
RAPPORT DE CONJONCTURE

DU COMITÉ NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ÉDITION 2014

Extrait



CNRS ÉDITIONS

15, rue Malebranche – 75005 Paris

SECTION 10

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

Extrait de la déclaration adoptée par le Comité national de la recherche scientifique réuni en session plénière extraordinaire le 11 juin 2014

La recherche est indispensable au développement des connaissances, au dynamisme économique ainsi qu'à l'entretien de l'esprit critique et démocratique. La pérennité des emplois scientifiques est indispensable à la liberté et la fécondité de la recherche. Le Comité national de la recherche scientifique rassemble tous les personnels de la recherche publique (chercheurs, enseignants-chercheurs, ingénieurs et techniciens). Ses membres, réunis en session plénière extraordinaire, demandent de toute urgence un plan pluriannuel ambitieux pour l'emploi scientifique. Ils affirment que la réduction continue de l'emploi scientifique est le résultat de choix politiques et non une conséquence de la conjoncture économique.

L'emploi scientifique est l'investissement d'avenir par excellence

Conserver en l'état le budget de l'enseignement supérieur et de la recherche revient à prolonger son déclin. Stabiliser les effectifs ne suffirait pas non plus à redynamiser la recherche : il faut envoyer un signe fort aux jeunes qui intègrent aujourd'hui l'enseignement supérieur en leur donnant les moyens et l'envie de faire de la recherche. On ne peut pas sacrifier les milliers de jeunes sans statut qui font la recherche d'aujourd'hui. Il faut de toute urgence résorber la précarité. Cela suppose la création, sur plusieurs années, de plusieurs milliers de postes supplémentaires dans le service public ainsi qu'une vraie politique d'incitation à l'emploi des docteurs dans le secteur privé, notamment industriel.

Composition de la section

Jacques MAGNAUDET (président de section) ; Benoît ROUSSEAU (secrétaire scientifique) ; Francis ALLARD ; Laurent BERTHE ; Philippe BRUNET ; Pascale DOMINGO ; Gilles FLAMANT ; Véronique FORTUNE ; Agnès GRANIER ; Khaled HASSOUNI ; Karl JOULAIN ; Karine LOUBIÈRE ; Carole MOLINA-JOUVE ; Stéphane MOREAU ; Pierre PERRIER ; Olivier POULIQUEN ; Ouamar RALHLI ; Nicolas RIMBERT ; Jean-Marc SCHWEITZER ; Stephan ZURBACH.

Résumé

La section 10 du Comité National de la Recherche Scientifique, forte de plus de 380 chercheurs CNRS répartis dans près de 70 laboratoires, est au cœur d'une multitude de problématiques de l'ingénierie d'aujourd'hui. Fondée sur des disciplines possédant une longue histoire mais profondément renouvelées, notamment par les apports des diagnostics expérimentaux modernes et de la simulation numérique intensive, elle recouvre aussi bien des recherches motivées par des questionnements très amont que des développements menés au plus près des problématiques industrielles, environnementales ou médicales actuelles. S'intéressant à des objets dont la taille va du nanomètre à celle des planètes, elle se développe en forte interaction avec de très nombreux domaines de la physique, de la chimie, des sciences de l'univers, des mathématiques appliquées ou de la biologie. Ce rapport en propose une photographie, forcément incomplète, au travers de l'état des cinq grandes disciplines qui la composent (dynamique des fluides, génie des procédés, plasmas froids et lasers, combustion, thermique et énergétique), de leurs évolutions récentes et de leurs interactions.

en écoulement dans le cadre de l'approche du continu. Longtemps motivée par les applications à l'aéronautique, à l'hydraulique, et à la météorologie, le cœur de la discipline portait sur les propriétés des écoulements turbulents. Sous l'impulsion de plusieurs écoles de pensée fécondes, tout particulièrement en France (physique non-linéaire, mathématiques appliquées, physique de la matière molle), elle a considérablement évolué au cours des deux ou trois dernières décennies. Les problématiques multiphasiques en général et celles liées aux effets de surface et d'interface en particulier (bulles, gouttes, mouillage) ont pris une ampleur considérable. Les écoulements de fluides complexes (gels, suspensions, émulsions, milieux granulaires...) sont devenus un sujet d'étude très actif. Les questionnements liés à la turbulence et aux instabilités (domaine très actif au cours des décennies 1980-1990) se sont ouverts vers des systèmes mettant en jeu des couplages complexes ainsi que vers les problématiques du contrôle. La dynamique des fluides s'est également largement tournée vers les sciences du vivant (circulation sanguine, dynamique des globules et des cellules, propriétés de vol ou nage des animaux ou organismes...).

2. Des applications variées adossées à une recherche amont forte

La dynamique des fluides trouve des champs d'application directs dans de nombreux domaines en prise directe avec des problèmes sociétaux : les différents modes de transport (propulsion, sustentation, réduction de traînée...), la production et le transport des énergies fossiles (pétrole...) ou renouvelables (hydroliennes, éoliennes...), l'environnement (transport de polluants...), les matériaux (élaboration, mise en forme...), les procédés de séparation et de mélange, la biologie et enfin les sciences de la Terre et de l'Univers (météorologie, océanographie, planétologie...). À côté de ces applications, la discipline développe dans une dynamique propre une recherche fondamentale forte en lien étroit avec la physique, la physico-chimie, les mathématiques appliquées ou encore la géophysique et l'astrophysique. C'est d'ailleurs sans

I. Dynamique des fluides

A. Introduction

1. Une discipline profondément renouvelée

Définir la dynamique des fluides est un exercice difficile compte tenu de la variété des recherches qui aujourd'hui élargissent à la discipline. En effet, de nouvelles applications et de nouveaux domaines de recherche tendent à élargir cette définition au-delà du cadre classique des milieux

doute davantage par ces thématiques amont que par les secteurs applicatifs que la communauté se reconnaît et se structure aujourd'hui.

B. Thématiques et axes de développement

1. Turbulence et phénomènes associés

La turbulence reste évidemment au cœur de la discipline mais les problématiques abordées ont sensiblement évolué au cours des vingt dernières années. De nombreuses recherches se concentrent actuellement sur la nature et l'organisation des transferts entre échelles dans des situations anisotropes, en présence d'effets tels que la stratification en densité, la rotation en bloc ou le couplage avec les effets magnétohydrodynamiques, en relation avec des problématiques géophysiques. Parallèlement, les recherches sur la turbulence de paroi à grand nombre de Reynolds restent actives grâce à l'augmentation des performances des moyens d'investigation (PIV haute cadence, simulation directe massive). La compréhension des caractéristiques du mélange de scalaires passifs (température, espèces chimiques) et surtout du transport de particules matérielles (particules solides, bulles) par la turbulence constitue un domaine actuellement très actif avec des questions portant sur l'accumulation de ces particules dans certaines régions privilégiées de l'écoulement, la nature de l'agitation qu'elles induisent et les modifications qu'elles apportent aux transferts entre échelles. Ces questions dépassent souvent le cadre de la seule turbulence, avec des points durs concernant la détermination des forces et des interactions hydrodynamiques subies par des particules de taille finie. Sur un plan plus applicatif, les possibilités actuelles d'accès aux champs instantanés de vitesse dans ces écoulements, par voie expérimentale et numérique, permettent également d'explorer de façon fine le rôle des processus turbulents dans les transferts thermiques, dans les turbomachines, en combustion ainsi que dans

la génération et la propagation du bruit d'origine aérodynamique. L'accès aux fluctuations de pression pariétale a également permis de faire progresser la connaissance des sources aéroacoustiques et de fournir des excitations plus réalistes pour étudier le rayonnement des structures. Toutes ces informations fines alimentent également les progrès dans la formulation des modèles de sous-maille pour la simulation des grandes échelles, en fournissant des bases solides pour des comparaisons a priori ou a posteriori.

2. Instabilités et contrôle

L'étude des instabilités reste également un domaine très actif, même si les progrès conceptuels y sont sans doute moins spectaculaires que dans les décennies passées. L'utilisation du concept de mode global, linéaire ou non-linéaire, et les progrès réalisés par les approches numériques pour le calcul effectif de ces modes ont conduit à des avancées marquantes, notamment dans la compréhension de la dynamique de certaines classes de tourbillons ou d'écoulements fortement non-parallèles. Couplées aux notions de système adjoint, de réceptivité et de perturbations optimales, ces approches sont utilisées avec succès dans la problématique du contrôle pour préciser les modalités permettant de retarder ou au contraire d'amplifier la création de structures cohérentes ou le décollement de couches limites, avec des objectifs tels que l'optimisation du mélange ou la réduction de traînée ou du bruit. Une autre orientation concerne l'enrichissement du contenu physique des analyses de stabilité par la prise en compte d'effets de compressibilité, de stratification, de perturbations acoustiques ou encore de certains forçages mécaniques (rotation, libration...).

