiaires dans un processus industriel (éléments spécifiques, sous-systèmes, moules, fabrications et réparations d'outils).

Le développement de la fabrication additive dans l'industrie est soutenu par des financements publics.

[https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/directions\\_services/politique-et-enjeux/competitivite/politique-industrielle/industrie-futur/initiative-fabrication-additive-dossier-presse.pdf](https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/directions_services/politique-et-enjeux/competitivite/politique-industrielle/industrie-futur/initiative-fabrication-additive-dossier-presse.pdf)

<https://trametal.fr/une-action-de-synergie-nationale-en-rd-de-la-fabrication-additive-metallique/>

<http://traitementsetmatériaux.fr/Actualites/Profession/Fiche/9873838/Action-nationale-en-R%2526amp%253BD-de-la-fabrication-additive-metallique>

<http://www.industrie-dufutur.org/pdf/3041/> ;

<https://www.la-fabrication-additive.com/programmes-daccompagnement/>

Le Conseil Scientifique de l'INSIS a déjà remis une recommandation sur la fabrication additive au cours de la présente mandature. Il invite à soutenir le développement de cet outil technologique [<https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/insis.htm>, 2021]. Ainsi, le conseil scientifique a identifié les défis scientifiques suivants : - comprendre et maîtriser les écoulements complexes qui se produisent lors du procédé, - maîtriser les changements de phase pour contrôler les microstructures au sein des pièces, - développer une modélisation multiphysique du procédé tout au long de la chaîne de production. Le conseil scientifique préconisait : - soutenir une structuration de la communauté concernée par la fabrication additive, notamment en finançant des projets portés par les équipes de l'INSIS et en facilitant le développement d'un réseau d'experts au sein de l'institut, - stimuler le partage des connaissances et des savoir-faire, par des rencontres et des formations, - encourager la réflexion visant à explorer les capacités d'exploitation de la technologie dans nos laboratoires.

Le Conseil Scientifique de l'INSIS de la précédente mandature avait aussi remis une recommandation sur la fabrication additive invitant à soutenir le développement de la capacité de produire des objets biologiques (bioprinting) [<https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/insis.htm>, 2018].

## 2. Des outils et matériaux originaux pour la recherche

Des chercheurs de toutes les sections de l'INSIS se sont emparés de l'outil. La fabrication additive a déjà produit des parties d'instruments de mesure et de contrôle originaux pour la recherche (outils de préhension, échangeurs, microréacteurs, éléments de chambre à vide).

Pour l'électronique et le génie électrique (Section 8), la fabrication additive produit des électrodes miniatures pour les batteries embarquées, et dépose des oxydes de métaux de transition pour fabriquer des supercondensateurs miniaturisés. La combinaison de la fabrication additive et de la plastronique permet de produire des objets intelligents originaux.

La fabrication additive promet de produire (Section 9) : - des matériaux originaux (à gradient de concentration), - des structures composites test, - des méta-matériaux aux propriétés originales (contrôle passif et actif du comportement mécanique et de la réponse aux sollicitations acoustiques – ex : lentille acoustique), - des matériaux aux fonctionnalités nouvelles (surfaces spécifiques pour la tribologie ; des surfaces pour améliorer la résistance mécanique, le comportement tribologique, la tenue en fatigue, en température et/ou la résistance à la corrosion).

Enfin, la fabrication additive a été exploitée en mécanique des fluides (Section 10) afin de produire des modèles pour tester les écoulements (hydraulique et aérodynamisme). En particulier, un réseau de vaisseaux sanguin en polymères a été produit à partir de l'empreinte (IRM) des vaisseaux de patients afin d'étudier les interactions fluide/structure avec des fluides simples ou composites en vue de modéliser les flux sanguins (influence de la géométrie, de la rugosité des surfaces, interaction entre la structure et les objets transportés par le fluide (globules)).

Pour la Section 28, la fabrication de tissus de remplacement reste un défi. La fabrication additive sert déjà à fabriquer des modèles biologiques pour étudier les interactions des tissus avec les solides (biocompatibilité chimique ou mécanique) ou à la suite d'actions mécaniques (adhérence, transformation par stimulation mécanique ou biochimique).

Pour la section 28, la CID54 et la section 8, il est possible d'envisager la réalisation de capteurs biologiquement actifs pour l'environnement et pour la santé.

## 3. Un objet de recherche

Aujourd'hui, l'offre commerciale des outils de fabrication est en avance sur la recherche. Les limites de la technologie commencent à être mieux cernées ; mais la fabrication additive restera un objet de recherche dans la décennie à venir. En effet, d'une part, de nouvelles connaissances sont nécessaires pour obtenir une bonne adhérence du dépôt sur le substrat, améliorer la précision des dépôts, contrôler la rhéologie des poudres, des matériaux biologiques et des précurseurs composites. Enfin, il faut maîtriser le fluage des précurseurs lors du refroidissement, et contrôler le comportement des poudres métalliques sous le faisceau laser lors de la fusion. Ces développements scientifiques s'appuieront sur

la thermique, la mécanique des fluides complexes (rhéologie, capillarité), l'étude des comportements des matériaux (dépendant de la température et incluant les changements de phase), et feront intervenir des modélisations numériques ; tout cela pour décrire l'extrusion à chaud ou les dépôts par fusion laser, les phénomènes accompagnant le déliantage et le frittage.

D'autre part, il faut maîtriser la composition, minimiser les défauts (porosités et raccords entre les dépôts) et optimiser les microstructures dont dépendent le comportement mécanique et la tenue en service des pièces. Par exemple, il faut ordonner la microstructure des métaux à mémoire de forme, et orienter les domaines de polarisation des matériaux piézoélectriques, pour activer un matériau intelligent. Cette problématique spécifique à la science des matériaux (section 9) a été développée au § I.B.4.b. Ces champs d'investigation préoccupent la communauté rassemblée au sein du GDR ALMA. (<https://alma.cnrs.fr/objectifs-scientifiques/>).

#### **4. Stratégie de fabrication et traitements de finition**

Les modifications subies par le dépôt lors du refroidissement, du déliantage ou du frittage laissent des contraintes résiduelles ; elles changent aussi les dimensions. D'autre part, les surfaces externes et internes des objets présentent des rugosités en raison du dépôt couche par couche. Ces effets indésirables sont réduits par l'application de règles de conception (géométrie et orientation des pièces) ; des choix technologiques et des stratégies de fabrication (balayage), et des traitements de finition (détentionnement, polissage, revêtements). Aujourd'hui, les résultats des fabrications restent en partie aléatoires en terme de qualité et de finition, parce que les mécanismes d'évolution de la matière ne sont pas convenablement compris et anticipés dans les logiciels de conception et de contrôle.

