

SECTION 10

MILIEUX FLUIDES ET RÉACTIFS : TRANSPORTS, TRANSFERTS, PROCÉDÉS DE TRANSFORMATION

Composition de la section

Stéphane POPINET (président de section); Tatiana ITINA (secrétaire scientifique); Bertrand CINQUIN; Catherine COLIN; Laurent CORDIER; Estelle COUALLIER; Virginie DARU; Nadia EL KISSI; Jean-Marie FÉLIO; Guillaume GALLIERO; Roger GARCIA; Bertrand GARNIER; Irina GRAUR; Eva KOVACEVIC; Alexandre LABERGUE; Frédéric LEFÈVRE; Christophe MÉNÉZO; Jérôme MORCHAIN; Karim OUARAS; Laure PILLIER; Laurent SELLE; Annemie VAN HIRTUM.

Introduction

Les « milieux fluides et réactifs » sont au cœur d'une large gamme de thèmes de recherche fondamentale et appliquée, en lien avec de nombreuses disciplines dont la mécanique, la physique, la chimie, les mathématiques appliquées, les sciences de la Terre et de l'Univers, de la biologie et de la santé. Ils jouent également un rôle majeur dans les grands enjeux sociétaux de ce siècle : la transition écologique – en particulier énergétique – dans un contexte de changement global et la construction d'une économie durable respectueuse de l'environnement.

Cette diversité thématique s'accompagne d'une grande variété dans les pratiques et les approches utilisées par les chercheurs, ingénieurs et techniciens de la section, allant des développements les plus théoriques et fondamentaux jusqu'aux applications industrielles les plus concrètes. Cette alliance entre une recherche fondamentale de pointe et son utilisation pratique, en lien avec ses partenaires industriels, constitue indéniablement une des forces de la section. Elle reflète en cela le rôle central que joue le CNRS et les UMR pour développer l'interdisciplinarité et l'intégration d'approches et de communautés variées, cruciales pour une science moderne au meilleur niveau international.

Rendre compte de l'activité des quelques 400 chercheurs, 2500 enseignants-chercheurs, 800 ingénieurs et techniciens et 80 laboratoires associés à la section 10 en 18 pages est clairement une tâche difficile. Nous avons choisi ici de suivre la division traditionnelle de ces activités en 5 grandes disciplines : mécanique des fluides (environ 45% des chercheurs), thermique et énergétique (environ 10%), combustion et systèmes réactifs (environ 10%), plasmas froids et lasers (environ 20%), génie des procédés (environ 15%). Il est important de souligner que ces catégories, si elles reflètent souvent une structuration réelle au niveau national ou international, présentent de très larges recouvrements thématiques, caractéristiques de l'interdisciplinarité et de l'ouverture associées à la section.

Nous tenons également à remercier les quelques 300 chercheurs, enseignants-chercheurs, ingénieurs et techniciens ayant répondu à la consultation qui a permis d'enrichir ce rapport.

I. Mécanique des fluides

La mécanique des fluides s'est historiquement développée autour de considérations pratiques soulevées par l'hydraulique, puis au siècle dernier par l'hydrodynamique et l'aérodynamique lorsque les problématiques liées au transport et à l'énergie ont pris de l'importance. La mécanique des fluides est par nature fortement connectée aux autres grandes disciplines de la section 10 : la thermique et l'énergétique, les plasmas, la combustion et le génie des procédés. Depuis peu, elle joue un rôle de plus en plus important dans le domaine du vivant.

Une multitude de situations physiques, allant de l'échelle du nanomètre (nano-/microfluidique) aux échelles planétaires et astrophysiques, sont étudiées avec les outils et les concepts de la mécanique des fluides. Ces applications ont pour socle commun les

équations de Navier-Stokes dont nous avons célébré le bicentenaire en 2023. L'existence et l'unicité d'une solution régulière de ces équations demeure par ailleurs un problème fondamental de la physique et des mathématiques.

La mécanique des fluides est une discipline au cœur des enjeux sociétaux actuels. Elle intervient dans cinq des six défis sociétaux identifiés par le CNRS : changement climatique, intelligence artificielle, santé et environnement, territoires du futur, transition énergétique. Il existe des liens forts avec d'autres sections du Comité national (principalement les sections 2, 5, 9, 11, 41) et d'autres instituts (CNRS Physique, CNRS Mathématiques, CNRS Chimie, CNRS Terre & Univers, CNRS Nucléaire & Particules, principalement). Les thématiques de recherche couvrent des aspects fondamentaux d'ordre académique jusqu'aux applications en lien avec le milieu industriel.

Les développements récents ont été fortement marqués par les progrès dans les techniques expérimentales (visualisations par caméras ultrarapides, tomographie PIV/PTV/rayons X 3D résolue en temps, suivi de particules, PLIF pour la température, mesures acoustiques ou RMN pour les milieux opaques, etc.) et les moyens de calcul (centres nationaux, codes open source, maillages adaptatifs, calcul parallèle et GPU) permettant d'observer et de caractériser les écoulements à des échelles toujours plus fines.

Ces évolutions ont ouvert dans la dernière décennie de nouvelles possibilités autour de l'utilisation de données massives pour développer de nouveaux modèles et algorithmes plus performants allant de l'accélération des calculs à la prise de décision, en temps réel si possible. De nombreuses pratiques sont ainsi devenues « pilotées par les données », l'objectif étant de combiner au mieux connaissances a priori et apport de l'intelligence artificielle (apprentissage profond, symbolique, neuro-inspiré, etc.).

A. Structuration et organisation de la communauté

L'effectif total des chercheurs et enseignants-chercheurs en mécanique des fluides est estimé à environ 850, auxquels il faut ajouter une centaine d'ingénieurs-chercheurs issus d'autres organismes ou de groupes industriels (CEA, EDF R&D, ONERA, IRSN, IFSTTAR, Météo France, ADEME, INRAE, IFPEN, IRD, etc.). Les chercheurs de la discipline proviennent principalement du domaine des sciences pour l'ingénieur. Les chercheurs CNRS dépendent principalement de la section 10 du CoNRS, et les enseignants chercheurs de la section 60 (et 62) du CNU. De nombreux laboratoires ont une thématique principale centrée autour de la mécanique des fluides. Par ordre décroissant du nombre de chercheurs de la section 10 affectés, citons : LMFA, Pprime, LEGI, IMFT, IRPHE, IUSTI, MSC, FAST, LADHYX, PMMH, d'Alembert, I2M, etc.

Contrairement aux autres disciplines de la section, il n'existe pas de société savante fédérant l'ensemble de la recherche en mécanique des fluides. La discipline est donc souvent associée à la mécanique des solides, que ce soit à l'échelle française (AFM), européenne (Euro-mech) ou internationale (IUTAM). La communauté des mécaniciens des fluides a toujours été très présente dans ces sociétés savantes, très représentée dans les congrès (European Fluid Mechanics Conference, European Turbulence Conference, ICTAM) et très active dans l'organisation de mini symposiums (Euromech, Ercoftac, IUTAM). Les chercheurs français sont par ailleurs le deuxième contingent de participants au congrès de l'APS Division of Fluid Dynamics (DFD) organisé annuellement.