3. Interactions fluide-structures

À côté des questions classiques liées aux déflexions et vibrations des structures, d'autres directions de recherche sont en plein essor. Parmi celles-ci, à la charnière avec certaines

problématiques de la matière molle, figure l'étude des interactions entre la capillarité et les milieux mous se déformant sous l'effet de la tension surface (élasto-capillarité) ou encore les questions de poro-élasticité historiquement initiées dans les milieux poreux mais en plein développement dans les tissus vivants et les gels. Par ailleurs les problématiques issues du vivant, qu'il s'agisse de circulation dans les vaisseaux déformables, de stratégies de vol ou de nage, d'oscillations de systèmes végétaux sous l'effet du vent, font l'objet d'analyses expérimentales et de modélisations détaillées. Enfin les approches récentes développées pour l'étude des instabilités hydrodynamiques pénètrent peu à peu les problèmes où le fluide interagit avec des objets déformables (drapeau, filament, cylindre flexible...), ou libres de se mouvoir dans le fluide (du type «feuille morte»).

4. Ondes internes et de surface

Ces phénomènes ont été longtemps étudiés en raison notamment de leur importance vis-à-vis de questions de discrétion sous-marine, de résistance à l'avancement des navires de surface ou encore d'ingénierie côtière. Ces domaines d'application, en particulier les deux derniers, restent très actifs et sont renforcés par les projets de récupération d'énergie via des systèmes hydroliens ou houlomoteurs. Ils sont accompagnés du développement de moyens d'essais et de codes de calcul importants. Au cours de la dernière décennie, l'actualité a attiré l'attention sur les phénomènes de tsunamis et de vagues scélérates, générant une forte dynamique autour de leur étude. Les problématiques atmosphériques et océanographiques (déferlement, dispersion par la topographie, flux à l'interface) continuent également de stimuler cette thématique. Enfin, la turbulence d'onde qui se rencontre dans toutes les disciplines où des ondes non-linéaires interagissent entre elles (mécanique des solides, physique des plasmas, optique non-linéaire...) continue de progresser dans la compréhension des lois d'échelle qui régissent les statistiques de ces phénomènes.

5. Écoulements à grande vitesse

Ce domaine reste d'une grande importance en aéronautique et dans les systèmes de production d'énergie ou de propulsion. L'interaction onde de choc-couche limite et ses conséquences demeurent un sujet d'actualité, tout comme l'impact des ondes de choc sur le mouvement des particules. L'étude des turbomachines est également active, en lien étroit avec la thématique de la combustion. On constate aussi une émergence de problèmes issus du domaine biomédical (injection de substances actives par ondes de choc) et du génie des procédés, tels que la mise au point de compresseurs supersoniques pour le CO₂, les techniques de projection dynamique à froid (*cold spray*), le nettoyage par jet d'azote supercritique, ou encore la fabrication de poudres métalliques.

6. Surfaces et interfaces, microfluidique

L'essor de la microfluidique, domaine dans lequel les forces de surface et les interactions avec les interfaces deviennent prépondérantes par rapport aux forces en volume, a motivé le développement de nombreuses études centrées sur le rôle des interfaces et celui du mouillage. Les recherches en cours concernent la dynamique et les stratégies de formation et de contrôle de gouttes, les situations de mouillage nul, les problèmes de singularité que pose la ligne triple. Lorsque l'on descend vers les petites échelles, ou pour les écoulements de gaz, se posent des problèmes de limite de l'approche continue qui amènent à revisiter les propriétés des écoulements telles que les conditions de glissement à la paroi ou les effets de transpiration thermique. Dans ces domaines, les simulations aux échelles élémentaires de type dynamique moléculaire ou équation de Boltzmann constituent des outils d'investigation précieux. Aux plus grandes échelles, pour les applications liées aux moteurs, aux procédés d'impression ou encore aux aérosols, se rencontre la problématique de la fragmentation de jets ou nappes liquides ou encore de formation de brouillards.

Ces phénomènes ultra-rapides posent de grands défis à la fois expérimentaux et numériques.

7. Milieux divisés et Fluides complexes

Les fluides complexes que constituent les milieux diphasiques (mousses, émulsions, suspensions, milieux granulaires), les gels ou encore les polymères rencontrés dans une multitude d'applications (souvent en interaction avec le génie des procédés) posent des questions fondamentales sur les lois de comportement, la compréhension du passage des échelles « micro » (la bulle, la goutte, le grain...) aux échelles « macro » du milieu moyen. Au-delà de la compréhension de la rhéologie, une recherche active tente de revisiter pour ces fluides complexes des résultats classiques pour les fluides newtoniens : instabilités, propriétés de transport... Dans ce domaine, des approches numériques spécifiques des petites échelles (*dissipative particle dynamics*, dynamique moléculaire...) tendent à se répandre. L'étude des écoulements et des transferts dans les milieux poreux, qui constituent une classe particulière de milieux divisés, reste un sujet dynamique. Les analyses à l'échelle des pores se sont développées avec l'utilisation d'images 3D issues de micro-tomographies. Ces informations alimentent des simulations numériques qui tentent de réaliser le passage de l'échelle du pore à celle du milieu poreux dans son ensemble. Les écoulements de fluides complexes (fluides a seuil, milieux diphasiques) dans ces milieux sont un sujet en vogue qui pose de nouvelles questions sur les phénomènes de dispersion et les lois d'échelles des écoulements et des transferts.

8. Biomécanique

La compréhension du monde vivant fait beaucoup appel à la dynamique des fluides. La prédiction des écoulements rencontrés dans les organismes, notamment humains, et de leurs pathologies reste une motivation importante, avec des implications thérapeu-

tiques directes (stents). Les écoulements sanguins dans les vaisseaux déformables, dans le milieu poreux multi-échelles que constitue le cerveau, les caractéristiques diphasiques des suspensions de vésicules et de globules (déformations, rupture, agglomération), les interactions entre le développement de tissus et les contraintes hydrodynamiques, les écoulements de sève dans les plantes constituent des sujets de recherche très actuels. L'étude du mouvement d'êtres vivants dans leur environnement fluide est également en plein développement. Aux grandes échelles, le vol ou la nage des insectes, poissons ou oiseaux pose des problèmes complexes d'interaction fluides-structure et ouvre la voie à des projets biomimétiques originaux. Aux petites échelles, l'étude du mouvement individuel ou collectif de micro-organismes est en plein essor dans le cadre des recherches sur les fluides dits « actifs ». La compréhension des stratégies de nage dans ces deux limites, l'apparition de mouvements collectifs spontanés, la rhéologie de ces suspensions actives, constituent quelques unes des questions que posent ces systèmes. Enfin, l'imagerie médicale recèle des problèmes qui questionnent mécaniciens des fluides et acousticiens, notamment pour déterminer les propriétés des tissus mous ou mettre au point des agents de contraste.

C. Positionnement, inter-disciplinarité et structuration

1. Positionnement

La communauté française est aujourd'hui forte et jouit d'une reconnaissance internationale certaine (divers indicateurs la situent au deuxième rang mondial). Ce dynamisme est en bonne part lié à la richesse des cultures présentes au sein de la communauté : aux cotés d'une approche mécanicienne classique, fondée sur la forte tradition mathématique française, se sont développées depuis trois

décennies des approches physiennes issues de la physique non-linéaire et des sciences de la matière molle. La synergie entre ces différents points de vue est réelle et constitue une force qui est pour beaucoup dans le dynamisme de l'école française.