Le défi des traitements de finition devient critique parce que les structures réalisées gagnent en finesse et en complexité. En effet, les contraintes mécaniques en service croissent, et de nouvelles exigences sur les matériaux (réduction de la porosité, recristallisation, croissance des grains, génération de précipités par ségrégation, blocage des joints de grain), et les états de surfaces (lissage, revêtements de protection, fonctionnalisation des surfaces), visent à garantir la résistance mécanique et la tenue en service (fatigue et corrosion). En particulier, les traitements de surface actuels procèdent par enlèvement de matière et matage (polissage, sablage/grenailage, érosion (électro)-chimique, recuits laser pulsés). Ils ne sont pratiquement applicables qu'aux surfaces externes des pièces. Or, les performances des outils de la recherche sont souvent tributaires de la qualité des surfaces internes (microréacteurs pour la chimie combinatoire, applications en microfluidique, échangeurs de chaleur, structures mécaniques alvéolaires...). La finition des surfaces internes est un verrou important à lever.

#### **5. Bonnes pratiques**

La fabrication additive lève certaines contraintes géométriques imposées aux pièces usinées et assemblées (agencement de tubes ou de « carrés », perçages cylindriques, accessibilité de l'outil, etc). Elle permet de produire des cavités non-débouchantes ou inaccessibles, mais requiert une auto-sustentation des éléments de la pièce au cours de la fabrication. Pour cette raison, des supports de fabrication sont parfois nécessaires. Ils doivent rester accessibles au terme de la fabrication pour être ôtés. Leur retrait ajoute une étape de rognage/polissage coûteuse en temps. Une conception spécifique des pièces pour la fabrication additive conduit à des formes géométriques plus complexes pour réduire l'insertion d'éléments intermédiaires (profils à élargissement progressif, dômes triangulaires ou coniques, conduits dont la section adopte la forme d'une goutte d'eau, contreforts, etc.).

De nouvelles règles métier émergent progressivement pour garantir la tenue mécanique pendant la fabrication et en service, minimiser les contraintes résiduelles, garantir un état de surface acceptable. Elles portent sur le choix du matériau, de la technologie, imposent des règles de conception et une stratégie de fabrication, incluent des étapes de finition. Elles ne sont pas encore complètement formalisées. Développer le savoir-faire en fabrication additive requiert d'identifier les nouvelles règles métier et de former des spécialistes.

Jusqu'à présent l'optimisation topologique (utilisée pour optimiser les dimensions et la géométrie des pièces) intègre essentiellement les contraintes fonctionnelles (objectifs à atteindre en termes de

résistance mécanique, d'échange de chaleur, ou de capacité de débit...). Les nouvelles règles métiers, et les contraintes associées aux traitements de finition, devraient être intégrées dans le cahier des charges des routines d'optimisation topologique. Ce nouvel outil numérique mettra les performances optimales de la fabrication additive à la portée de tous.

## 6. Nouveaux métiers de la fabrication additive et positionnement INSIS

Les compétences du nouveau métier incluent : - le design numérique, - la maîtrise des règles métiers, - la gestion des risques. Les possibilités de design et les règles métiers dépendent du matériau et de la technologie. La gestion des moyens et des risques participe aussi de la singularité de ce métier (maniement des machines, infrastructures et environnement spécifiques ; poudres toxiques ou dangereuses, vapeurs toxiques ; gestion des déchets et des rebuts) [<https://www.inrs.fr/risques/fabrication-additive/ce-qu-il-faut-retenir.html>]. Il en résultera certainement une spécialisation des techniciens (capitalisation des savoir, des savoir-faire, et mise à disposition de la communauté scientifique) et le développement de formations spécifiques aux outils et aux pratiques. Les écoles actuelles sont encore très centrées sur le contrôle technologique et les propriétés des matériaux [<https://alma.cnrs.fr/ecole-virtuelle-alma/> ; , <https://indico.in2p3.fr/event/28707/> , <https://rdm.prod.lamp.cnrs.fr/actions/ecole-technologique-2023-fabrication-additive/> ]

## 7. Rendre accessible la technologie

Les chercheurs s'emparent progressivement de la technologie grâce à l'installation des FabLab et des plateformes dédiées. Cependant, pour se banaliser, la technologie doit évoluer (développement d'outils numériques ergonomiques et puissants) et assurer la fiabilité des objets produits (tenue mécanique, finition, propriétés fonctionnelles). Un investissement en recherche à court terme sur ces questions pourrait donner un avantage aux équipes du CNRS, si les savoir-faire sont capitalisés et partagés.

La communauté nationale est structurée autour de plusieurs réseaux :

<https://www.cnrs.fr/fr/la-recherche-se-mobilise-autour-de-limpression-3d-du-metal-et-des-ceramiques>

<https://reseaufabricationadditive.wordpress.com/>

<https://alma.cnrs.fr/>

Le développement de la fabrication additive pourrait constituer un projet fédérateur pour la communauté de l'INSIS. La valorisation du savoir-faire en interne pourrait passer par les étapes suivantes : - mettre en place des moyens de formation et d'information (culture générale et recyclage réguliers), qui permettent aux chercheurs d'appréhender les opportunités et les limites de la technologie, et qui permettent de suivre leurs évolutions ; - constituer un centre d'orientation susceptible d'aiguiller les utilisateurs vers le procédé le plus adéquat, et de fournir un soutien pour le design des objets désirés ; - constituer des chaînes de production incluant les personnes compétentes, les machines de production et de finition, les moyens de qualification (plateforme adossée à un laboratoire de caractérisation ou moyens spécifiques propres).

## E. Plateformes

### 1. Existence

CNRS Ingénierie (ex INSIS depuis octobre 2023) abrite tout un réseau de plateformes spécialisées : salles blanches, souffleries super- et hypersoniques, plateformes laser, plateformes de caractérisation, etc. qui peuvent être situées sur un seul site ou distribuées. Elles sont au service des communautés scientifiques, thématiques et des techniques dont elles dépendent ; et constituent un outil essentiel pour la compétitivité de la recherche et de l'innovation.

Certaines plateformes sont organisées en réseau national et/ou international. Certains réseaux sont labellisés « infrastructure de recherche ». L'inscription sur la feuille de route nationale des « infrastructures de recherche 2021 » souligne l'ambition de leur donner une portée internationale.