Cet accroissement de la présence et de la visibilité des chercheurs français à l'international s'est produit en particulier dans le cadre des développements réalisés autour de la physique non-linéaire (systèmes dynamiques, théorie du chaos, instabilités hydrodynamiques, etc.), de la physique de la matière molle (hydrodynamique physique, milieux granulaires, etc.) et

de la simulation numérique. Les chercheurs de la discipline sont hautement reconnus à l'international. Pour preuve, depuis 2018, un tiers des *Fluid Mechanics Fellows* de l'Euro-mech a été attribué à des chercheurs français. Une quinzaine de nos chercheurs est devenue *APS DFD Fellow* en vingt ans. Nous avons également quatre éditeurs associés à *Journal of Fluid Mechanics* (JFM), dont les éditrices en chef des *JFM Rapids* et *JFM Perspectives* et quatre éditeurs associés à *Physical Review Fluids*.

La mécanique des fluides entretient et développe de fortes interactions avec de nombreuses disciplines. Sans chercher à être exhaustif, citons :

- les mathématiques appliquées, autour des équations aux dérivées partielles, des singularités des solutions, des méthodes numériques, de la propagation des incertitudes ;
- la mécanique des solides et les matériaux, autour des phénomènes d'interactions fluide-structure, des milieux granulaires cohésifs ;
- les sciences de l'Univers, autour des interactions océan-atmosphère, des risques naturels, de la dynamique du manteau terrestre, de l'accrétion des planètes ;
- les sciences de la vie, autour des écoulements en présence de cellules déformables et de tissus mous, de la mobilité des micro-organismes, de la circulation cérébrale, de la croissance des plantes ;
- la physique et la physicochimie, autour des fluides complexes, des milieux granulaires, des mousses, des surfactants.

Cette ouverture vers d'autres disciplines est conjointe aux liens essentiels entretenus avec les autres thématiques de la section 10, comme par exemple :

- la combustion, *via* le partage de méthodes et codes de simulation, l'étude de la stabilité des flammes, de l'atomisation, de la prévention des incendies *via* les modélisations météorologiques ;

- le génie des procédés, *via* des études sur la dynamique et le mélange dans les écoulements multiphasiques, la rhéologie, les interfaces avec surfactants ou les solutions colloïdales ;
- les plasmas, *via* le partage de méthodes de simulations pour les plasmas de décharge ou l'étude de la propulsion ionique ;
- la thermique, *via* l'analyse des transferts et des changements de phase en écoulement.

B. Thématiques étudiées – enjeux et développements

Les problèmes traités en mécanique des fluides couvrent une gamme considérable d'échelles spatiales et temporelles, ainsi que des applications très variées. On peut arbitrairement classer ces activités selon les huit axes suivants :

- **Turbulence** (phénoménologie, modélisation, mélange, particules)

La recherche en turbulence va de la compréhension physique des phénomènes fondamentaux (structure, spectres d'énergie, lois d'échelle, transitions de phase) à la modélisation mathématique et numérique, en passant par l'analyse du mélange et du transport, avec ou sans particules.

La modélisation de la turbulence, très liée aux problèmes de l'ingénierie, vise à développer des méthodes performantes pour prédire le comportement des écoulements turbulents. Les modèles classiques (k - ϵ , LES) ont été complétés récemment par des méthodes de modélisation réduite ou reposant sur des arguments de stabilité (analyse en modes résolvants).

Le mélange et le transport dans les écoulements turbulents sont des aspects cruciaux pour de nombreuses applications, de la combustion aux processus géophysiques. Le couplage avec la dynamique de particules en suspension (solides ou liquides), leur

dispersion et leur agglomération joue également un rôle déterminant dans ces applications.

- **Écoulements compressibles** (super- et hypersoniques, gaz raréfiés, ondes de choc, aéroacoustique)

La recherche sur les écoulements super-/hypersoniques s'est développée principalement dans le cadre de l'étude des écoulements autour des avions supersoniques, des missiles (entrées d'air par exemple) et des véhicules spatiaux. Les chercheurs s'intéressent aux interactions onde de choc-couche limite ou ondes de choc-turbulence, ainsi que leur influence sur le mélange pour la combustion par exemple. Les travaux sur l'aéroacoustique se sont développés en particulier dans le cadre de la réduction des nuisances sonores liées au trafic aérien. La thématique des gaz raréfiés continue d'être au cœur des recherches pour les vols de satellites et, depuis quelques années, pour les simulations des impacts des débris spatiaux avec le développement de nouveaux modèles réduits en régime hypersonique raréfié.

- **Instabilité et contrôle** (transition à la turbulence, effets non-linéaires, modèles réduits, apprentissage)

Les recherches sur les instabilités et le contrôle des écoulements ont connu récemment un intérêt croissant en raison de leur importance dans les industries du transport (automobile, aéronautique) et plus généralement l'ingénierie des systèmes (perturbations optimales par exemple).

Le rôle fondamental des études de stabilité (transition à la turbulence, réduction de traînée par relaminarisation, etc.) a été complété durant la dernière décennie par le développement de modèles réduits dynamiques (modes globaux, POD, etc.) utilisés à la fois pour expliquer les phénomènes physiques et comme modèles de contrôle des instabilités.

Une évolution majeure de cette thématique est l'utilisation récente de techniques d'apprentissage automatique : extraction non supervisée de modèles à partir des données

expérimentales ou numériques et apprentissage par renforcement pour le contrôle en boucle fermée.

- **Ondes et écoulements géophysiques** (hydrodynamique navale, océan et atmosphère, événements extrêmes, morphodynamique côtière)

Ces activités de recherche couvrent un large éventail allant de l'hydrodynamique navale et offshore à la circulation atmosphérique et océanique.

L'optimisation de la performance et de la sécurité des navires et des plateformes offshore, toujours importante, est maintenant complétée par le développement des énergies marines renouvelables, dans le cadre par exemple du GDR EOL-EMR.

Dans le contexte du changement climatique, les risques naturels associés aux événements extrêmes (tempêtes, inondations, tsunamis, etc.) font l'objet d'une attention particulière, que ce soit par leur modélisation physique et/ou statistique ou *via* le développement de modèles numériques couplés aux systèmes d'observation par assimilation de données.

Dans le domaine de la morphodynamique côtière, les chercheurs étudient les processus de transport sédimentaire, d'érosion côtière, de formations de bancs de sable et d'embouchures de fleuves pour comprendre les changements à long terme et pour aider à concevoir des stratégies de gestion côtière durable.

- **Interactions fluide-structure** (structures rigides ou souples, poro-élasticité, vol et nage)

Cette recherche vise à comprendre les mécanismes d'interaction entre les écoulements fluides et les structures, ainsi qu'à développer des méthodes pour prédire, optimiser et contrôler ces interactions dans une variété d'applications industrielles et environnementales.

Le détachement de tourbillons derrière un obstacle, et les couplages mécaniques induits (vibrations, résonance), est un problème

classique de mécanique des fluides, étudié autant pour des raisons fondamentales (mécanismes de transition) que pour des raisons pratiques de première importance (portance, propulsion ou manœuvrabilité, phénomènes induits par cavitation).

L'extension plus récente de ces approches aux structures souples, élastiques et poreuses a été motivée en particulier par l'étude de la nage et du vol chez les micro-organismes, zooplancton, poissons, insectes, oiseaux, ainsi que par l'optimisation énergétique des systèmes (minimisation de la traînée, extraction d'énergie).

- **Écoulements multiphasiques et interfaces** (thermohydraulique, microfluidique, bulles, atomisation, mouillage et glissement, milieux poreux)

Les écoulements multiphasiques caractérisent de nombreuses situations : atomisation de films liquides, déferlements de vagues, formations de gouttes, de bulles, phénomènes de rupture, coalescence, comportements collectifs. L'hydrodynamique, souvent turbulente, peut être couplée à des transferts de chaleur, de masse, et des rhéologies interfaciales complexes liées à la présence de surfactants.