2. Transdisciplinarité

Comme le souligne l'analyse qui précède, la dynamique des fluides est aujourd'hui une science très transdisciplinaire. Au sein de l'INSIS, ses liens avec la section 9 sont évidents au travers de la biomécanique, de la rhéologie, des interactions fluides-structure ou encore de l'acoustique. Ils sont en croissance avec la section 8 au travers des défis que les micro- et nanotechnologies posent aux mécaniciens (refroidissement des microcircuits, production de nano-gouttes, tri hydrodynamique de microparticules...). Le dialogue soutenu des mécaniciens numériques avec les mathématiciens appliqués autour des schémas numériques et des méthodes de discrétisation a conduit également à des interactions de longue date avec l'INSMI. Les interactions sont également fortes, et en croissance, avec les trois sections de l'INSU : la 17 pour le rôle central de la turbulence en astrophysique et celui des instabilités dans certains scénarios de formation des étoiles ou des disques d'accrétion ; la 18 pour le rôle primordial des écoulements dans des questions centrales de planétologie telles que la dynamique du manteau terrestre ou la génération de l'effet dynamo ; la 19 pour les problématiques liées aux écoulements atmosphériques, océaniques et côtiers. Enfin la dynamique des fluides entretient des relations très étroites avec l'INP (section 2 autour des thématiques de la turbulence, des ondes et des instabilités, section 5 autour des fluides complexes et des milieux granulaires) ainsi qu'avec la section 11 de l'INC autour des polymères, de la physico-chimie des surfaces et du mouillage.

3. Structuration

Les forces académiques de la discipline présentes en section 10 sont aujourd'hui réparties au sein d'une quinzaine de gros laboratoires, UMR ou UPR, auxquels s'ajoutent quelques équipes plus spécialisées dans des unités centrées sur d'autres disciplines. Bien que l'essentiel de ces « gros » laboratoires relève principalement de l'INSIS, on y dénombre aussi des laboratoires dépendant de l'INSMI, de l'INSU ou encore de l'INS2I, conséquence directe de la transdisciplinarité mentionnée plus haut. D'autres équipes bien identifiées, regroupant des chercheurs des sections 5 ou 2, existent aussi dans des laboratoires dépendant de l'INP. La répartition géographique de la discipline pave assez bien le territoire puisque sur la quinzaine de laboratoires précités, 3 sont parisiens et 3 autres sont situés sur le plateau de Saclay. La moitié d'entre eux environ est adossée à une grande école, signe de l'enracinement de la discipline dans les sciences pour l'ingénieur. Ces forces académiques ne représentent cependant pas tout le potentiel national car plusieurs organismes (EPST ou EPIC) jouent un rôle important dans le transfert entre recherche amont et applications (essentiellement autour des écoulements turbulents mono- ou diphasiques), notamment le CEA, le CNES, EdF, l'IFPEN, l'IRSN, l'IRSTEA ou l'ONERA. Ils collaborent fortement avec les laboratoires académiques, notamment au travers de thèses co-encadrées. S'agissant des applications, certains groupes industriels continuent de développer en interne la partie la plus stratégique de leurs recherches (dans les domaines concernant les transports et l'énergie notamment) mais tendent de plus en plus à l'externaliser dans les laboratoires publics. Il est à noter qu'en raison de la frilosité actuelle de beaucoup d'entreprises à former et conserver en leur sein des « experts » scientifiques, cette externalisation prend de plus en plus souvent la forme d'une simple sous-traitance au détriment d'un véritable partenariat scientifique.

Les GdR constituent un outil de choix pour les échanges au sein de la communauté nationale, notamment mais pas exclusivement ceux

portés par l'INSIS tels que : Contrôle des Décollements (2502), Micropesanteur Fondamentale et Appliquée (2779), Phénoménologie de la Turbulence (2865), Ruissellement et Films cisailés (3373), Mécanique des Matériaux et Fluides Biologiques (3570), Mécanique et Physique des Systèmes Complexes (3588).

Une partie de la communauté se structure également autour de grands moyens. Du côté expérimental, certains laboratoires disposent de grands instruments : souffleries subsoniques ou supersoniques, bancs de turbomachines, tubes à chocs, bassins d'essais de carènes, grands bassins pour l'étude de la houle ou la mise au point de dispositifs marins (protections côtières, hydroliennes), plateformes pour l'étude des fluides en rotation, veines hydrauliques. Certains sont issus de longs partenariats avec le secteur de la défense (DRET puis DGA, CEA-DAM) et ont pour la plupart été notablement modernisés depuis leur construction, tandis que d'autres sont beaucoup plus récents et résultent souvent de financements régionaux, voire des dispositifs issus des Investissements d'Avenir. Si ces outils sont souvent pertinents et soutenus régionalement, ils ne bénéficient pas toujours d'une politique nationale très claire et leur positionnement par rapport à des moyens spécifiques présents dans d'autres organismes comme l'ONERA ou la DGA (dans les domaines de l'aéronautique, de la propulsion, de l'hydrodynamique navale ou des lanceurs) mérite réflexion de la part du MENSUR et du CNRS. Certains sont cependant regroupés dans des réseaux européens (Hydralab, EuHIT...) ce qui leur assure un taux d'utilisation important et des soutiens significatifs. Au-delà de ces grands instruments, une partie de l'activité expérimentale repose sur une métrologie qui peut s'avérer lourde comme les systèmes de vélocimétrie 3D, la PIV holographique ou la tomographie X. La mutualisation de ces moyens relève aujourd'hui essentiellement de la volonté propre des laboratoires ou de la politique de certaines fédérations de recherche. De ce fait la baisse des financements récurrents et des enveloppes contractuelles devient fréquemment un facteur limitant pour l'accès à ces équipements de pointe. En comparaison la mécanique des

fluides numérique apparaît plus clairement structurée. Les moyens de calcul nationaux regroupés dans GENCI ainsi que l'infrastructure européenne PRACE constituent un dénominateur commun fort de la communauté qui, conjugué au développement de méso-centres régionaux de calcul, lui permet de tenir son rang dans la compétition internationale, notamment au niveau du calcul haute performance.

D. Conclusion

La photographie instantanée de la dynamique des fluides française suggère qu'elle se porte plutôt bien. Bénéficiant d'une reconnaissance internationale indéniable, la communauté est engagée dans une grande variété de recherches allant d'aspects très fondamentaux à d'autres directement liés à des secteurs applicatifs. Cette distinction est cependant largement réductrice car bien des thématiques amont pratiquent en réalité des allers-retours fructueux avec les applications et le milieu industriel, confortant ainsi la place de la discipline au sein des sciences *pour* (mais non *de*) l'ingénieur. L'enseignement a partiellement suivi les évolutions récentes de la discipline : il les reflète en général bien au sein des formations universitaires mais reste souvent plus traditionnel dans les écoles d'ingénieur, sauf lorsque celles-ci sont adossées à un laboratoire lui-même porteur de certaines de ces mutations.

Au-delà de cette bonne santé, certains motifs de réflexion voire d'inquiétude existent. Au niveau des recrutements, la concurrence au concours d'entrée au CNRS est devenue telle que certains sujets, plus traditionnels que d'autres dans leurs concepts ou leurs applications, peinent à être irrigués par ce canal et recrutent désormais essentiellement des enseignants-chercheurs. À ces questions « d'aménagement du territoire scientifique » se superposent celles de « l'aménagement du territoire géographique » résultant du vivier d'étudiants formés en région parisienne et de l'attractivité qu'exerce l'interdisciplinarité des

laboratoires correspondants. Enfin, la nécessité d'une réflexion nationale sur les grandes installations expérimentales et les moyens métrologiques lourds mérite à nouveau d'être soulignée : les implications budgétaires et humaines correspondantes dépassent souvent largement le cadre des laboratoires et peuvent dans le contexte actuel très contraint rendre difficile les évolutions internes.

II. Génie des procédés

A. Évolution de la thématique

Le génie chimique trouve son origine dans la valorisation des ressources pétrochimiques dont l'exploitation industrielle (carburants, lubrifiants...) s'est mise en place dans les années 1920-1930. Cette demande de procédés industriels a été renforcée durant la seconde guerre mondiale à travers la production en masse de carburants (essence, jet fuels...) et d'antibiotiques, par exemple, ou la séparation d'éléments radioactifs (projet Manhattan). Au cours de la seconde moitié du xx^e siècle, la demande des pays industrialisés a nécessité d'étendre ces concepts à d'autres champs applicatifs et à des échelles élevées de production : polymères (nylon, polyéthylène), métaux (exploitation des mines), traitement des déchets radioactifs (procédé Purex...), agroalimentaire (industrie laitière...) avec pour corollaire la nécessaire protection de l'environnement (traitement des eaux résiduaires urbaines et industrielles, production d'eau potable, traitement des déchets solides et des effluents gazeux). L'industrie chimique a alors développé rapidement de nouveaux procédés, plus flexibles et plus performants. Jusqu'alors des méthodes heuristiques permettaient de réaliser des dimensionnements rapides mais peu fiables de réacteurs et d'opérations unitaires. Pour sortir de cet empirisme, le génie chimique, se situant à l'interface de différents domaines de

la physique et de la chimie, a cherché à modéliser le couplage des processus (transferts d'énergie et de matière entre phases, écoulements de chacune d'elles, transport diffusionnel et réactions chimiques) contrôlant le fonctionnement et la performance des réacteurs. Plus généralement cette approche a permis de réaliser de façon robuste le dimensionnement, l'optimisation ou le contrôle d'opérations industrielles. Cette vision était jusqu'à récemment partagée par le milieu industriel et académique et a conduit au dimensionnement innovant de nouveaux systèmes multifonctionnels.