Ainsi, l'infrastructure de recherche (IR) RENATECH+, infrastructure pour la micro et nanofabrication, est portée par CNRS Ingénierie. Sur le plan international, RENATECH+ est leader du consortium européen « EuroNanoLab » (44 partenaires dans 14 pays) qui vise à faciliter l'accès aux moyens de nanofabrication localisés à l'étranger et à soutenir collectivement des projets de R&D internationaux. REFIMEVE est une autre infrastructure de recherche, liée au réseau RENATECH. D'autres plateformes appartenant à des laboratoires CNRS Ingénierie sont aussi impliquées dans diverses infrastructures de recherche dont les tutelles sont d'autres organismes de recherche (Ex IBISBA portée par INRAE).

Certaines plateformes nationales sont importantes du fait de leur structuration, de leurs labellisations ISO, NFX50-900 et de leur ouverture auprès de la recherche académique et privée. La plateforme 3d.FAB (3D Fabric of Advanced Biology) qui développe des projets d'impression 3D pour les entreprises et les laboratoires académiques sous forme de collaboration ou prestation (Plateforme INC/INSIS) en est un exemple.

D'autres plateformes sont plutôt régionales, comme la plateforme SURFAB (ECLyon et Manutech USD), et offre aux entreprises des ressources techniques et scientifiques dans le domaine de l'impression 3D, du traitement et de la texturation de surfaces par des traitements LASER femtoseconde.

**La mise en réseau procure de la visibilité et une reconnaissance qui facilitent le financement. Symétriquement, certains Programmes d'Équipement Prioritaire de Recherche (PEPR), comme DIADEM, ont été l'occasion de structurer des plateformes existantes en réseau.** Le délégué scientifique "Infrastructures de recherche" de CNRS Ingénierie a entrepris de recenser l'ensemble des plateformes et de leurs ressources disponibles au sein de CNRS Ingénierie afin d'améliorer le niveau de structuration et de partage des plateformes. Pour optimiser la gestion des moyens, **des groupes de compétences ont été mis en place par type de plateforme** ; des workshops et séminaires sur des questions techniques et de management pour les personnels de plateforme ont été organisés ; une Action Nationale de Formation (ANF) « Gestion de plateformes de recherche des laboratoires de l'INSIS » a été prorogée en 2023. Ces efforts sont à poursuivre. Néanmoins la mise en avant de critères pour le regroupement, en plateforme ou réseau, pourrait permettre à la communauté de définir plus rapidement les équipements qui pourraient être concernés.

## 2. Comment elles sont maintenues/soutenues

Seul le réseau Rénatech bénéficie du soutien financier direct et régulier de CNRS Ingénierie pour son fonctionnement (5.2M€ en 2023). Le développement des plateformes ouvertes et leur structuration en réseau est soutenue par une politique de gestion des ressources humaines ; ainsi que par une volonté de les financer via la jouvence d'équipements participant à des plateformes et des réseaux, notamment à travers les PEPR. Ainsi Rénatech profite du PEPR d'accélération pour l'électronique dont 40% du budget est destiné à la jouvence des 33 centrales du réseau ; ainsi que des PEPR « 5G » et du « réseau du futur » dont un des axes est la création d'une nouvelle plateforme expérimentale destinée à tester de futures briques technologiques. Le PEPR DIADEM finance la rénovation et de développement des plateformes existantes dans le domaine des matériaux (généralisation des approches multiéchelles et multitechniques : analyses X, tomographie, acoustique). De nouvelles filières s'appuient aussi sur un financement complémentaire issu de l'Équipex+/ESR-Nanofutur, autre programme national, qui a permis d'investir dans du matériel de pointe inédit.

L'implication des plateformes dans les programmes nationaux (PEPR ; Equipex etc...) contribue à financer leurs frais de fonctionnement. Cependant, l'ouverture des plateformes, ainsi que leurs implications dans les réseaux et les programmes nationaux, requièrent un engagement important des responsables opérationnels et scientifiques de ces structures. Les ressources humaines ne le

permettent pas toujours sur le long terme. Ainsi la pérennisation des plateformes est un défi académique et économique qui appelle une réflexion sérieuse. Il convient notamment de garder à l'esprit que l'objectif initial de ces outils est de servir la recherche fondamentale. D'autre part, les normes et les chartes de bonne pratique requises pour l'ouverture et le partage des infrastructures figent les matériels et les pratiques autour de standards. Or, une part significative des avancées de la recherche s'opère à travers une évolution des moyens et des pratiques. Une systématisation de la politique des plateformes peut être un frein au développement de nouvelles techniques expérimentales, et à la créativité scientifique. Enfin, la rentabilisation économique, qui est une des motivations sous-jacentes du développement des plateformes et de leur ouverture, s'oppose au besoin de disponibilité du matériel, et de temps long, pour faire évoluer les savoirs et les moyens et qui sont l'apanage de la recherche fondamentale. Pour la recherche fondamentale, il conviendrait de maintenir des espaces de liberté préservés des préoccupations économiques à court terme.

Pour encourager l'ouverture des plateformes technologiques de recherche à un usage par l'industrie, le CNRS a lancé un appel d'offre « Plateformes 2022 » visant à recruter une centaine d'ingénieurs-transfert d'ici fin 2024. Ces ingénieurs ont pour mission de développer des collaborations avec l'industrie et de vendre des prestations ; avec l'objectif, à terme, de générer un chiffre d'affaires suffisant pour financer leur salaire. Cette valorisation économique des moyens scientifiques causera inévitablement des tensions entre les priorités académiques et commerciales. La mise en concurrence des plateformes académiques entre elles, et avec les plateformes privées, soulève aussi les questions de la rentabilité économique et du respect des règles de la libre concurrence. Enfin, l'équilibre entre les recherches académiques et les prestations de service est aussi une question récurrente à la fois pour la liberté de la recherche, pour sa qualité et sa créativité, ainsi que sur le plan déontologique, quand les prestations de services sont incontournables et dominantes. Ces questions demandent à être approfondies. A minima le passage d'une structure vers une structure définitivement plus appliquée doit être couverte par le maintien de moyens similaires auprès des chercheurs qui l'ont mis en place pour des objectifs précis et qu'ils peuvent être amenés à faire évoluer.