Le GDR TransInter fédère une partie de la communauté scientifique et des partenaires industriels autour de différentes thématiques : films ruisselants en évaporation, instabilités, refroidissement de surface par jet impactant ou gouttes, ébullition, givrage, simulation des changements de phase liquide-vapeur.

Ces études impliquent souvent la compréhension de mécanismes à micro-/nano-échelle, où des effets non hydrodynamiques peuvent intervenir (mouillage, glissement, résistance interfaciale) et être mis en évidence par des mesures AFM, des simulations par dynamique moléculaire ou par la résolution des équations cinétiques. Ces thématiques, représentées en particulier au sein du GDR micro nanofluidique, rejoignent l'étude des milieux poreux et fracturés en lien avec leurs applications géologiques (stockage du CO₂ et H₂).

- **Fluides complexes et milieux divisés** (pâtes et boues, émulsions, milieux granulaires, gels, suspensions actives, mousses et poudres)

Les fluides complexes, très présents en génie des procédés, correspondent à des situations variées : fluides non newtoniens, milieux granulaires ou fibreux, écoulements de boues, émulsions, gels, etc. Un des enjeux scientifiques important est la définition de lois de comportement de type milieu continu (*via* les outils théoriques de la mécanique, de la physique statistique, des mathématiques appliquées) afin de répondre aux nombreuses problématiques d'ingénierie (industrie agroalimentaire, pharmaceutique) et environnementales (transport sédimentaire, érosion des côtes, avalanches, fracturation de la banquise).

- **Mécanique du vivant** (circulation du sang et des voies aériennes, morphogénèse, biomimétisme, végétaux, comportements collectifs, pathologies)

La recherche sur la mécanique du vivant combine des approches provenant de la physique, de la biologie, de l'ingénierie et des mathématiques pour étudier les systèmes biologiques à différentes échelles, de l'échelle moléculaire à l'échelle des organismes et des populations. Ces recherches ont des implications importantes dans de nombreux domaines, notamment la médecine, l'ingénierie, l'écologie et la biologie évolutive.

L'étude de la circulation des fluides biologiques et des pathologies afférentes (maladies cardiaques et respiratoires, maladie d'Alzheimer, etc.) sont ainsi un domaine important (GDR Mecabio). Au-delà du corps humain, la mécanique du vivant s'est plus récemment étendue à l'étude de la structure et de la croissance des plantes, à l'émergence et à l'adaptation de comportements collectifs complexes (bancs de poissons, fluides « actifs » biologiques), ainsi qu'aux applications possibles du biomimétisme en ingénierie.

C. Forces, faiblesses et recommandations

La mécanique des fluides en France présente à la fois des forces et des faiblesses, reflétant le paysage de la recherche et de l'industrie dans ce domaine. Voici une liste non exhaustive :

1. Forces :

- la France a une longue tradition dans le domaine de la mécanique des fluides, avec des contributions significatives de chercheurs français aux fondements théoriques et aux avancées expérimentales ;
- les chercheurs français collaborent activement avec des partenaires internationaux. La communauté nationale est perçue comme forte à l'étranger et nos chercheurs sont reconnus (en particulier *via* l'attribution de prix) ;
- la mécanique des fluides est souvent intégrée en France à d'autres disciplines scientifiques telles que la physique, l'ingénierie, les mathématiques appliquées, la biologie et la médecine, ce qui favorise une approche interdisciplinaire des problèmes complexes. La discipline est ainsi au cœur d'enjeux sociétaux majeurs (sciences environnementales et du vivant, notamment) et s'approprie des domaines émergents (sciences des données, quantique) ;
- les ressources nécessaires à la simulation numérique bénéficient de procédures d'appels à projets bien rodées, facilitant ainsi les attributions d'heure de calcul sur les méso-centres régionaux, nationaux (GENCI) ou Européens (Prace).

2. Faiblesses :

- la transition des résultats de recherche en mécanique des fluides vers des applications industrielles peut parfois être lente ou

limitée, en raison de barrières liées à la collaboration entre le monde académique et industriel ;

- bien que l’interdisciplinarité soit une force, elle peut également être un défi en termes de coordination et de collaboration entre différentes disciplines, nécessitant des efforts supplémentaires pour une intégration efficace des connaissances et des compétences ;
- les activités expérimentales lourdes (souffleries subsoniques et supersoniques, chambres anéchoïques, bancs de combustion et de turbomachines, bassins des carènes et bassins à houle, etc.) souffrent d’un manque de mise en réseau national ainsi que d’un sous-investissement chronique en personnel technique.

3. Quelques recommandations :

- la rédaction d’un rapport sur l’impact de la mécanique des fluides en France à l’image de ceux rédigés dernièrement au Royaume-Uni et aux Pays-Bas ;
- la création d’une société savante autour de la mécanique des fluides afin de focaliser les décideurs mais aussi les financements sur la mécanique des fluides en tant que telle et non seulement sur ses multiples applications.

II. Thermique et énergétique

La thermique traite de tous les phénomènes liés au transfert de la chaleur, une forme dégradée mais omniprésente de l’énergie. Elle vise la compréhension des phénomènes de transport de chaleur – et de masse associé – ainsi que leurs couplages, mais également leurs interactions avec de nombreux processus étudiés dans d’autres champs disciplinaires, comme la mécanique des fluides et des solides, la combustion, le génie des procédés, les plasmas, la physique fondamentale ou la chimie. La

thermique est intimement liée à l’énergétique qui s’intéresse à tous les aspects liés à la captation, à la conversion, au transport et au stockage de l’énergie quelle que soit sa forme.

Les domaines d’application de la thermique et de l’énergétique sont vastes et propices à l’interdisciplinarité. Ce sont en effet des sciences présentes dans la plupart des domaines de l’activité humaine « ressourcivore » : industrie, transports, bâtiment ou agroalimentaire. Elles trouvent donc naturellement leur place au cœur de CNRS Ingénierie. En plus des sciences de l’ingénieur, elles sont également intimement liées aux sciences de la Terre et de l’atmosphère et interagissent également avec les sciences du vivant et de la santé. Elles sont donc fondamentales pour comprendre les changements actuels et à venir et développer des solutions d’adaptation, d’atténuation et de régénération pour un monde en transition.

A. Périmètre et structuration

En raison de la variété et de l’étendue des applications comportant des problèmes thermiques, les échelles de températures, comme les échelles spatiales et temporelles, sont très larges et nécessitent généralement des développements théoriques, expérimentaux et numériques propres à chacun de ces domaines. Les plages de température explorées s’étendent en effet des applications cryogéniques à la fusion thermonucléaire en passant par toutes les échelles intermédiaires comme par exemple, le froid industriel, l’optimisation des cascades énergétiques autour de sites industriels (valorisation d’énergie/chaleur « fatale »), la thermique du bâtiment et de la ville, la gestion du foisonnement et de la flexibilité énergétique à l’échelle d’un territoire, le refroidissement de l’électronique, la thermique de la mise en forme et des assemblages ou la thermique des milieux réactionnels. Les échelles spatiales étudiées s’étendent quant à elle de la micro-/nanothermique à la thermique des zones urbaines ou plus étendue mixant

ruralité/urbanité jusqu'à la thermique du système climatique planétaire ; elles impliquent également de vastes échelles temporelles variant de la picoseconde à des centaines d'années.