Dans les années 2000, de nouvelles contraintes ont modifié les attentes par rapport au génie des procédés :

- la concomitance de la raréfaction des ressources fossiles liquides et gazeuses et du réchauffement climatique dû aux émissions anthropiques de gaz à effet de serre. Cette situation implique une optimisation des procédés en termes d'énergie et de consommation de matière (intensification des procédés), et le recours à des sources d'énergie à faible contenu en carbone telles que les énergies renouvelables ou à des gisements de déchets (méthanisation) ou de carbone végétal (produits bio-sourcés). La valorisation du CO_2 comme précurseur de synthèses chimiques et biologiques s'intègre également dans cette stratégie de réduction des gaz à effet de serre ;

- la raréfaction des ressources en eau qui conduit à l'économiser, à la recycler et à produire des eaux utilisables à partir de ressources secondaires ;

- plus récemment, cette notion de raréfaction des ressources naturelles s'est étendue à de nombreux éléments minéraux (métaux rares tels que Nb, Ta, Li, In ; terres rares, etc.). Cette contrainte conduit à trouver des substituts ou à utiliser de préférence des ressources renouvelables et à recycler (champ très étendu pour de nouveaux procédés) ;

- la production de matériaux de plus en plus complexes pour répondre à des besoins ciblés. C'est par exemple le cas des films plastiques fins et résistants de plus en plus chargés

en additifs minéraux et organiques qui rendent complexe leur recyclage ;

- la diversification des modes de valorisation de la matière première végétale qui offre un potentiel d'innovation important mais peut également provoquer des conflits d'usage ;

- l'intolérance croissante de la population envers toute nouvelle pollution chimique de l'environnement qui impose une approche intégrative, réparatrice et, mieux, non polluante ;

- le développement de dispositifs et procédés pour l'alimentation, la santé, le vivant et l'environnement ;

- au plan macro-économique, le déplacement des zones géographiques de production de masse des pays développés vers les pays émergents, les premiers se spécialisant dans des produits à forte valeur ajoutée.

Ces éléments ont conduit à une remise en cause de ce qu'on peut dénommer le génie des procédés sous contraintes. En conséquence, une redéfinition des objectifs et méthodes a été nécessaire. En parallèle de cette approche sous contraintes, la discipline a continué à enrichir ses concepts afin d'améliorer la description des systèmes complexes.

B. Axes de développement

La discipline du génie des procédés regroupe l'ensemble des connaissances scientifiques et technologiques nécessaires pour aborder l'étude, la conception et l'optimisation des procédés complexes de transformations physico-chimiques et biologiques de la matière et de l'énergie. Les grands enjeux sociétaux au cœur de la problématique du génie des procédés se situent dans la capacité à gérer les transitions clés de l'énergie et les ressources pour la société du XXI^e siècle, plus particulièrement dans les domaines suivants :

- la chimie et les matériaux : nouveaux précurseurs (CO₂, molécules non toxiques), technologies de recyclage, traitement des pollutions, intensification, bioprocédés ;

- l'énergie : intégration en vue de réduire la consommation d'énergie spécifique, introduction des énergies renouvelables dans les procédés de transformation de la matière, bioressources ;

- l'eau : réduction de la consommation, traitement, filtration, séparation, décontamination... ;

- les biotechnologies : mise en œuvre des microorganismes, bioréacteurs, biocatalyse, usine cellulaire ;

- la nutrition et la santé : agroalimentaire, synthèse de principes actifs, formulation.

On peut distinguer principalement deux axes de développement qui sont les **sciences de base** sur lesquelles s'appuie le génie des procédés et qu'il contribue à alimenter, et l'**intégration** où il a construit une méthodologie originale dans le but de prendre en compte les couplages et les processus limitants. Cette capacité d'intégration positionne la communauté scientifique au cœur des processus de changement d'échelle du laboratoire au pilote industriel et donc du transfert de l'innovation académique vers le secteur industriel.

Au plan des sciences de base, la compréhension et la quantification des processus physiques, chimiques et biologiques aux échelles moléculaires, microscopiques et mésoscopiques constituent les éléments indispensables à la conception et l'optimisation des procédés. À l'échelle moléculaire, les évolutions récentes de la modélisation et de la simulation moléculaire permettent par exemple d'estimer les voies réactionnelles les plus probables qui ont lieu à la surface d'une structure cristalline d'un site actif au sein d'un réseau poreux catalytique, ou de prévoir les propriétés thermodynamiques des corps purs et des mélanges. L'échelle nanométrique est celle des matériaux par exemple. Il s'agit soit d'en décrire la croissance (élaboration) soit de prendre en compte les interactions de surface. Des progrès notables ont été réalisés ces dernières années dans le domaine de l'intégration des processus de croissance cristalline dans les réacteurs d'élaboration des matériaux sous forme massive, de films ou de particules (domaine où l'inter-

face avec les plasmas est évidente). Mais les approches sont encore trop simplifiées, remarque encore plus vraie en ce qui concerne la description fine des propriétés de surface (hors catalyse). À la méso-échelle, la connaissance des écoulements polyphasiques (hydrodynamique et transfert entre phases), où les phénomènes interfaciaux sont souvent prépondérants, est encore un enjeu pour la modélisation des équipements.

Les procédés impliquant des systèmes ultra-divisés (cristallisation, broyage, émulsification, filtration, élaboration de membranes et films) sont compliqués par les interactions entre les surfaces des éléments dispersés, ce qui nécessite le greffage d'outils de la physico-chimie sur ceux du génie chimique. En effet, ces procédés sont contrôlés par des étapes physico-chimiques comme l'agrégation, la coalescence, la fragmentation, la démixtion, la précipitation ou les transitions polymorphiques. La prédiction et le contrôle de la taille et de l'uniformité des éléments dispersés impliqués sont donc essentiels pour la maîtrise du procédé. Pour atteindre cet objectif, trois voies sont développées : (1) une description thermodynamique qui établit le lien entre états macroscopiques d'équilibre et interactions inter-moléculaires dans le système (contribution de volume). C'est le moteur de l'évolution spontanée du système ; (2) une description cinétique focalisée sur les barrières qui s'opposent à la recombinaison des éléments dispersés et les contrôlent par l'ajustement des interactions intermoléculaires (contribution de surface). C'est le frein à l'évolution spontanée du système ; (3) un lien multi-échelle permettant de contrôler frein et moteur et de décrire l'évolution collective de la population. C'est la propagation, ou dynamique du système.

Les récentes avancées scientifiques en biologie liées au développement de nouveaux outils d'investigation à très hauts débits ont permis des améliorations considérables des connaissances, accompagnées de retombées majeures dans les biotechnologies industrielles. Les biologistes, en focalisant leurs travaux sur la compréhension et la modélisation des dynamiques des processus biocatalytiques

aux échelles moléculaires, microscopiques et macroscopiques, rendent possible le développement de nouveaux biocatalyseurs très performants. L'intégration des compétences biologiques au sein de la communauté du génie des procédés et *vice versa* permet l'émergence de questionnements nouveaux. En considérant la cellule et le bio-réacteur selon une vision systémique, la compréhension et la modélisation des interactions entre les phénomènes biologiques et physico-chimiques, sont des enjeux majeurs pour identifier et lever les verrous biologiques et/ou physiques qui contraignent les performances

Dans le domaine de l'énergie, la valorisation ultime des ressources (chaleur fatale), l'intégration des énergies renouvelables dans les procédés, la vectorisation (production d'hydrogène ou gaz de synthèse par exemple) et le stockage par voie thermochimique ou électrochimique sont des directions de recherche très actives au cœur de la discipline.