### **3. Utilité de la mise en réseaux des plateformes ?**

Moyennant une politique de gestion adéquate, les plateformes pourraient permettre de renforcer la recherche autour des technologies existantes, et de développer les nouvelles ruptures de demain. Ceci requiert un financement public suffisant et libre de contrainte, à la fois en moyens humains et financiers. Il s'agit à la fois de continuer à acquérir des équipements innovants et de les rendre accessibles à l'ensemble des acteurs de la recherche publique et privée. La mise en réseaux facilite la mutualisation des moyens. Cependant, la procédure de labellisation est lourde, et la pérennisation du système risque d'être coûteuse en énergie. Une concurrence entre laboratoires pourrait être contreproductive. Il convient donc d'être attentif, à préserver un champ d'action favorable au développement de la recherche, à la complémentarité des offres, et au rapport coût/bénéfice du dispositif des plateformes et des réseaux.

### **4. Nécessité de nouvelles plateformes**

Les développements technologiques, notamment l'automatisation, les développements digitaux, électroniques, optiques (lasers), vision, etc., ont profondément modifié les sciences expérimentales et numériques en quelques décennies. L'efficacité, la précision et la reproductibilité s'en sont trouvées considérablement améliorées. Ce progrès a un coût conséquent. Les plateformes et les réseaux répondent au besoin de mutualisation des moyens.

Au niveau expérimental, bon nombre de systèmes qui sont élaborés à partir de ces évolutions, ne sont pas abordables par un chercheur ni par un laboratoire. Ce même constat a permis de mettre en œuvre les plateformes, néanmoins il existe bon nombre d'outils qui ne nous semblent pas être mis en réseaux ou en plateforme mais qui pourrait le mériter.

Comme on l'a vu en partie I pour les sections, de nouveaux réseaux pourraient être mis en place autour des logiciels et des bibliothèques associées aux analyses et traitement des données. Le libre accès en particulier à certaines bibliothèques ou logiciels de simulation (Python, OpenFoam, etc.) pourrait permettre et nécessiter une utilisation plus coordonnée et efficace. Même si localement les services informatiques prennent en main leur installation « à la demande » une analyse de ces besoins pourrait être menée afin qu'une réponse plus globale y soit donnée.

De même l'avènement des techniques vidéo (PIV, PTV, rendu de surface, etc.) et électroniques (capteurs/récepteurs) nécessiterait des plateformes de soutien pour le traitement et l'analyse des données qui sont issues de leurs utilisations mais aussi pour un support à leur adaptation à tout type de configuration expérimentale.

La diversité des architectures disponibles pour les traitements et les analyses (GPU, parallèle, etc.) pourrait aussi justifier un support pour l'optimisation du portage des codes, bibliothèques, etc. mais aussi pour utilisation adaptée à tel ou tel domaine, que ce soit pur des actions numériques ou expérimentales.

**Enfin au sein des laboratoires de l'institut existe un grand nombre de souffleries et autres canaux qui ne sont pas de taille suffisante pour bénéficier de l'appellation TGIR mais qui pourrait bénéficier d'une mise en réseau pour faciliter l'accès à leurs spécificités propres. Ici, à l'opposé d'une démarche de normalisation, il conviendrait de recenser les particularités et les spécificités, et d'évaluer dans une démarche prospective leur intérêt pour la physique des phénomènes étudiés au regard des avancées métrologiques, théoriques et numériques attendues. L'institut doit aller au-delà de leur utilisation actuelle qui peut n'être attaché qu'à un chercheur ou une équipe portée vers d'autres objectifs ou simplement amener à s'éloigner de l'installation (retraite, etc.).**

## **F. Interdisciplinarité : comment et où la mettre en œuvre ?**

L'interdisciplinarité a été portée par le CNRS dans le cadre de son dernier COP (Contrat d'objectifs et de Performances 2019-2023 du CNRS). Le recrutement de chercheurs et chercheuses au sein des CID (réflexions sur les CID en annexe A), les actions de la MITI (bourses 80PRIME, réseaux métiers, etc.), les interactions inter instituts avec la mise en place des Réseaux de métier, les GDRs (OMER, HAPPYBIO, MEPHY, ...) et les PEPRs, sont des moyens qui ont permis de faire progresser la recherche pluridisciplinaire inter-institut. En dehors du Top Down il peut être intéressant pour l'institut que ces GDR « interdisciplinaires » puissent être initiés par un ensemble de chercheurs. Pour cela il serait bon que l'INSIS élabore un ensemble de **marqueurs (potentiellement variables en fonction des disciplines en jeu) qualitatifs et quantitatifs a minima nécessaires (Masse Critique, etc.).**

L'INSIS réunit de nombreuses équipes impliquées dans des travaux interdisciplinaires par des études de systèmes complexes à la croisée des disciplines (climat, océan, biologie, chimie, physique, etc.), et leur intérêt se positionner sur les enjeux environnementaux, économiques et sociétaux. Les interfaces s'opèrent entre thématiques d'une même section mais aussi entre les sections de l'institut et d'autres instituts. Les exemples sont nombreux et repris dans les sections précédentes : optique et thermique pour les fours solaires, chimie et transferts réactifs pour la cristallisation ou la polymérisation, mécanique des fluides et physique pour des systèmes nano/micro fluidiques, génie des procédés, thermique et biologie (photo-bio réacteur, etc.) plasmas et énergie (Photovoltaïque, ITER, etc.), plasmas et rayonnements électromagnétiques pour la radiothérapie, stérilisation et décontamination .... Cette liste n'est pas exhaustive mais révèle la très grande diversité des domaines explorés. Le génie des procédés occupe une place particulière car par essence pluridisciplinaire.



Les moyens humains et techniques pour porter l'interdisciplinarité au sein des unités de recherche de l'INSIS sont variés : il est possible à de très grandes unités de recherche (LAAS, FEMTO ST, PPRIME, TBI, etc.) réunissant en interne les capacités de relever les défis de l'interdisciplinarité et à des unités de tailles plus réduites de privilégier des collaborations avec d'autres unités, instituts ou/et organismes (INRAe, CEA, INSERM...)

Les CID jouent des rôles majeurs pour favoriser des recherches émergentes avec un haut potentiel de recrutement. Leur avenir et pérennité pour assoir l'avenir des chercheurs recrutés et des unités associées sont à considérer avec attention. Il faut anticiper l'après CID pour que les chercheurs évalués dans leur section principale le soient en fonction de critères d'interdisciplinarité bien énoncés. Il est important d'anticiper la valorisation/reconnaissance des travaux interdisciplinaires pour l'évaluation des chercheurs et des unités. Le nombre de recrutements récents et les coloriages de postes associés au domaine Santé/Vivant à l'INSIS restent faibles à ce jour.