Enfin, les milieux d'études présentent également une très grande diversité, les transferts de chaleur pouvant s'effectuer au sein et à l'interface des solides, des liquides ou des gaz, avec ou sans changement d'état, dans des milieux dispersés, réactifs, agressifs, en l'absence de champ gravitationnel ou en présence de fortes accélérations, etc. Ainsi, même si les lois fondamentales de la thermique sont connues depuis longtemps aux échelles macroscopiques – ce qui n'est pas le cas aux plus petites échelles, où de nouveaux comportements sont encore observés et analysés – leur étude dans ces contextes très différents et en géométrie complexe nécessite de développer des méthodes d'observation, d'expérimentation et d'analyse particulières qui constituent généralement l'originalité des nouveaux développements.

Face à une telle diversité de domaine d'études, il est impossible de présenter de manière exhaustive l'ensemble des activités dans ce rapport. Le dynamisme ou l'importance de certaines thématiques de recherche peut s'apprécier à travers les fédérations de recherche (FR) ou les groupements de recherche (GDR) du CNRS dans lesquels elles s'intègrent, ainsi que les groupes thématiques des sociétés savantes. En France, la Société française de thermique (SFT) fédère depuis plus de 60 ans les activités théoriques et appliquées en lien avec la thermique. Elle organise un congrès annuel et des journées thématiques qui couvrent l'essentiel des thématiques de la discipline. Au niveau international, la communauté est notamment structurée par l'ICHMT, l'AIHTC ou le comité Eurotherm. La thermique est également représentée au sein de l'Association française de mécanique à travers son groupe Thermomécanique copiloté par la SFT. L'énergétique fait partie de groupes thématiques dans différentes sociétés savantes comme la SFT, mais également la SFGP ou encore au sein de l'Alliance nationale de coordination de la recherche pour

l'énergie (ANCRE). Par ailleurs, de nombreuses associations professionnelles existent sur des thématiques en lien avec la thermique et l'énergétique (AFF, GRETh, SFEN, etc.), ce qui montre la forte portée applicative des recherches dans ces disciplines.

B. Focus sur quelques thématiques structurantes

La communauté du rayonnement thermique – structurée en GDR depuis de nombreuses années – s'est associée depuis 2019 à des acteurs issus de la physique de la matière condensée et des sciences des matériaux au sein du GDR TAMARYS, afin d'explorer des sujets d'étude mettant en œuvre des matériaux fonctionnalisés, notamment le solaire à concentration, la rentrée atmosphérique, la récupération et le stockage de chaleur haute température et le contrôle radiatif des systèmes et des procédés. Les axes de recherche visent notamment à caractériser, identifier et modéliser les propriétés optiques et radiatives et l'interaction rayonnement matière, à développer des matériaux avancés à propriétés radiatives optimisées ; ils concernent également des nouveaux développements méthodologiques et numériques à l'échelle des systèmes et des procédés. En dehors de TAMARYS, plusieurs laboratoires travaillent au développement de moyens d'essais permettant de mesurer des propriétés thermophysiques à haute température de matériaux souvent de plus en plus complexes (anisotropes, poreux ou semi-transparentes). De manière plus générale, le succès de l'école thématique METTI (8^e édition en 2023) montre le besoin toujours important de formation sur la métrologie thermique et son exploitation par techniques inverses.

La communauté de la thermique aux petites échelles est également structurée en GDR depuis de nombreuses années. Ses activités s'inscrivent actuellement dans le GDR interdisciplinaire NAME, qui vise à développer et exploiter les spécificités des nanomatériaux pour la récupération, la conversion, le

transport et le stockage de l'énergie. Les recherches portent notamment sur la caractérisation et l'application des propriétés de transport des matériaux par voies théoriques, numériques et expérimentales. Un axe émergent concerne la thermodynamique aux petites échelles. Les recherches sur la conversion thermophotovoltaïque ont un lien important avec TAMARYS et NAME et sont structurées autour de l'équipe-projet TREE. Pour les fluides, les transferts de chaleur et de masse sont l'un des 6 thèmes du GDR micro et nano fluidique.

Les activités de recherche expérimentales et numériques autour du transfert aux interfaces fluide-fluide, fluide-solide avec ou sans changement de phase liquide vapeur (évaporation, ébullition, condensation) ou liquide-solide (givrage) sont au cœur du GDR TRANSINTER à l'interface entre la mécanique des fluides et la thermique. Ces activités sont aussi l'une des 6 thématiques du GDR MFA pour les recherches en lien avec le spatial. Des développements métrologiques importants – en particulier optiques et spectroscopiques – sont également au cœur de ces différentes thématiques.

Concernant les énergies décarbonées, FedEsol (FR) fédère 33 laboratoires sur les sujets liés à la conversion de l'énergie solaire. Elle est structurée en quatre axes principaux et un axe transversal dont les thématiques concernent notamment : la prédiction de la ressource solaire, le contrôle et la durabilité des systèmes de conversion, l'intensification des transferts couplés dans les récepteurs et réacteurs solaires haute température pour la production de carburants et d'électricité, l'intégration et le contrôle du stockage modulaire et multi-échelle pour gérer la variabilité de la ressource, le développement d'approches pluridisciplinaires pour la conception de photoprocédés solaires à l'échelle, la gestion du foisonnement de production d'électricité photovoltaïque en milieux urbains ainsi que l'impact des conditions opérantes sur les performances de ces systèmes.

C. Thématiques émergentes en lien avec le changement global

Plusieurs journées thématiques de la SFT montrent une amorce de structuration d'activités de recherche autour des problématiques liées au changement climatique, comme la thermique atmosphérique et son application à la mesure et à la modélisation de la température radiante en milieu urbain ou la problématique des incendies, même si cette dernière dépasse le seul cadre du changement climatique. Les travaux en lien avec la thermique de la ville sont en forte augmentation. Ils traitent de l'étude du climat urbain ou des solutions d'adaptation au changement climatique, basées ou non sur la nature. L'existence des PEPR VDBI, et dans une moindre mesure SOLU-BIOD illustre l'importance croissante de cette problématique.

Même si les travaux visant à optimiser les systèmes énergétiques ne peuvent pas être considérés comme émergents, c'est l'optimisation de leur intégration aux réseaux (chaleur, électricité, gaz) qui est de plus en plus recherchée, en particulier par le développement de méthodes basées sur l'analyse multicritère (exergie, ACV, etc.). Cette optimisation intègre la valorisation de la chaleur fatale – par exemple à l'aide de pompes à chaleur basse et haute températures – ainsi que les problématiques de flexibilisation dues à l'intermittence et donc les besoins de stockage associés (batterie, chaleur, hydrogène, etc.). Ces différentes problématiques trouvent leur place dans les PEPR TASE, H2, Spleen, Recyclage ou sousSol.