Au plan de l'intégration, on assiste à une modification rapide des échelles d'espace et de temps prises en compte avec l'évolution des sciences de base et des moyens de calcul. L'exemple emblématique est la catalyse (domaine partagé avec les chimistes) et la biocatalyse (domaine partagé avec les biochimistes et les biologistes) où le développement d'outils de très hauts débits et de la modélisation moléculaire a bouleversé les méthodes et les concepts. Les objectifs prioritaires de l'intégration changent en particulier avec la prise compte de plus en plus forte des enjeux environnementaux et sociétaux comme l'illustrent les concepts de « *Green Chemistry* » et d'*éco-conception* (économie circulaire). L'évolution de la simulation numérique a permis de faire émerger des nouveaux paradigmes comme celui de l'ingénierie inverse (*reverse engineering*) qui cherche à concevoir un processus de production à partir de la définition des propriétés d'usage d'une molécule, d'un matériau, d'un aliment...

Au plan industriel, le développement de nouvelles technologies de production/ fabrication avancées est un objectif prioritaire. On remarque à la fois une évolution vers la réduction d'échelle (« *down-scaling* ») et la nécessité

de continuer à résoudre des problèmes de dimensionnement à grande échelle («*up-scaling*»). Les contraintes industrielles génèrent en retour des questionnements scientifiques concernant par exemple la flexibilité et l'intermittence par rapport à la source d'énergie, la réduction de l'empreinte environnementale, la miniaturisation, la décentralisation de la production, l'utilisation de matières premières renouvelables ou recyclées, la robustesse des procédés... Compte-tenu de l'évolution rapide des produits et des normes de sécurité, les technologies industrielles doivent être de plus en plus contrôlables et adaptables, deux enjeux qui renvoient à une meilleure compréhension des processus élémentaires, à leur couplage et à leur simulation.

C. Moyens d'action et d'organisation

Forces et structuration de la discipline

Pour simplifier, le génie des procédés français est structuré selon deux grandes familles de laboratoires, les laboratoires généralistes (à Nancy et Toulouse) et les laboratoires spécialisés. Les spécialités bien identifiées sont la catalyse, les bioprocédés, l'énergie, les matériaux, l'agroalimentaire, l'environnement, les déchets et les co-produits. Géographiquement, la communauté se répartit de manière assez homogène sur tout le territoire. Sur la base du nombre de publications, le génie des procédés français se situe au 3^e rang européen (après l'Allemagne et le Royaume-Uni) et au 6^e rang mondial.

Les acteurs français du GP se retrouvent au sein de la Société Française de Génie des Procédés (SFGP) et de l'*European Federation of Chemical Engineering* (EFCE) dont plusieurs groupes de travail sont animés par des français. Trois GdR fédèrent plusieurs pans du GP : «*Approches Multiphysiques pour les Colloïdes Concentrés*» (AMC2), «*Ingénierie des Biosystèmes*» et «*Thermodynamique des systèmes complexes*». Les Investissements d'Avenir ont peu modifié le paysage national, à l'exception du domaine du solaire (Labex SOLSTICE).

III. Plasmas/Lasers

A. Positionnement

Les recherches menées par la communauté plasma-laser de la section 10 visent à utiliser l'interaction entre de l'énergie électromagnétique (haute tension continue éventuellement impulsionnelle, excitation basse fréquence, radiofréquence, micro-ondes, rayonnement laser allant de l'IR à l'UV, etc.) et un milieu matériel (souvent gazeux, parfois liquide, dans le cas des plasmas, essentiellement solide dans le cas des lasers) pour induire des transformations de la matière spécifiques et innovantes ayant un intérêt applicatif dans des domaines allant des matériaux au biomédical, en passant par l'énergie, le transport et l'environnement.

Ainsi, les plasmas de décharge sont des milieux ionisés obtenus par couplage d'énergie électromagnétique avec un gaz, plus rarement un liquide. Selon la pression (du microbar à plusieurs bars) et la façon de coupler l'énergie, ces plasmas peuvent être à l'équilibre thermodynamique (plasmas thermiques) ou hors équilibre. Dans les procédés lasers, c'est un faisceau laser qui interagit avec un matériau *solide* auquel l'énergie lumineuse est transférée pour induire des changements de phase allant jusqu'à l'évaporation et, pour de fortes intensités laser, à la formation d'un plasma dont l'étude fait appel à des approches similaires à celles utilisées pour les plasmas de décharge.

Même si les voies utilisées pour induire les transformations sont différentes (énergie électrique pour les plasmas de décharge, énergie radiative pour les procédés lasers) les recherches partagent un socle disciplinaire commun ainsi que le fait d'étudier des systèmes complexes sièges de nombreux phénomènes couplés. Ainsi, l'étude des plasmas et procédés lasers fait-elle intervenir des problématiques de physique des décharges (phénomènes de claquage), physique des plasmas (processus élémentaires

et effets collectifs, interactions onde-plasma), physique des lasers, physique atomique et moléculaire, cinétique chimique, interaction plasma/matériau et laser/matériau, phénomènes de transport qui doivent être traités de façon couplée. Ce domaine demande donc une approche pluridisciplinaire et des chercheurs de disciplines différentes travaillent ensemble aux interfaces avec la science des matériaux, le génie des procédés, la thermique, la dynamique des fluides, la combustion et la santé.

Les plasmas froids/procédés lasers constituent une thématique de recherche très riche en enjeux scientifiques et applicatifs du fait de la variété des phénomènes physiques et chimiques couplés mis en jeu et de sa très vaste gamme d'applications industrielles et sociétales. Les travaux correspondants peuvent être déclinés selon leurs domaines d'application en cinq axes principaux :

- matériaux : gravure aux échelles micro- et nanométriques, dépôt de couches minces multifonctionnelles, nanostructurées et nanocomposites, synthèse de nanoparticules, nanotubes et nanofils, micro- et nanostructuration de surface, soudage, perçage et découpe de métaux, verre et autres matériaux par laser ou plasma thermique, fabrication additive 3D ;

- énergie : plasmas de bord et sources de neutres pour ITER, dépôt de couches minces pour les systèmes de conversion de l'énergie (cellules solaires photovoltaïques, dispositifs thermoélectriques) et de stockage de l'énergie (piles à combustible, microbatteries) ;

- environnement : conversion des polluants atmosphériques (NOx, COV), régénération des catalyseurs, combustion propre, décontamination bactérienne, vitrification des déchets ;

- transport : contrôle d'écoulements, déclenchement et contrôle de la combustion, propulsion spatiale (propulseurs plasmas) ;

- biologie et santé : stérilisation, effet antitumoral des plasmas *in vitro* et *in vivo*.

B. Moyens d'action et d'organisation

La communauté plasma-laser est répartie sur l'ensemble du territoire français, le plus souvent dans des équipes au sein de laboratoires traitant également d'autres disciplines (matériaux, combustion, énergie...) ce qui facilite les approches globales. La pluridisciplinarité de la thématique se traduit par l'appartenance de ces laboratoires et équipes à de nombreux GdR et Labex, le plus souvent centrés sur un domaine applicatif (énergie, matériaux, TIC, santé...). Parmi eux, les GdR ABIOPLAS (plasma/biologie/médecine) et ACO-CHOCOLAS (comportement des matériaux à hautes vitesses de déformation) sont construits autour de thématiques actuellement en plein essor.

Au niveau national, le « Réseau Plasmas Froids », créé en 2002 et rattaché à la Mission pour l'Interdisciplinarité (MI) du CNRS, est devenu au fil des années un élément structurant qui contribue à maintenir l'unité scientifique de ce domaine malgré la diversité de ses applications. On note par ailleurs des interactions fortes entre les communautés « plasmas froids/procédés lasers » de la section 10 et « plasmas chauds » de la section 4 au niveau des travaux de la Fédération ITER (interaction plasma/surface, turbulence et instabilités plasmas) et de l'interaction laser/matière. La communauté interagit aussi fortement avec les sections 8 (micro- et nanotechnologies, énergie électrique), 9 (ingénierie des matériaux) et 15 (chimie des matériaux, nanomatériaux et procédés). Notons enfin l'existence de deux laboratoires internationaux : le LITAP (France/Québec) et le LIPES (France/Luxembourg).

C. Recherches actuelles et axes de développement

Comme on l'a vu, les recherches menées par la communauté sont motivées par les pro-

priétés physiques et physico-chimiques originales, uniques et versatiles, souvent liées à la grande richesse de processus élémentaires et aux comportements collectifs présents dans ces milieux. Ceci leur confère un potentiel d'applications assez exceptionnel dans nombre de domaines : matériaux, énergie, dépollution, transport, biomédical... Ainsi l'émergence et l'évolution des thématiques de recherche abordées par la communauté résultent d'un dialogue permanent entre études fondamentales et potentialités d'applications.