Les bourses 80PRIME sont des outils importants de l'interdisciplinarité dont la méthodologie d'attribution mériterait d'être clairement explicitée. Cet outil top-down doit permettre d'enclencher une recherche plus soutenue à l'interface entre 2 instituts sur des sujets émergents à fort potentiel. L'expression des méthodes et critères mis en place lors des choix de sujets, sélection des unités et candidats méritent d'être mieux explicités auprès de la communauté. Comment l'institut gèrera-t-il d'éventuelles suites (dépendantes probablement d'un autre institut qui n'a pas forcément la même politique) ? Un chercheur a souvent besoin de voir les moyens potentiels disponibles à termes s'il veut projeter les objectifs de sa recherche. Au-delà de l'émergence (80PRIME par exemple) les supports sont dépendants d'un grand nombre de degrés d'évaluation. La mise en place d'un GDR ou d'une CID le sont pour des cas bien établis. **Entre ces deux extrêmes un ensemble de moyens/supports progressifs doit être tracé et visible par les chercheurs, pour qu'un sujet émergent puisse potentiellement perdurer.**

Certaines activités interdisciplinaires sont soutenues par des AAP (MITI, Europe, etc.). Le pilotage de la recherche par le plan de relance 2030 (PEPR) a pu soutenir cette tendance. Une difficulté pour l'INSIS, est alors de maintenir un socle de recherche fondamentale à un niveau suffisant pour qu'il continue à être au plus haut niveau. **Il y a donc une** attention particulière à maintenir pour préserver un équilibre **entre disciplines fondamentales et interdisciplinarité**. L'interdisciplinarité exige d'associer de façon équilibrée la force des compétences disciplinaires et la capacité de travailler aux interfaces. Elle fait l'objet de travaux à la fois de recherche fondamentale et appliquée. L'évaluation des travaux interdisciplinaires reste un point d'attention à maintenir à la fois du point de vue de la valorisation/reconnaissance des carrières individuelles et des unités de recherche.

---

## III. Bilan et Rôle du CSI

---

On trouvera en [https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/csi\\_acc.htm](https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/csi_acc.htm) les missions et l'organisation des CSI des 10 instituts du CNRS. Parmi les missions statutaires, il est à noter que les avis concernant les divergences sont ensuite rendus au CS du CNRS qui reçoit les Directeurs d'Institut pour travailler et émettre un avis.

### A. Travaux du mandat 2019-2023, bilan du CSI

La direction de l'institut a initialement introduit un certain nombre de sujets auprès du conseil afin qu'il s'en empare. Les discussions initiales ont conduit à la création de groupes de travail (GT) dédiés à la Fabrication additive, l'Intelligence Artificielle, au Développement Durable, à l'**Ingénierie** verte et le Vivant. A l'occasion du changement de mandat du Comité National en 2020, deux questions principales se sont posées au sein du CNRS à l'attention de toutes les instances de Conseil : le renouvellement des mots clefs des sections et la création/disparition des CID (Commissions Interdisciplinaires). Si les mots clefs ont été discutés, au sein du CSI, en fonction des propositions des sections (qui étaient les mieux à même de connaître l'état des sections), les discussions autour de l'interdisciplinarité ont eu pour origine les discussions au cours des réunions de la C3N et de la CPCN auxquelles le président du CSI a pris part. Cela a donné naissance à un travail sur l'interdisciplinarité qui apparaît dans le rapport du CSI (partie II-F et Annexe A) et à deux avis sur les contours et mots clefs des sections et la création de CIDs (<https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/insis.htm>). Une partie du travail sur l'interdisciplinarité a été discutée lors de séances de travail avec le GT de l'INP lors du questionnement du devenir de la CID54 (<https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/inp.htm> puis [Recommandation du 01 juillet 2020](#)) et du CS du CNRS (<https://www.cnrs.fr/comitenational/cs/recomman.htm> puis [Recommandations du 8 juillet 2020](#)). Il est à noter que le président du CSI a participé à toutes les réunions de la C3N (La Coordination des responsables des instances du CoNRS) et a de ce fait participé à l'élaboration ou/et au vote de chaque [motion ou avis](#) de la communauté durant la période de son mandat (2019-2023 inclus).

Le CSI INSIS s'est réuni régulièrement, a minima 4 fois par an, pour des sessions de travail sur 2 jours. En fonction des besoins les GT se sont réunis en visioconférence pour prolonger des séances de travail. Nous rappelons que le mandat du CSI a fortement été impacté par la crise du Covid. L'adaptation a dû se faire à l'aide essentiellement de réunions plus fréquentes en visioconférence.

Les séances du CSI ont été l'occasion d'échanges avec le Directeur de l'institut (Jean-Yves Marzin puis Lionel Buchaillot) membre de droit du CSI. Chaque séance a permis au Directeur de faire le point sur l'actualité de l'institut et du CNRS. Une séance de questions/réponses a suivi chacune des interventions de la direction. Les président(e)s de chaque section dépendante de l'institut (S8, S9, S10, S4, S7, S28 et CID54) ainsi que les DAS ont été invité(e)s à chaque réunion du CSI afin de permettre des échanges entre les 2 parties. La direction de l'institut a été libre d'inviter les chargés de missions ou autre personnalité afin d'exposer ce qu'elle estimait être nécessaire aux membres du CSI. Un représentant du CS du CNRS a en permanence été présent afin de relayer a minima nos questionnements auprès de cet organe du CNRS. Par ailleurs le CSI a rempli ses devoirs statutaires en particulier relatifs à la création/suppression d'entités sous tutelles CNRS au sein de l'INSIS, ceci afin de rendre un avis en cas de divergence entre la direction de l'institut et le comité National.

En fonction des questionnements du CSI, soit à la suite d'une réunion, soit conjointement à l'activité des groupes de travail, le CSI a reçu, sur invitation, des personnalités sur des sujets précis afin de nourrir sa vision (Annexe D).

Des temps forts ont marqué le travail et les discussions du CSI. On citera par exemple en début de mandat la production de la LPR et du COP (2019-2023, Contrat d'orientation et de Performances) du CNRS, ils ont orienté ce rapport final à défaut d'avoir pu émettre un avis pour chacun de ces sujets.

Enfin la dernière partie du mandat a été focalisée sur la partie prospective et l'élaboration d'un rapport associé. Elle a débuté en juin 2022.