III. Combustion et systèmes réactifs

La thématique de recherche « combustion et systèmes réactifs » concerne l'étude de la combustion contrôlée (moteurs, chaudières, fours, etc.) et incontrôlée (feux, incendies, explosions) et ses impacts environnementaux (émissions de GES, pollution atmosphérique, qualité de l'air). Elle est au cœur des grands défis sociétaux actuels tels que la transition vers les énergies propres, sûres et efficaces, la gestion sobre des ressources et l'adaptation au changement climatique. Actuellement, plus de 80 % de l'énergie primaire mondiale provient de combustibles fossiles (pétrole, gaz et charbon), les recherches en combustion sont donc en pleine mutation vers l'étude de vecteurs énergétiques décarbonés et de nouveaux modes de combustion pour atteindre les objectifs de neutralité carbone en 2050. Les aspects sécurité (stockage et fuites de combustibles, incendies, feux de forêt, feux de batteries) sont également des enjeux majeurs de la recherche en combustion en France. La thématique présente un caractère fortement interdisciplinaire aux croisements entre chimie, physique, thermique, mécanique des fluides, mathématiques, informatique, sciences de la Terre et de l'Univers, environnement, matériaux, biologie, santé ou SHS. Il en résulte de fortes interactions avec les autres disciplines de la section 10 (mécanique des fluides, thermique/énergétique, génie des procédés et plasmas lasers), de l'institut CNRS Ingénierie (sections 8 et 9) et d'autres instituts du CNRS (principalement CNRS Physique, CNRS Chimie, CNRS Terre & Univers, CNRS Écologie & Environnement, CNRS Mathématiques). Les recherches en « combustion et systèmes réactifs » couvrent toute la gamme depuis les aspects fondamentaux jusqu'aux applications industrielles (transports, production d'électricité, métallurgie, etc.) et s'appuient sur des développements expérimentaux, théoriques et numériques poussés.

A. Structuration et organisation de la communauté

La communauté scientifique en combustion et systèmes réactifs rassemble environ 150 chercheurs (environ 10 % de la section 10) et enseignants-chercheurs (sections CNU 30, 31, 60, 62) en France répartis sur une vingtaine de laboratoires, auxquels s'ajoutent d'autres organismes publics (EPIC) et privés. Elle se structure autour du Groupement français de combustion (GFC-section française du Combustion Institute), de l'IFRF (International Flame Research Foundation) ou d'autres organisations de type GDR (par exemple, Suies, Feux, I-Gaia, Tamarys.), réseaux (par exemple, INCA : réseau d'initiative en combustion avancée, TNF : International Workshop on Measurement and Computation of Turbulent Flames) ou fédérations de recherche (par exemple, FITe Fédération de recherche pour l'innovation et la transition énergétique). La Cellule Énergie du CNRS est également une instance structurante pour la thématique.

Les congrès génériques en combustion sont très suivis. Par exemple, l'International Combustion Symposium et l'European Combustion Meeting rassemblent respectivement environ 1500 et 500 personnes, tous les deux ans. Les chercheurs et enseignants-chercheurs de la thématique sont impliqués, en tant que porteurs de projet ou participants, dans de grands projets de recherche d'envergure nationale (ANR, PEPR), européenne ou internationale. On compte un nombre important de projets ERC (au moins 10 dont 5 *advanced*) portés par les membres de la communauté scientifique en combustion et systèmes réactifs. Concernant la production scientifique, la communauté française se situe entre le 4^e et le 5^e rang mondial, selon les indicateurs (nombre de publications, participants aux conférences, *keynote lectures*, etc.). Les trois premières places sont en général occupées par les États-Unis, la Chine et l'Allemagne (la croissance, d'abord quantitative, mais maintenant qualitative de la Chine depuis une dizaine d'années est particulièrement forte).

B. Thématiques étudiées – enjeux et développements

La recherche en combustion a traditionnellement des liens étroits avec l'application pour l'augmentation de la performance des machines et la réduction des émissions polluantes. Ces problématiques appliquées nécessitent cependant des études fondamentales dans des thématiques variées pour la compréhension et la modélisation des mécanismes physico-chimiques. Ceci stimule de nombreuses collaborations entre recherche et industrie.

La nécessité d'une réduction drastique de l'utilisation des ressources énergétiques fossiles a déclenché d'importants changements thématiques, la communauté appliquant massivement son expertise et ses méthodes à des applications « bas-carbone ».

Au premier rang de ces changements, l'étude massive de nouveaux vecteurs : hydrogène, ammoniac, biomasse, carburants de synthèse et particules métalliques. Ces travaux sont financés par quelques projets institutionnels de grande taille (PEPR, ERC, etc.) ainsi qu'au travers de partenariats avec l'industrie.

L'utilisation de ces combustibles nécessite une forte activité de recherche, entre autres pour la description et la modélisation de la cinétique chimique, la prédiction des polluants et la compréhension des phénomènes dynamiques (instabilités, détonation). L'étude des interactions entre ces nombreux phénomènes et la turbulence continue de tenir une place importante dans la communauté. De nouveaux modes de combustion sont également étudiés : mélanges ultrapauvres, oxycombustion, combustion dans les poreux ou assistée par plasma.

Concernant la sécurité, on note l'émergence de la problématique des feux de batteries, caractérisés par un couplage fort avec la thermique et des mécanismes réactionnels particulièrement complexes. Il y a également un regain d'intérêt pour l'inhibition des réactions chimiques *via* des gaz, gouttelettes ou particules.

En lien avec diverses problématiques environnementales et de santé, l'étude des feux de forêts, de la chimie atmosphérique et de la dispersion des polluants mobilise une partie de la communauté. Ces travaux bénéficient du transfert, depuis d'autres champs applicatifs, d'outils de simulation et de diagnostics ainsi que du développement de capteurs.

Un grand nombre de méthodes sont mises en œuvre pour l'étude des milieux réactifs. Concernant la simulation numérique, la communauté française est à la pointe des méthodes numériques avancées et de la simulation haute performance (HPC) pour les problèmes multi-échelle. Les codes qu'elle développe sont utilisés, parfois de manière routinière, dans l'industrie spatiale et aéronautique. La prise en compte des couplages multiphysiques (chimie, turbulence, thermique, plasma, etc.) est également une thématique d'excellence. Sur le plan de la modélisation, le potentiel des méthodes issues de l'IA est exploré, par exemple pour les modèles de sous-maille, la réduction des schémas cinétiques ou la prédiction/détection de phénomènes dynamiques. Enfin concernant l'approche expérimentale, on remarque le développement d'instruments multicapteurs et surtout la démocratisation des diagnostics haute fidélité et haute cadence (principalement laser) en simultanément.

C. Forces, faiblesses et recommandations

Une des caractéristiques de la thématique « Combustion et Systèmes Réactifs » en France est sa forte structuration depuis plusieurs dizaines d'années (le GFC a 40 ans cette année). De plus, ses liens historiques avec les applications permettent un transfert efficace de savoirs, méthodes, outils et personnels vers l'industrie. Néanmoins, depuis quelques années, les candidatures pour des postes dans la recherche (postdoc, CR ou MCF) sont en forte diminution. Il peut y avoir une compétition avec un secteur industriel dynamique,

recrutant dans le même vivier, ou un intérêt plus faible pour la thématique.

Grâce à son lien fort avec les domaines de l'énergie et du transport, la recherche dans cette thématique est relativement bien financée *via* les partenariats industriels et certains AAP. Il faut néanmoins rester vigilant quant au financement des sujets émergents ou ayant un lien plus ténu avec les applications. De plus, si certaines thématiques, principalement autour des nouveaux combustibles, suscitent un intérêt fort, celles associées (à tort ou à raison) aux carburants fossiles ont pu voir un désengagement brutal. Ceci invite à la vigilance quant à la capacité de réorientation des personnels et des institutions.