En corollaire, il est difficile de décliner les recherches en fonction de questions fondamentales ou d'applications et il nous a paru plus aisé de les décliner en fonction des quatre groupes thématiques relativement bien identifiés qui constituent la communauté plasmas-lasers de la section 10 : plasmas basse pression, plasmas atmosphériques hors équilibre, plasmas thermiques et procédés lasers.

Les recherches actuelles sur les **plasmas basse pression** portent sur les phénomènes de transport dans les plasmas magnétisés, les mécanismes d'attachement/détachement et les instabilités dans les plasmas électronégatifs (plasmas ions-ions), la cinétique chimique dans des plasmas réactifs de plus en plus complexes, tels que les plasmas diphasiques gaz/solide (nanoparticules ou poudres, qu'elles soient injectées ou formées au sein du plasma). La nécessité de contrôler les flux et énergies des différentes espèces (neutres, ions) conduit de plus à étudier de nouveaux modes de couplage de l'énergie : plasmas pulsés, excitation double fréquence, excitation à forme d'onde optimisée.

Les grands domaines d'application de ces plasmas sont la propulsion plasma, les sources de neutres chauds pour ITER et les traitements de matériaux pour la micro/nanoélectronique, la photonique, les dispositifs de conversion et de stockage de l'énergie. Les enjeux des applications faisant intervenir une interaction plasma/matériau sont la gravure sélective et contrôlée de matériaux complexes, la synthèse de nanoparticules, le dépôt de couches minces multifonctionnelles ou nanocomposites, la croissance épitaxiale à basse température...

Les **plasmas atmosphériques hors équilibre** attirent une attention croissante du fait de leur fort potentiel applicatif. Ce sont en effet des sources d'espèces actives (métastables, radicaux, UV...) fonctionnant à basse température et ne nécessitant pas de systèmes de pompage lourds. Ceci est un atout important pour certaines applications pour des raisons économiques mais aussi car les liquides et les matériaux biologiques, organiques et/ou naturels, ne peuvent être traités sous vide. Cependant, ces décharges sont naturellement filamentaires et créer une décharge homogène à la pression atmosphérique est un défi qui n'a pu être relevé que grâce à des études fondamentales de physique des décharges et à la conception de nouveaux modes de couplage de l'énergie au sein du gaz. Ceci a conduit au développement de nouvelles sources plasmas, elles-mêmes à l'origine de nouvelles applications. Ce domaine de recherche a connu ces dernières années des avancées très importantes au plan international avec un apport très fort des équipes françaises. Parmi ces nouvelles sources, on peut citer les décharges couronnes nanosecondes, les décharges à barrière diélectrique, les décharges dans les capillaires, les micro-décharges à cathode creuse et les micro-jets de plasma. Les domaines d'applications sont la dépollution (de gaz et liquides), l'aide à la combustion, le traitement de surface, la synthèse et la détection de nanoparticules (par injection d'aérosols) et les sources d'espèces pour applications biomédicales.

Les recherches en plasma/médecine n'ont cessé de prendre de l'importance ces dernières années. Après des études sur la stérilisation, sont apparues plus récemment les applications thérapeutiques des plasmas à la pression atmosphérique, sources d'espèces actives d'oxygène, d'azote et de photons UV, d'abord pour soigner des lésions de la peau, puis des lésions internes (dermato-cosmétologie et cancérologie). Après de premiers résultats cliniques prouvant leur efficacité, a commencé l'étude des mécanismes biologiques induits au niveau des cellules et tissus par ces espèces actives. En termes de plasmas, ceci implique de concevoir, réaliser et optimiser des sources d'espèces actives parfaitement contrôlées et

calibrées, puis de développer des sources endoscopiques capables de fournir localement ces espèces actives dans le corps. La France est avec le Japon et les États-Unis pionnière dans ce domaine qui concerne maintenant au plan national un nombre important d'équipes réunies dans le GdR ABIOPLAS.

Les **plasmas thermiques**, créés à la pression atmosphérique (ou supérieure) et proches de l'équilibre thermodynamique (plasmas d'arcs) ont connu eux aussi de nouveaux développements tant fondamentaux qu'appliqués. Les études portent sur les phénomènes aux électrodes (spot cathodique, gaines, transfert d'énergie, changement de phase), les phénomènes de transport et de rayonnement dans des conditions hors équilibre ou dans les plasmas multiphasiques de compositions de plus en plus complexes. Un effort important a été consacré à la description du caractère 3D et fluctuant/turbulent de ces plasmas (tomographie et modèles numériques 3D). Un grand domaine d'application de ces plasmas concerne le dépôt de couches céramiques par projection thermique, les progrès récents portant sur le contrôle de la micro/nanostructure de ces couches. Alors que les applications aux disjoncteurs sont moins présentes, il apparaît de nouveaux enjeux dans le domaine du transport avec l'étude des décharges partielles et arcs mettant en défaut la sécurité dans la chaîne de production-gestion-distribution-utilisation qui tend à devenir « tout électrique ».

Les **procédés laser** se sont fortement développés ces dernières années avec l'arrivée de nouvelles technologies permettant d'atteindre de larges gammes de propriétés optiques et énergétiques. Les recherches portent d'une part sur le contrôle des propriétés du faisceau laser (polarisation, profilage temporel), et d'autre part sur la détermination de la dynamique, aux échelles de temps femto-seconde, de l'absorption et du transfert de l'énergie laser dans la matière et la transformation des matériaux. Elles sont aussi associées à la mise en œuvre des procédés qui implique leur automatisation et leur contrôle. On s'intéresse aussi au comportement en conditions extrêmes (température, pression) des matériaux, à la

dynamique des changements de phase et aux cinétiques de solidification/transformation rapides produisant des microstructures hors d'équilibre thermodynamique.

Les procédés laser ont connu un très fort développement dans les domaines de la mécanique et de la microélectronique. Les nouveaux enjeux s'orientent vers les échelles nanométriques impliquant des lasers ultra-courts (nanofabrication, nanostructuration de surface) et/ou une plus large gamme de matériaux (composites, verres, métaux, céramiques, polymères, matériaux à gradient). Ceci ouvre leurs champs d'application à des domaines tels que l'électronique organique, la nanofabrication 3D, le biomédical, les transports du futur. L'ambition est également de développer des outils de simulation prédictifs allant jusqu'au comportement en service pour proposer de nouvelles méthodes de fabrication d'objets des plus petits aux plus grands.

Dans ce contexte très pluridisciplinaire avec de multiples domaines applicatifs, on note des tendances d'évolution communes à l'ensemble de la communauté plasmas/lasers : complexité croissante des systèmes étudiés (précurseurs complexes, milieux diphasiques...), évolution vers des échelles spatiales (micro- et nanométriques) et temporelles (décharges impulsionnelles, lasers ultra-courts...) de plus en plus petites. De plus, de nouveaux champs applicatifs sont apparus, tout particulièrement dans les domaines de l'énergie et du biomédical, ouvrant de nouvelles perspectives et soulevant de nouveaux défis. Il convient enfin de souligner que les avancées récentes dans la compréhension des mécanismes au sein du milieu et en interaction avec son environnement ont été obtenues grâce aux développements importants des diagnostics et des modélisations de ces milieux complexes et procédés associés. On a en particulier assisté à de réels progrès dans le domaine des diagnostics résolus spatialement et temporellement, tels que les diagnostics optiques d'émission ou d'absorption (dans les domaines infrarouge, UV-visible et X) qui ont bénéficié des progrès récents des sources de photons (diodes laser), des systèmes de détection (caméras rapides) et

du développement de nouveaux grands instruments X-FEL et grands lasers.

Du côté de la modélisation, on assiste à un renouveau des études semi-analytiques pour fournir des modèles incorporables dans des codes de calcul, e.g. effets collectifs (dynamique des gaines), instabilités, processus collisionnels radiatifs, etc. En parallèle, des modèles numériques, fluides ou particulaires, de plus en plus intégratifs et détaillés couplant des effets allant du dépôt d'énergie à l'interaction avec le milieu extérieur sont développés et permettent de répondre à des questions fondamentales de plus en plus pointues et de traiter les situations complexes exigées par les applications visées. En particulier, les modèles fluides permettent désormais de prendre en compte les couplages entre phénomènes et/ou échelles : interaction onde-plasma et effets d'auto-organisation, transport anisotrope et instabilité dans les plasmas magnétisés, physico-chimie et transport dans les plasmas diphasiques, effets non-locaux de photo-ionisation et propagation d'ondes d'ionisation, effets 3D de dissymétrie et de ramification, etc. Par ailleurs, des progrès importants ont été réalisés dans la description de l'interaction plasma-laser/surface grâce à la mise en œuvre d'approches de dynamique moléculaire qui permettent d'accéder non seulement aux processus élémentaires mais aussi aux effets de synergie qui caractérisent cette interaction. Ainsi, la complexité des systèmes plasma-laser conduit à développer des approches de modélisation multiphysiques et multiéchelles avec un couplage de plus en plus fort avec les expérimentateurs.