Notre réflexion et notre production se sont appuyées sur un ensemble de textes comme les rapports de conjoncture des sections des deux mandatures précédentes, sur des rapports de laboratoire, etc. La diversité des membres du conseil scientifique et de leurs provenances est, nous l'espérons, un gage de recul et d'indépendance. Notre approche prospective a été inspirée de la méthode utilisée par l'INRAE (M. Olivier MORA, Direction de l'expertise, de la prospective et des études (DEPE)). Nous avons cherché à maintenir un équilibre laissant la place aux spécificités des domaines de recherche des sections de l'institut (Partie I), et à une partie transverse dans laquelle nous avons volontairement évité de produire des situations trop spécifiques aux thématiques. Néanmoins certaines problématiques transverses (comme les plateformes) peuvent être spécifiques à des spécialités scientifiques.

En fonction des spécificités des membres du CSI des Groupes de travail ont été constitués afin d'élaborer les différentes parties de ce rapport. L'annexe C détaille les contributions.

Chaque GT a invité un certain nombre de nos collègues responsables de laboratoire, de GDR, de PEPR, de plateformes, président(e)s de section, chercheur(se)s individuel(le), etc. à répondre à un questionnaire élaboré et adapté à chaque domaine thématique et contenant le questionnement relatif aux 2 parties. L'annexe B fournit le questionnaire utilisé pour amorcer la discussion. Des rencontres (essentiellement en visioconférence ont ensuite eu lieu pour affiner le questionnement par rapport à chaque invité.

**Nous remercions ici tou(te)s les collègues qui ont donné de leur temps pour répondre à ces questionnaires.** Nous avons conscience que le choix de nos invités a été fait en fonction des besoins sur des sujets que nous voulions approfondir. Il est évident que cela ne peut remplacer un exercice véritable de questionnement systématique de toute la communauté qui pour être efficace nécessiterait un temps long dont le CSI ne disposait pas (**la contribution des membres du CSI étant un temps additionnel supplémentaire à dégager**).

Nous remercions aussi les présidents de sections pour les discussions et avis qu'ils ont pu émettre.

Enfin il est à noter que la Direction a mis en place en 2023 avec la nomination du nouveau directeur d'Institut, Lionel Buchailot, un exercice de prospective, différent a priori de celui du CSI. Il a été présenté au CSI comme un nouvel organe en capacité de donner à l'institut les éléments de réflexion pour nourrir une réponse aux potentiels AAP (type PEPR entre autres) qui pourraient être publiés. La direction sous la responsabilité de Karam Sab a constitué 5 groupes d'experts afin de travailler sur la prospective de façon indépendante pour la S8, la S9, la S10, la santé, le DD. Après discussion entre CSI et direction il a été décidé qu'un membre du CSI pourrait être présent aux discussions d'entrée et de sortie de ces GT. Pour certaines sections, les membres du CSI qui ont pris part à ces GT ont finalement été invités à suivre toutes les réunions.

---

## IV. Propositions sur l'évolution du fonctionnement du CSI.

---

Les propositions que nous pouvons faire ici ne sont pas exhaustives et sont relatives à notre expérience de mandature. Ainsi il nous semble important :

- de garder la continuité des actions entre une mandature et la suivante afin d'éviter les écueils de base. A minima une réunion/discussion devrait avoir lieu entre les membres du nouveau CSI avec une représentation de l'ancien.
- que la direction, même si elle n'est pas toujours d'accord avec les recommandations du CSI, lui donne les moyens d'exprimer ses rapports, ses avis par des liens au site officiel de la direction qui aille au-delà d'un simple renvoi au site de la SGCN (qui ne permet pas forcément d'exprimer la vie du CSI (réunion en cours, invités, etc.).
- que le CSI ai accès à la liste mail (possiblement filtrable) des différents acteurs de l'institut (DU, chercheurs, AI, etc.) afin de transmettre ses questionnements variés et divers.
- que tout élément de prospective proposée à l'analyse par la direction soit discuté en amont de toute autre analyse afin d'éviter les doublons dans ce type de travail, par la direction et le CSI.

---

## V. Remerciements

---

Le CSI remercie tout spécialement les différent(e)s assistant(e)s de la SGCN qui ont œuvré(e)s tout au long de cette mandature afin de nous aider dans notre tâche : Nicolas CLAUDON(2019), Natalia RADANOVIC(2019), Isabelle VUILLAUME(2020/2022) et Lilas GHANEM(2022/2023).

---

## VI. Annexes

---

### A. Interdisciplinarité : Réflexions Générales sur les CIDs et l'interdisciplinarité

#### 1. Place de l'interdisciplinarité au sein des instituts, chercheurs et évaluation

Dans le cadre de l'interdisciplinarité via les CIDs les premières questions sont :  
Quel est le problème ? Comment allez-vous le résoudre ?

Les réponses doivent tenir compte du projet chercheur sans que cela se fasse au détriment de son expertise.

Une fois recruté en CID il faut que les chercheurs conservent une chance d'évoluer à même niveau que les autres chercheurs (carrière mais aussi moyens) au sein de leur laboratoire :

- En dehors des CIDs, au sein des **sections « classiques » des instituts** (chaque chercheur CID maintient tout au long de son appartenance à la CID une section « principale » de rattachement) **doivent exister des critères d'évaluation explicites liés à l'interdisciplinarité. Cela doit comporter la prise de risque, le déficit initial de cadre existant, etc.**
- **L'interdisciplinarité pourrait être portée à terme par des ponts structurels entre disciplines et pas seulement par des chercheurs. On pense à des laboratoires transverses (virtuels) par exemple, potentiellement dématérialisés. L'avantage de ce type de structure dynamiserait l'existence d'une communauté qui n'est pas soutenue par un comité national homogène et dont les objectifs sont sous-tendus par les instituts dont sont issus ses membres.**

Rq : Un tel « laboratoire » pourrait être dans la continuation, l'extension d'un (ou des) GDR(s) pré-création CID mais aux objectifs précisés, voire étendus.

#### 2. Les outils

Un deuxième sujet important est relatif à des objectifs initiaux d'une CID thématique de développer des outils (théoriques, expérimentaux, numériques ou de développement de modèles) et leur pérennisation.

Développer au travers d'une section « classique » des outils dédiés à une telle thématique hors de son périmètre nécessiterait une dynamique (chercheurs et moyens dédiés) supplémentaire de celle nécessaire pour conduire conjointement ses propres objectifs de recherche thématique. Une telle section perdrait aussi beaucoup d'énergie à aller ensuite à l'aide de ces outils vers des applications potentielles (pour la thématique de cette CID) et encore plus pour disséminer ces outils vers les sections hors institut (des autres instituts possiblement partenaires de la CID thématique). La CID prend alors tout son sens.