La pression sociétale vers l'utilisation de combustibles bas carbone a ouvert ou rouvert un certain nombre de sujets fondamentaux tels que la chimie des oxydes d'azote, la cinétique à haute pression et aux parois, la dynamique des flammes ou encore la modélisation des interactions flamme-turbulence. La communauté française, grâce à son dynamisme, est à la pointe sur l'ensemble de ces sujets.

IV. Plasmas froids et lasers

Les recherches conduites dans la communauté plasma-laser font appel à des approches pluri-, inter- et intradisciplinaires, pour traiter les problématiques de physique des décharges plasmas et des interactions lasers incluant les processus élémentaires, les effets collectifs et les interactions onde-plasma, en se fondant sur la physique atomique, la physique des solides, la mécanique des fluides et des gaz ionisés, la cinétique chimique, l'électromagnétisme, etc. De plus, on ajoute souvent des études de changement d'états, de processus de transport, d'interactions plasma-matériau ou laser-matériau, etc. Cette communauté réunit donc des chercheurs de disciplines différentes travaillant aux interfaces de différentes disciplines. Les activités relatives aux plasmas et

aux lasers et les autres activités de la section 10 sont, à certains égards, très étroitement liées. Cependant, il s'agit d'un domaine scientifique très spécifique et particulier qui intéresse non seulement le monde industriel, mais qui a également des nombreuses applications médicales.

A. Structuration et positionnement national et international

Au sein du CNRS, on retrouve les plasmas majoritairement en section 10, mais aussi dans les sections 4, 5, 8, 9, 17 et 28 ainsi qu'en CID 54. Au niveau national, la communauté des plasmaciens et des laseristes est structurée autour du GDR EMILIE créé en 2020 (70 chercheurs et 300 enseignants-chercheurs), du réseau Plasmas froids » crée en 2002, du réseau FEMTO créé en 1997, ainsi que des GDR HAPPYBIO et GDR ULTRAFast PHENOMENA. Un autre GDR, ACO-CHOCOLAS, a été transformé en fédération Choco-Dyn. Le PEPR LUMA relatif aux activités autour des interactions laser-matière est en préparation.

L'existence de ces réseaux nationaux permet de faciliter les collaborations et les échanges pour renforcer les liens entre expériences et modélisation, pour développer les collaborations entre des groupes travaillant sur des aspects complémentaires et pour promouvoir les développements technologiques et industriels. Pour cela, une meilleure compréhension des mécanismes et des phénomènes impliqués nécessite un développement continu des diagnostics, ainsi que de la modélisation et des simulations analytiques et numériques.

Les équipes plasma-laser interagissent très fortement avec des laboratoires étrangers. Pour donner quelques exemples, nous bénéficions de structures comme l'IRN NMC, NL2, IRP PLASMEAU, et de collaborations dans des projets internationaux (intégrées dans le cadre

européen comme des ANR bilatéraux, COST, ERA NET, Graphene Flagship, FET OPEN, Eurofusion, ou d'autres projets Horizon Europe, voire en dehors de l'Europe). Il existe également une forte coopération avec l'industrie, depuis les petites PME régionales jusqu'aux grands acteurs internationaux tels que ST, TEL, ASML, TotalEnergies, Thales ou LAM. Cette coopération se fait par exemple par le biais de contrats directs, de bourses doctorales, de projets ANR ou européens. Plusieurs start-ups sont nées au sein de la communauté plasma-laser (par exemple, Thrustme, DIAM CONCEPT, MS4ALL, HiQuTe Diamond).

Les équipes françaises se positionnent au premier plan au sein de la communauté internationale plasma-laser, comme attesté par le nombre croissant ces dernières années de conférence invitées, d'organisation de conférences, de présence dans les médias, de prix d'excellence en recherche comme en innovation, de projets et de brevets obtenus, et enfin de publications de haute qualité et des citations qui leur sont associées. Les membres sont fortement impliqués dans des sociétés savantes nationales comme la SFP, SVP, des réseaux ou des fondations européennes comme l'EPS, Eurofusion, Horizon Europe, et internationales comme l'AVS, APS, ECS, DoE, etc.

En ce qui concerne les activités d'enseignement et la formation, il existe de nombreux programmes de licence et de master partout en France, de Rennes à Marseille, en passant par Toulouse, Grenoble et Orléans (pour ne citer que quelques exemples). Quelques établissements d'enseignement proposent des formations en propre, comme par exemple l'EUR PLASMA Science qui associe les compétences de 7 laboratoires de l'IP Paris. Plusieurs ateliers, écoles d'été, ou de formation au-delà des dispositifs universitaires ont été proposés (par exemple, actions COST PLASTER, PIAGRI, GDR Emili, ChocoDyn, Réseaux Plasma Froid, ANF, formation continue CRPMN & UGA, LaserAp, etc.).

B. Dynamique de la recherche, questions fondamentales et applications

La dynamique de la recherche est très fortement influencée par le caractère multidisciplinaire du domaine d'étude que sont les milieux ionisés, en lien avec la théorie, la simulation et l'expérimentation. Les domaines d'application sont également très larges : transition énergétique, médecine, traitements de surface, éclairage, énergie, agriculture, etc.

Le comportement des milieux ionisés est gouverné par une large gamme de processus fondamentaux relevant de : a) la physique, qui inclut la thermique, les mécanismes de transport, les instabilités, l'électromagnétisme, la turbulence, les effets de confinement et de pression ; b) la chimie, avec les réactions chimiques et physico-chimiques dans le volume du plasma et sur les surfaces, l'analyse des processus interfaciaux, la synthèse, le dépôt, la croissance, la gravure, la polymérisation et la fonctionnalisation des matériaux, la création des nouveaux matériaux, de matériaux 0, 1 ou 2D, l'interaction avec les liquides, avec les tissus vivants, avec les objets biologiques comme les bactéries et les virus, la formation des espèces actives et les plasmas réactifs ; c) les procédés, avec la question des nouvelles sources plasma, des nouvelles décharges (dans les liquides, propulseurs ioniques de nouvelle génération, « mild » ou « ultrafroid », « misty », etc.), des milieux multiphasiques, présentant des échelles temporelles très différentes et souvent extrêmes ; ou d) faisant état de développements pluridisciplinaires récents : le plasma comme milieu multiphasique réactif.

Les plasmas, qu'il s'agisse de décharges électriques ou de plasmas laser, sont aujourd'hui considérés comme un processus vert, compatible avec l'utilisation d'énergies renouvelables et économiquement viables (par exemple, les procédés par voie sèche à haute résolution pour la gravure, les synthèses sans solvants, la structuration des surfaces, le dopage et la fonctionnalisation des matériaux,

etc.). Ils sont en particulier au centre de nombreuses questions portées par la transition énergétique, même s'ils sont trop souvent traités comme des « outils » plutôt que comme des objets d'étude dans les appels à projets nationaux et internationaux. Qu'il s'agisse de la production et du stockage de l'hydrogène, de la conversion du CO₂, de la conversion du méthane, de la production d'ammoniac, de l'analyse ou des traitements de surfaces, de la fonctionnalisation des membranes, les procédés plasma sont amenés à jouer un rôle déterminant dans le « Power-to-X ».

Les exemples de sujets ayant un fort impact socio-économique sont également liés à la santé, à la médecine et à la pharmacie, impactant plus ou moins directement ces secteurs d'activité. En effet, les traitements des tumeurs, les théranostiques ou les matériaux pour les implants font par exemple appel aux plasmas comme solutions effectives pour dépolluer les produits biomédicaux ou assurer le nettoyage des eaux usées. D'autres travaux, liés à la formation et au diagnostic de particules solides (nanoparticules, suies, etc.) dans différents environnements, sont indispensables à la compréhension des conséquences de nos pratiques industrielles et à l'apport de solutions d'intérêt sociétal, qu'il s'agisse de nanotechnologies, de santé ou d'études environnementales. Ces problématiques présentent des aspects fondamentaux qui trouvent souvent des déclinaisons analogues en astrophysique.