D. Conclusion

La communauté plasma-laser mène des activités de recherche multidisciplinaires où études fondamentales et développement de procédés innovants se nourrissent mutuellement. Elle est à l'interface avec d'autres disciplines et au cœur de multiples enjeux industriels et sociétaux dans les domaines de l'énergie, de l'environnement, des transports

et de la santé. Elle étudie des systèmes de plus en plus complexes qui ne pourront être appréhendés de façon globale que grâce à de nouvelles avancées en termes de diagnostics et de modélisation mais aussi en consacrant du temps et des moyens à des études visant à la détermination de données de base. Ces études, primordiales pour aller plus avant dans la compréhension des systèmes complexes, sont cependant difficiles à financer dans le cadre actuel du paysage de la recherche.

La communauté plasma/laser française est très dynamique et largement reconnue au niveau international. Elle doit cependant veiller ces prochaines années à conserver un bon équilibre entre recherches amont s'appuyant sur des diagnostics et des modèles de plus en plus performants et sophistiqués et applications. Pour cela, il est important qu'elle puisse continuer à bénéficier de la dynamique de structures telles que le réseau national « Plasmas Froids » de la MI du CNRS et des GdR qui fédèrent les acteurs de la communauté. Le maintien du recrutement de chercheurs, ingénieurs et techniciens dans les laboratoires est également primordial. Enfin, alors que l'on observe un rôle de plus en plus important du pilotage de la recherche par les régions, il est capital de veiller à une cohérence nationale des moyens, tant au niveau des laboratoires que des plate-formes technologiques.

IV. Combustion

A. Description de la thématique et axes de développements

Plus de la moitié des besoins nationaux en énergie sont couverts par des procédés de combustion basés sur l'utilisation du pétrole, du gaz, du charbon, des déchets ou encore des biocarburants. Dans les secteurs de l'agri-

culture et des transports, cette couverture avoisine les 100%. Les applications de la combustion sont donc nombreuses : moteurs terrestres, aériens et spatiaux, turbines à gaz, production industrielle (haut-fourneaux, centrales thermiques...) impliquant une grande variété de systèmes fonctionnant depuis la pression atmosphérique jusqu'à une centaine de bars. Les géométries rencontrées et les systèmes d'injection des comburants sont par conséquent multiples et les problèmes à traiter sont intrinsèquement multiphysiques, incluant la mécanique des fluides, la thermochimie, les pertes thermiques aux parois et le rayonnement. Les carburants utilisés sont de plus en plus diversifiés générant une multitude de mélanges depuis la combustion propre à l'hydrogène, posant le problème de son obtention, jusqu'à l'utilisation de résidus de l'agriculture, en passant par les ergols. Les régimes d'écoulement rencontrés dépendent de l'application : laminaire ou turbulent, subsonique ou supersonique sans oublier les phénomènes de déflagration et de détonation. Le couplage de la combustion avec les modes acoustiques du système est également à prendre en compte pour nombre de ces applications.

Une très large gamme d'échelles est présente : inférieure au millimètre pour la zone de réaction, de quelques millimètres à plusieurs mètres ou kilomètres, de la méso-combustion au four industriel ou à l'incendie de forêt. Au problème déjà complexe de la turbulence pour un fluide inhomogène en température, composition et phase (liquide ou gazeuse), s'ajoute le couplage avec les fronts réactifs très minces. À la disparité des échelles spatiales est bien sûr associée celle des échelles temporelles liées à la cinétique chimique, aux transports diffusifs et convectifs et aux échanges thermiques. Actuellement, toute la problématique précitée est abordée dans les laboratoires de la section 10 au travers de la caractérisation des cinétiques de mélanges combustibles, de l'expérimentation et de la simulation numérique des brûleurs et systèmes de combustion.

De par la richesse de ses problématiques et de son impact sociétal, la combustion est en relation avec un grand nombre d'autres

domaines de recherche. Une synergie forte est observée en premier lieu avec la dynamique des fluides car à la base de tout système de combustion réside un écoulement non-réactif mono- ou multi-phasique. On retrouve également une synergie forte avec les plasmas à la fois pour leur utilisation dans le contrôle de la combustion (dépollution, allumage, stabilisation en régime pauvre) et pour des méthodes de diagnostic partagées pour la mesure d'espèces. Le développement de biocombustibles à base d'algues ou de végétaux dont l'étude relève du génie des procédés doit s'effectuer en collaboration avec des spécialistes des cinétiques de la combustion et des diagnostics de polluants. Enfin, l'aspect thermique est très présent dans les développements basés sur l'association des deux modes énergétiques solaire et gaz (hybridation), les problèmes d'incendie et de ventilation des bâtiments, la tenue au feu des matériaux. L'optimisation de la consommation des carburants dans la production d'énergie, passe par l'hybridation avec l'utilisation d'énergie renouvelables (éolien ou solaire) ou par l'utilisation de ces énergies pour produire de l'hydrogène (centrales photovoltaïques ou réacteur solaires).

La communauté interagit également avec les mathématiques appliquées (INSMI) pour créer des méthodes numériques et des algorithmes spécifiquement adaptés à la simulation de la combustion, et avec l'informatique et le génie logiciel (INS2I) dans le domaine du calcul haute performance (HPC). Le développement des carburants alternatifs issus de la biomasse et des déchets nécessite une collaboration avec le milieu médical pour évaluer en amont la dangerosité de certains composés (NOx, aromatiques, suies...). Enfin, la nécessité de minimiser l'impact de la combustion sur l'environnement implique aussi des échanges avec les sciences de la terre (captage de CO₂, exploitation des gaz de schiste...) et la climatologie.

Bien que les énergies dites renouvelables (éolien, solaire) voient leur part augmenter considérablement, les progrès de l'exploitation des gisements difficilement accessibles, l'utilisation des gaz de schiste et la production de carburant par la biomasse laissent présager

encore plusieurs décennies de développements amont pour contribuer à la fois à l'optimisation de l'utilisation des ressources et à la minimisation des impacts négatifs en terme de climat et de santé publique.

La recherche en combustion peut être schématiquement décomposée en trois grandes thématiques : (i) cinétique et diagnostics associés ; (ii) diagnostics dans des systèmes de combustion réels ou canoniques ; (iii) théorie, modélisation et simulation numérique. Parmi les développements récents, on peut citer :

- l'émergence de diagnostics simultanés et haute cadence rassemblant une métrologie liée aux mesures aérodynamiques (vitesse, pression, température de paroi) et thermo-chimique (température, concentrations, suies) ;

- la détermination de schémas cinétiques complets pour des carburants non-conventionnels comportant des constituants issus de la biomasse ;

- la montée en puissance du HPC et de la simulation aux grandes échelles « haute-fidélité », incluant la modélisation de problèmes de plus en plus complexes, réalistes et couplés permettant la prise en compte de cinétiques détaillées, l'introduction du rayonnement, de la thermique des parois et l'amélioration de la prise en compte de la phase liquide, tout ceci dans des géométries proches des systèmes industriels (moteurs, fours...) ou des incendies (feux de forêts, de bâtiments...)

B. Moyens d'action et organisation

On compte une dizaine de laboratoires, unités propres ou mixtes CNRS, possédant des équipes de recherche en combustion ; une quarantaine de chercheurs CNRS sont affectés à cette thématique. À ces acteurs s'ajoutent l'IFPEN (moteurs automobiles), l'IRSN (sûreté nucléaire), l'ONERA (aéronautique et spatial), le CERFACS (simulation essentiellement pour l'aéronautique). Cette

communauté d'assez petite taille se retrouve autour de projets ANR, de programmes européens et de collaborations inter-Labex.

Une animation efficace de la communauté est menée par le GFC (Groupement Français de Combustion), section française du *Combustion Institute*. Ce groupement rassemble environ 200 adhérents issus du monde académique ou industriel. Le GFC organise des journées thématiques (éventuellement avec d'autres sections européennes), une journée annuelle des doctorants et décerne des prix de thèse bisannuels. Tous les deux ans, une école de combustion est organisée de façon tournante par les différents laboratoires. On retiendra aussi le GdR Feux, le réseau INCA rassemblant les acteurs de la recherche et de l'industrie autour de l'aéronautique et le GIS SUCCESS constitué autour des logiciels AVBP et YALES2 qui favorise le développement mutualisé de la simulation aux grandes échelles de la combustion.