Mais pérenniser ces outils nécessite de se nourrir régulièrement des fondamentaux (qui ont été nécessaires pour les mettre au point) pour adapter, améliorer, etc. Ces fondamentaux sont portés par les sections classiques d'instituts (optique, math, informatique, mécanique, ...) qui ont leurs propres dynamiques dont il s'agira de s'appuyer pour l'évolution des outils portés par la CID.

**Dans le cadre du reversement à terme d'une CID en section « classique » d'institut il est ainsi important d'évaluer quel est l'institut qui est le plus à même de maintenir et de faire évoluer ces outils.**

### **3. Structuration**

Si l'on préserve une CID sans qu'elle devienne une section classique, se pose la question du pilotage et de sa gestion. **Le CNRS peut mettre en œuvre une mission de gestion dédiée** (comme la MITI dont cela ne fait pas partie des missions) en capacité de piloter et de trancher sur les postes affectés. Les postes destinés à ces CID ne doivent pas être issus du contingent des instituts. **C'est au CNRS d'être à même de mettre des postes directement dans ces CID sans que cela soit un enjeu entre instituts.** C'est un véritable problème dans un temps de pénurie de poste. Durant leur existence, ces CIDs, pourraient être gérées au-dessus des instituts (transversalement aux instituts, car ces CID en émanent et elles y trouvent leurs objectifs de recherche). L'existence d'une masse critique seuil (supérieure à l'existante qui a permis la CID d'être créée) devrait justifier la création de ces ponts transverses qui peuvent aller au-delà du CNRS (par exemple bon nombre de projets proposés pour l'embauche de jeunes chercheurs de la CID 54 sont portés par l'INSERM, les Hôpitaux, etc.).

Un second point est la complexité du travail, chronophage pour les membres élus (comité national et CSI) qui siègent dans une CID. **Il faudrait des membres élus pour siéger spécifiquement dans la CID. Une autre possibilité est de choisir les membres qui siègent parmi des membres qui ont par le passé étaient élus (sections, CSI). Les modalités de ce choix devraient être contraintes, a minima, par les équilibres sous-jacents à la constitution des comités nationaux des sections classiques.**

Les CID doivent être transitoires et évoluer avec des objectifs de recherche fondamentaux au-delà des objectifs interdisciplinaires si elles sont destinées potentiellement à devenir une section « classique ». Ceci devrait éviter que les thèmes fondamentaux portés par des sections « classiques » ne soient déséquilibrés et ne subissent une baisse de moyens concomitante.

En dehors d'une MC seuil, un des critères de maturité d'une CID, à évoluer vers en section « classique », pourrait être sa capacité à générer ses propres thèmes (différents de ceux qui ont portés initialement la CID).

Si la création d'une section « classique », au terme de l'existence de la CID, n'est pas possible (pour des raisons de maturité, de MC, etc.), il y a nécessité de définir les règles (une méthode) pour que les objectifs, les thèmes, d'une CID, prennent fin de façon très régulière et soient alors transmises et rattachées à un ou plusieurs instituts au travers de leur sections « classiques » (qui doivent elles se nourrir des nouveautés créées par les CIDs). Cela enrichirait l'interdisciplinarité, portée par tout le CNRS (COP 2019-2023), au sein de chaque institut. La question du devenir de ses acteurs est à ce niveau une problématique même s'ils sont toujours portés par une section principale. Cette section principale doit en tenir compte dans ses critères d'évaluation.

### **4. Conclusions**

**Les thèmes des CIDs doivent être intégrés au sein des instituts à termes réguliers afin 1) de permettre de donner les moyens d'évolution aux chercheurs recrutés par la CID, 2) de pérenniser les acquis, quel que soit l'avenir de la CID. L'évaluation des chercheurs, au sein des sections classiques, doit dépendre de critères d'interdisciplinarité à définir (dans son contour et son intensité).**

**Il nous paraît primordial de mettre en place des règles de vie de l'interdisciplinarité au sein des instituts avant de questionner les CIDs existantes. Les temps de vie d'une CID doivent être : de stabiliser ce pourquoi elle a été mise en place, d'être motrice sur ces objectifs et enfin de**

**savoir se renouveler. Une masse critique seuil et la création de ponts transverses pourraient servir à définir ses limites temporelles.**

## **B. Questionnaire ayant servi à amorcer la discussion avec les invités pour l'élaboration de ce rapport (exemple ici adapté pour la S8):**

### **Questions CSI INSIS**

- 1) quels sont les impacts sur votre communauté :
  - a) du Développement durable ?
  - b) des biomatériaux et de la bioingénierie ?
  - c) des besoins de limiter la consommation d'énergie ?
  - d) des problèmes d'éthiques accrus (liens avec SHS, etc.) ?
  
- 2) quels sont les impacts sur votre communauté des nouvelles technos. (Hard, soft) :
  - a) FA ?
  - b) Nouveaux matériaux ? Qui pilote la demande d'utilisation : des propriétés pour une spécificité précise fixée par la recherche ou l'application ...
  - c) autres ?
  
- 3) quels sont les impacts sur votre communauté des enjeux sociétaux :
  - a) santé ?
  - b) environnement ?
  - c) autres ?
  
- 4) est-ce que votre communauté est touchée par les nouveaux paradigmes :
  - a) quantique ?
  - b) IA ?
  - c) Interdisciplinarité ? (Tendances majoritaire (santé, etc.), GDR à préconiser, etc.).
  - d) autres ?
  
- 5) quels sont les signaux faibles de votre communauté ?
  - a) expériences ? (Tailles, type, neuromorphisme, etc.)
  - b) nouvelles métrologies ?
  - c) numériques ? (Modélisation, etc.) liens avec capteurs, etc.
  
- 6) Part entre expérimental et numérique voire modélisation dans la communauté optoélectronique  
=> utilisation d'IA, base de données, utilisation HPC ?
  
- 7) Liens de votre communauté avec la spintronique ou les autres communautés électronique voir optique (gros laboratoires du domaine) ?
- 8) idem avec la biologie/le vivant ? Est-ce que cela pose de nouveaux problèmes d'éthiques ?
- 9) Quels sont les freins de développements ?
- 10) quels sont les axes principaux de la communauté opto-électronique ?
- 11) Quelles sont les principales plateformes de création matériaux (s'il en existe) ?
  - a) taille, b) manques, c) optimum ?
  