De manière complémentaire, une des clés pour le développement de procédés en rupture est l'étude fondamentale du plasma avec des conditions aux limites (par exemple, interfaces solides ou liquides) imposées par l'application. De tels travaux requièrent à la fois des outils expérimentaux de pointe, en particulier pour la caractérisation des milieux ionisés, mais aussi des moyens de modélisation spécifiques en raison de la diversité considérable des phénomènes observés. Dans le premier cas, le développement de nouveaux diagnostics *in situ* et/ou *operando* permettrait de compléter les outils expérimentaux déjà disponibles en ouvrant de nouvelles possibilités d'étude des milieux ionisés, comme par

exemple tout ce qui a trait au diagnostic de l'interaction laser-plasma-matière ou à la visualisation des phénomènes dynamiques.

Les modèles développés en France sont largement utilisés et reconnus au niveau international, et sont une source de développement pour l'avenir. Les bases de données en accès libre développées en France constituent un point clé de cette activité. C'est aussi le cas des activités relevant de l'IA, du *deep learning* ou du *big data* (projets régionaux, nationaux et internationaux). Néanmoins, bien que plusieurs équipes disposent de modèles adaptés à toute une diversité de plasmas, il manque actuellement une plateforme ou une structure permettant d'unifier les chercheurs dans ce domaine, de regrouper les données et les modèles, afin d'obtenir davantage de visibilité au niveau international et conséquemment, d'usage de ces objets.

C. Forces, faiblesses et recommandations

La communauté PL se compose de nombreuses petites équipes. Très peu de laboratoires ont des recherches entièrement dédiées aux plasmas ou aux interactions laser. Il est donc essentiel que les réseaux et les structures fédératives comme les GDR continuent d'assurer un lien fort entre les différents acteurs de cette communauté très dynamique et caractérisée par les puissantes synergies qu'elle développe, en particulier au sein de la section 10.

En raison de l'extraordinaire capacité des plasmas à investir toutes sortes de champs applicatifs, des liens avec des problématiques contemporaines comme le changement climatique, l'environnement et la pollution, l'énergie, les nouveaux besoins de l'industrie électronique ou avec des défis sociétaux comme l'industrie de la santé, le défi croissant de la lutte contre le cancer, ou la stérilisation des surfaces dans les environnements médicaux (pour ne citer que quelques exemples) s'établissent assez naturellement. La présence des plasmas dans l'industrie, les start-ups dans

divers domaines tels que l'énergie, les systèmes de propulsion ou la synthèse de diamants en est la preuve.

La vitalité de ces applications est à la fois une force et une faiblesse dans la mesure où elle peut occulter la nécessité de maintenir une recherche fondamentale de très haut niveau sur les milieux hors équilibre. Les réponses rapides qui sont aujourd'hui requises par les défis socio-économiques et technologiques qui se multiplient, ne seront possibles qu'à condition de développer davantage notre compréhension fondamentale de ces milieux, par des approches à la fois théoriques et expérimentales.

Alors que la communauté est très active à tous les niveaux, il manque aujourd'hui clairement un soutien spécifique à ce champ de recherche. Un PEPR permettant le développement de nouveaux systèmes plasma et de diagnostics constituerait un appui fort qui conduirait inéluctablement à des progrès significatifs. Il en va de même pour les appels stratégiques en faveur de la communauté plasma-laser.

V. Génie des procédés

Le génie des procédés fédère un ensemble de disciplines allant des sciences fondamentales à l'ingénierie de la production industrielle afin de comprendre, opérer et optimiser les systèmes de transformation de la matière et de l'énergie, en lien avec leur environnement et en intégrant les contraintes d'économie des ressources et de durabilité des produits. Les recherches menées abordent les couplages entre phénomènes physiques, chimiques, biologiques intégrées sur une vaste gamme d'échelles temporelles et spatiales *via* l'utilisation de méthodologies propres (bilans de masse, d'énergie et lois de comportement, en particulier thermodynamiques), assistées par la simulation numérique et complétées par les modèles basés sur les données. De fait, il

traite de systèmes dynamiques complexes, le plus souvent multiphasiques et/ou réactifs, pour des applications diverses en profondeur mutation du fait des transitions énergétiques et écologiques.

A. Positionnement international, structuration

La recherche en génie des procédés est portée par une communauté forte d'environ 1800 personnels permanents repartis dans des EPST, dont l'INRAE et le CNRS (avec environ 120 personnes) et des EPIC dont le CEA, l'IFPEN, le CIRAD et l'INERIS. En 2017, le livre blanc du génie des procédés a permis de mettre en évidence le fort dynamisme de cette thématique sur l'ensemble du territoire français et sa reconnaissance à l'échelle internationale. Les personnels rattachés à la section 10 sont présents dans 15 unités mixtes ou unités propres de recherche. Le génie des procédés est également porté par les enseignant-chercheurs de la centaine de laboratoires relevant de la section.

B. Le génie des procédés au cœur des enjeux sociétaux

1. Décarbonation de l'énergie et transition énergétique

La réduction de l'impact environnemental, et en particulier l'empreinte carbone, des systèmes énergétiques est au cœur des recherches en génie des procédés. L'utilisation conjointe d'approches expérimentales et de modélisation, et d'outils tels que la simulation et l'analyse économique, a permis d'améliorer l'efficacité énergétique, de renforcer le contrôle des émissions de GES, d'optimiser la gestion de l'eau et de réduire les coûts de production.

La recherche de nouvelles sources et vecteurs énergétiques, imposée par la transition vers un système à faible empreinte carbone, a conduit à des avancées significatives dans le domaine des carburants synthétiques, dits e-fuels ou e-carburants, avec une amélioration de la conversion sous forme chimique (hydrogène, ammoniac, méthane et carburants liquides) des énergies vertes, prenant également en compte la viabilité technique, économique et environnementale (recyclabilité) de ces procédés.

2. Gestion des ressources et économie circulaire

Le concept d'économie circulaire a porté les recherches en GP *via* le développement d'une approche holistique de l'ingénierie, visant à optimiser l'utilisation des matières premières et de l'énergie, à concevoir les procédés nouveaux en incorporant les produits et coproduits, transformant les déchets en nouvelles ressources et en intégrant l'analyse du cycle de vie dès la phase de conception.

Les principaux domaines d'application concernent l'eau (réutilisation, recyclage de l'azote et du phosphore, micropolluants), la biomasse d'origine végétale et les déchets solides municipaux, ou ceux issus de certaines productions industrielles et agricole. Les différents procédés de conversion de la biomasse en biocarburants (chimie verte, liquides ioniques, DES, liquéfaction hydrothermique, pyrolyse) présentent des défis liés à la compréhension des réseaux de réactions complexes, à la conception de catalyseurs pour la désoxygénation et à l'exploitation de procédés continus sous haute pression.

Le recyclage des déchets solides motive le développement des procédés de fractionnement et de séparation ainsi que des approches de conversion combinées (fermentation solide). Souvent fortement réduits (désoxygénés), les huiles et les graisses peuvent être catalytiquement converties en biocarburants. Ce processus présente des défis liés à la sélectivité,

stabilité, désactivation ou encore coût des catalyseurs.