- 12) liens avec un PEPR ou GDR ?
- 13) dans votre communauté quels sont les principaux matériaux innovants ?
- 14) Existe-t-il des plateformes de caractérisation ?
  - a) taille, b) ont elles des métrologies manquantes, c) est-ce que l'accès est satisfaisant ?Quelles sont dans votre communauté les principales lacunes de la modélisation existante ?
- 15) Est-ce que vous pensez que la communauté développe ou participe aux enseignements nécessaires pour le passage des connaissances en optoélectronique ?



## **C. Constitution des GT du CSI pour ce rapport :**

Les listes ci-dessous sont indicatives. Au cours du processus d'élaboration et en particulier de relecture certaines parties ont pu être passablement reprises par des membres non initialement partie prenante de l'élaboration de la partie en question.

### Partie I

GT S7/S8 : D. Dragomirescu, N. Deltimple, R. Sommet, M. Frénéa-Robin, Y. Boucher, S.Simoëns.

GTS9 : C. Lavandier, C. Audoly, E. Petit, V. Michaud, D. Fabrègues, E. Leroy.

GTS10 : P. Gillon, E. Leroy, A. Michrafy, C. Jouve, H. Doreau, S. Simoëns.

GT Santé/Vivant : M. Frénéa-Robin, C. Legallais, C. Jouve, M.A. Teste, S. Simoëns.

### Partie II

Développement Durable : M. Frénéa-Robin, V. Michaud.

Ethique : M. Frénéa-Robin, V. Michaud, E. Petit, C. Legallais

IA : C. Lavandier, E. Petit.

(Rapport spécifique en cours de mandat: Christian Audoly, Yann Boucher, Denis Flandre, Catherine Lavandier, Cécile Legallais, Claude Pellet)

Fabrication additive : P. Gillon, E. Leroy, E. Petit, S. Simoëns.

(Rapport spécifique en cours de mandat : E ; Leroy, D. Fabrègues, S. Simoëns, E. Guazzelli, Y. Boucher, A. Michrafy, E. Petit)

Plateformes : M.A. Teste, S. Simoëns, E. Petit.

Interdisciplinarité : S. Simoëns.

## **D. Liste des invités du CSI au cours du mandat 2019-2023.**

Nous ne citons ici que les invités durant les séances plénières du CSI ainsi que celles pour l'élaboration des rapports spécifiques en cours de mandat sur la FA et l'IA.

Une quarantaine de personnalités ont été interrogées en plus pour l'élaboration de ce rapport durant la dernière année de mandature pour ce rapport de prospective.

Une dizaine d'événements récurrents ou non ont aussi été suivis tout au long de la mandature et qui ont nourri nos analyses (Journée des directeurs d'unité de l'INSIS, Journées DOR, Lancement de PEPRs, etc.).

Les présidents de sections actuels ont été sollicités pour l'exposé de leur vision sous le filtre du questionnaire (Annexe B) élaboré pour la prospective : S08 Marie-Cécile Perra, S09 Cino Viggiani, S10 Stéphane Popinet, CID54 Karine Anselme, S28 Tanguy Maurice, S04 Abdelmajid Taki, S7 Inbar Fijalkow. Nous remercions tous les invités permanents ou non qui ont donné de leur temps afin d'informer et de discuter avec les membres du CSI et nous nous excusons par avance pour les oublis.

2019-2023 :

Laurence Hartmann Directrice Adjointe Scientifique, Politique de sites.

Nolwenn Le-Pierrès, Laboratoire LOCIE, Université de Chambéry, VisioConférence.

Anne-Laure Ligozat, GDS Ecoinfo, VisioConférence.

Fabien Godeferd : Directeur Adjoint Scientifique : Fluide, procédés, plasmas, transferts.

Anne-Marie Gué, Chargée de Mission : Interdisciplinarité. Intervention Mission Ingénierie inspirée par la nature.

Dany Escudié : Présidente du CSI précédent, focus sur GDR et Fabrication Additive :

FLorient Lesage : CID 54.

Benoit Pier : DIST : Science Ouverte

Abdelilah Slaoui, Cellule Energie CNRS.

Martine Knoop : MIT.

Monique BERNARD, S28

Marie-Cécile PERA, S8  
Brigitte BACROIX, S4  
Laurent Falk, DU LRGP, Nancy.  
Mohamed Kaaniche, DU LAAS, Toulouse.  
Olivier Mora, INRAE – Direction de l'expertise, de la prospective et des études (DEPE).  
Michel De la bachelerie, Chargé de mission institut « Infrastructures de recherche » à l'INSIS  
Isabelle Sagnes PEPR Electronique/Questions CSI  
Serge Verdeyme PEPR 5G/Questions CSI  
IA :  
Denis Veynante : Mission Calcul-données, CNRS  
Mathias Quoy, ETIS UMR 8051, Cergy Pontoise  
Bernard Claverie, Ecole Nationale Supérieure de Cognitique/ENSC - Bordeaux-INP - CIH Group,  
IMS Lab. UMR 5218, Bordeaux  
Alain Cappy, IEMN-UMR 8520, Lille  
Francesco Chinesta, CNRS - UMR 8006, Nantes  
Visioconférence du 19 juin 2020 : Jean-Michel Tran, Naval Group  
Visioconférence du 6 janvier 2021 : David Bol, UC Louvain  
FA :  
M. Patrice PEYRE (CNRS, Laboratoire Procédés et Ingénierie en Mécanique et Matériaux,  
PIIM, UMR 8006),  
M. Thomas JOFFRE (Centre Technique Industriel de la Plasturgie et des Composites IPC)  
M. Christophe MARQUETTE (CNRS, Institut de Chimie et de Biochimie Moléculaires et  
Supramoléculaires, ICBMS, UMR 5246)  
Consultées hors séances plénières :  
M. Antoine LE DUGOU, (Université de Bretagne Sud, Institut de Recherche Dupuy de Lôme, UMR  
6027),  
M. Benoit FURET (Université de Nantes, Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes, LS2N,  
UMR 6004),  
M. Alain BERNARD (Ecole Centrale de Nantes, Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes,  
LS2N, UMR 6004)  
M. Jean-Yves HASCOËT (Ecole Centrale de Nantes, Institut de recherche en Génie Civil et Mécanique,  
GeM, UMR 6183)  
M. Mameth BOUTHOU (CETHIL, INSA de Lyon).