3. Biotechnologies et bioprocédés

Le GP s'est résolument engagé dans le développement des biotechnologies et des bioprocédés, offrant de nouvelles perspectives pour la production de produits chimiques, pharmaceutiques et d'énergies biosourcées, contribuant ainsi activement à l'émergence de la bioéconomie.

Un concept clé dans cette évolution est « l'usine cellulaire », visant à transformer les micro-organismes en unités de production, intégrant les principes du génie des procédés au niveau cellulaire, notamment *via* la modélisation du comportement des micro-organismes. Le génie métabolique et la thermodynamique des processus irréversibles sont exploités pour élaborer des modèles permettant de mieux comprendre les mécanismes cellulaires et d'orienter le métabolisme vers la production des produits-cibles.

Dans les domaines pharmaceutiques et médical, des résultats marquants ont été obtenus par culture cellulaires pour la production de biomolécules (protéines thérapeutiques, anticorps, etc.) et de biothérapies (cellules souches, CAR-T, etc.). Notons enfin les efforts des chercheurs visant à la conversion économique des algues en lipides et autres précurseurs de biocarburants.

C. Thèmes émergents et en évolution

1. Capture, stockage et utilisation du carbone

La capture du carbone, à sa source ou atmosphérique, est cruciale pour réduire les concentrations de carbone dans l'atmosphère. La conversion du CO₂ est réalisée par des voies de catalyse biologique, électrochimique et

thermique. Les solvants améliorés et les membranes sélectives, les techniques de gazéification et de reformage permettent d'augmenter l'efficacité et de réduire les coûts énergétiques de ces processus. Les recherches concernent également le développement de matériaux absorbants, hautement sélectifs, tels que les amines modifiées et les matériaux (micro-) poreux, en vue d'accroître la capture et de réduire les coûts opérationnels.

Les principales voies d'utilisation du CO₂ sont la carbonatation minérale, la conversion en produits chimiques et en carburants par procédé Fischer-Tropsch et la conversion biologique. Ces technologies sont au début de leur développement et présentent de nombreux défis et opportunités : optimisation des bioréacteurs, outils analytiques et de surveillance, modélisation à l'échelle du génome, amélioration de l'efficacité métabolique, valorisation des coproduits, etc.

2. Internet des objets, intelligence artificielle et interdisciplinarité

La digitalisation de l'usine (capteurs connectés, « Industrie 4.0 ») et l'accroissement de la quantité de données associées, couplés à la modélisation multicritères, intégrant des contraintes techniques, économiques, environnementales et sociétales (en matière de sécurité notamment), souligne l'importance de l'agrégation de compétences et de l'interdisciplinarité. De nombreuses opportunités existent ainsi pour exploiter la capacité « intégrative » du GP en reliant, par exemple, les techniques d'intelligence artificielle, et les sciences humaines et sociales afin de développer des procédés flexibles axés sur l'homme, incluant l'organisation des systèmes de production et l'ergonomie.

D. Forces, faiblesses et recommandations

La communauté du génie des procédés a solidement établi ses fondations en France et

en Europe, notamment grâce à l'engagement de la Société française de génie des procédés (SFGP) et de son homologue européen, l'EFCE. Cette discipline se caractérise par son caractère transversal, multidisciplinaire et intégrateur, enrichissant ses propres développements par les progrès réalisés dans les autres domaines de la section 10 ainsi que dans divers instituts du CNRS.

Au cœur de nombre de préoccupations actuelles, le génie des procédés a, et aura, un rôle crucial à jouer, vis-à-vis du dérèglement climatique, de la transition énergétique, et des enjeux de développement durable tout en étant en interaction directe avec la société.

Cependant, malgré ces avancées, le génie des procédés fait face à des défis importants. Paradoxalement, sa visibilité auprès du grand public est limitée, ce qui réduit la reconnaissance de son impact et de sa contribution aux grandes questions sociétales. Cette discipline, relativement appliquée, souffre également d'une dépendance aux financements externes, notamment industriels, qui peut freiner l'innovation et la recherche fondamentale. Elle doit également faire face aux difficultés de mise à l'échelle industrielle des innovations de laboratoire dans des temps de plus en plus courts.

Il apparaît dès lors essentiel de renforcer les efforts de communication et de vulgarisation scientifique pour mieux faire connaître les réussites et les défis du génie des procédés au grand public. L'évolution des contenus des formations des futurs ingénieurs pour inclure des compétences en modélisation avancée, simulation et gestion de données, devra se poursuivre. Par ailleurs l'accompagnement des nouvelles thématiques identifiées pourrait être amélioré par une meilleure utilisation des différents outils structurants le paysage de la recherche à l'échelle nationale (réseaux thématiques, fédérations, etc.) et internationale (IRL, ITN, etc.).

Conclusion

Les thèmes de recherche portés par la section 10 bénéficient de leur association étroite avec les grands enjeux sociétaux de ce siècle ; un constat qui peut être étendu à l'ensemble des activités de recherche menées au sein de CNRS Ingénierie. Dans le contexte politique et économique actuel, il est également clair que les liens traditionnels existants entre la recherche institutionnelle et industrielle, très activement maintenus par les chercheurs de la section, sont importants à la fois par leur intérêt scientifique, technologique et sociétal et comme compléments à des financements publics directs insuffisants.

Il est tout aussi important de souligner que ces liens ne sauraient exister sans la vitalité des recherches fondamentales, reconnues au meilleur niveau et menées depuis de nombreuses années par les chercheurs de la section. Le morcellement actuel des financements par appels à projets, leur focalisation sur des applications pratiques à court terme, la lourdeur de leur gestion administrative mettent en danger le *pipeline* menant de la recherche fondamentale aux applications. Il faut rappeler (encore) que plusieurs dizaines d'années séparent l'émergence de nouveaux concepts scientifiques de leur application généralisée : ceci est vrai pour les techniques actuelles d'intelligence artificielle⁽¹⁾, comme pour la simulation

numérique des écoulements turbulents ou multiphasiques.

L'avenir étant à la jeunesse, il est important de considérer l'attractivité des métiers de la recherche. Les crises profondes actuelles (sanitaires et climatiques) ont conduit de nombreux chercheurs établis à reconsidérer leurs pratiques et/ou leurs thématiques de recherche, dans un sens qui s'aligne souvent avec les aspirations des jeunes chercheurs. Dans le même esprit, les efforts constants de communication et de formation des jeunes par les chercheurs de la section contribuent à la construction d'une culture scientifique et technique commune : une mission centrale du CNRS.

Il est cependant clair que l'érosion continue du soutien à la recherche, particulièrement marqué après 2012 pour le nombre de postes ouverts au concours CR, est un signal négatif envoyé aux jeunes générations. Si nous n'avons pas constaté au cours de notre mandat de baisse significative du nombre ou de la qualité des candidatures aux concours, le nombre de candidatures féminines reste nettement inférieur à la proportion de femmes dans la section, ce qui est historiquement corrélé avec un faible nombre de postes ouverts. On peut ainsi espérer que le discours actuel sur l'importance de la parité s'accompagne à l'avenir d'une mesure simple et concrète : une augmentation du nombre de postes pérennes de chercheurs, ingénieurs et techniciens.

Notes

(1) Développées fondamentalement dans les années 1980, voire 1950 pour la « sémantique positionnelle » à la base de ChatGPT.