Certains laboratoires possèdent des configurations expérimentales proches des conditions réelles : moteurs aéronautiques et automobiles, turbines, installations à haute pression. La plate-forme nationale de Métrologie Optique (MéOL) de Lille gérée par le LML et le PC2A permet d'optimiser l'utilisation de métrologies telles que la PIV, la visualisation ultra-rapide et les diagnostics lasers pour la quantification d'espèces gazeuses et de suies.

Les chercheurs français sont aujourd'hui incontournables sur le plan international dans la compréhension des mécanismes réactionnels, l'étude des suies et la simulation haute-fidélité de systèmes réels. On peut néanmoins noter que les cas tests de validation complets utilisés pour le développement de modèles et comportant des mesures d'espèces, de température et de vitesse sont encore très majoritairement issus des États-Unis et récemment d'Allemagne, signe qu'une meilleure synergie des moyens et des compétences présents dans les laboratoires français est possible et permettrait d'accroître encore la visibilité de la communauté.

Enfin, les liens forts entre recherche académique et industrie sont concrétisés par la forte absorption des jeunes docteurs dans les grandes

entreprises du domaine, mouvement qui engendre un transfert efficace de connaissances.

C. Recommandations

La combustion est aujourd'hui au cœur de la transition des énergies fossiles conventionnelles vers les énergies renouvelables. La recherche joue un rôle essentiel dans la maîtrise des émissions de gaz à effet de serre et dans l'adaptation aux nouvelles normes environnementales. Des efforts importants sont également plus que jamais nécessaires pour maîtriser les risques induits par la pollution par les particules fines sur la santé.

De par son aspect multiphysique, la combustion est un domaine de recherche large, complexe et en évolution perpétuelle. Les défis attendus pour les prochaines années concernent le développement et la mise en service de nouveaux carburants (biocarburants ou fossiles) : description, augmentation de la flexibilité des systèmes existants ou développement de nouveaux concepts, ceci tout en intégrant une tolérance de plus en plus faible vis-à-vis des effets néfastes sur l'environnement et la santé. Il s'agit maintenant d'anticiper les effets indésirables afin de ne pas reproduire l'erreur du Diesel par exemple, de capter le CO₂, d'améliorer encore l'efficacité des systèmes et de favoriser la dépollution à la source.

Ces recherches en cours et futures nécessitent de renforcer encore la synergie entre les sous-communautés (modélisation-simulation/expérience/cinétique) ainsi que les actions transversales afin d'éviter qu'un nouveau carburant s'avère nocif une fois exploité massivement. En complément au portage de projets en commun déjà bien présent dans la communauté, la réactivation de réseaux ou GdR pourrait favoriser sa réactivité et son ouverture, notamment vers les mathématiques, la santé ou la physique.

Les activités de simulation liées au HPC reposent sur la disponibilité de moyens de calcul puissants pour des logiciels toujours

plus multiphysiques. Le besoin d'un soutien constant des pouvoirs publics dans ce domaine via le GENCI est donc essentiel.

Enfin, il faut prendre garde au morcellement et à la duplication des efforts de recherche qui pourraient résulter du pilotage de plus en plus présent de la recherche par les régions. Le renforcement des plates-formes nationales en simulation et diagnostics peut constituer un moyen efficace pour contrebalancer cette tendance.

V. Thermique-Énergétique

A. Description de la thématique

La thermique-énergétique s'intéresse à toutes les échelles de l'énergie thermique, de son origine à l'échelle atomique à sa conversion à l'échelle d'un système ou encore à son transfert aux grandes échelles en milieu industriel, urbain ou naturel. Les processus de transport sont ici impulsés par des sources de chaleur localisées aux frontières ou au sein des milieux concernés, jusqu'à ce que les flux initiaux s'équilibrent au cours du temps. La force de la thématique réside dans la mise en œuvre d'approches fines, expérimentales, mathématiques et numériques, permettant de déterminer avec précision d'une part les températures et les flux thermiques pour de larges gammes d'échelles spatiales et temporelles, et d'autre part les grandeurs thermo-physiques nécessaires à la résolution des équations de transport.

Pour pouvoir piloter des processus énergétiques où les aspects multi-échelles et multiphysiques deviennent incontournables, la thématique continue de développer des approches expérimentales pointues (notamment optique aux temps ultra-courts) ainsi qu'un socle d'approches numériques (méthodes inverses, de changement d'échelle, stocha-

stiques, réduction de modèles) adaptées aux échelles de longueur traitées. L'accès à des moyens de calcul conséquents a permis l'émergence de nouveaux outils numériques basés sur l'imagerie 3D, les méthodes de gaz sur réseau ou encore les calculs *ab initio*.

Au sein de la section 10, la thématique cultive ainsi de fortes interactions avec la dynamique des fluides, le génie des procédés ou la combustion. Cette culture pluri-thématique l'amène à participer au sein de l'INSIS aux développements autour des nanotechnologies (section 8) ou des méthodes d'imagerie et de mesure de champs en mécanique du solide (section 9). Elle se positionne également aux interfaces avec l'INP en physique des nano-échelles (section 3), l'INC en sciences des matériaux (section 15) ou encore l'INSB en biologie-santé. Ces interactions riches, associés à ses spécificités propres, offrent à la thermique-énergétique un cadre d'évolution en constant renouvellement. Tout l'enjeu pour la communauté est, dans les années à venir, de savoir être le moteur des futures évolutions la concernant sans devenir, plus restrictivement, un simple acteur au service du développement de ses multiples partenaires.

B. Axes de développement

La description suivante est organisée autour des grands axes de recherche ayant leurs dynamiques internes propres.

1. Transferts à nano-échelle : lois de transport et nano-systèmes

Cette thématique a pris ces dernières années un essor international remarquable. Sa dynamique actuelle réside dans le fait d'avoir consolidé un nouveau cadre théorique pour comprendre le transport de l'énergie aux très courtes échelles en s'appuyant fortement sur la physique de la matière condensée, la physique statistique et l'électromagnétisme. En effet, dans des systèmes dont la taille est de l'ordre du libre parcours moyen des quanta d'énergie,

les lois de transport habituelles sont mises en défaut. La nanothermique a ainsi mis en évidence de nouveaux modes de transport « exaltés » de l'énergie (polaritons de surface) décisifs pour l'amplification énergétique aux courtes échelles. Les travaux se sont focalisés sur des nanomatériaux (dont récemment le graphène) avec des applications attendues en électronique, en thermoélectricité, en systèmes photovoltaïques et en isolation thermique (superisolants). Les efforts actuels portent aussi sur le développement complet de nanosystèmes à thermique optimisée (NEMS, *lab on a chip*), sources d'un gisement d'innovation important.

2. Transferts à micro-échelle

Portée par le développement de la microfluidique, cette activité concerne les écoulements avec ou sans changement de phase dans un contexte où les phénomènes surfaciques peuvent dominer les contributions volumiques. Les objets étudiés sont des micro-caloducs ou encore des micro-échangeurs de chaleur, avec un effort portant sur l'intensification des transferts (réfrigération, électronique, piles à combustibles) ou sur la réduction des quantités de réactifs requis dans des réactions chimiques très endo- ou exo-énergétiques par rapport à ceux usuellement nécessaires à macro-échelle.

3. Intensification du transport convectif dans les fluides

Ces travaux concernent le rôle des instabilités hydrodynamiques dans les transferts convectifs, et la manipulation des structures thermo-convectives ou turbulentes, avec des applications directes dans l'intensification des échanges de chaleur et de masse. Des retombées directes concernent la thermique du bâtiment ou encore la diminution de la surchauffe induite par les panneaux photovoltaïques dans les bâtiments. Les instabilités peuvent être aussi générées dans des écoulements de fluides non-newtoniens, des émulsions ou des suspensions et accroître les taux de mélange pour un apport énergétique moindre, trouvant ainsi des appli-

cations intéressantes en génie des procédés : agroalimentaire, cosmétiques, production de biocarburants par conversion μ -algale.

4. Transferts radiatifs dans les milieux semi-transparents

Les travaux les plus saillants portent ici sur le rayonnement des gaz et plasmas, les couplages radiatifs, les transferts radiatifs dans les milieux hétérogènes, la caractérisation fine des propriétés radiatives des matériaux, la conception de matériaux à propriétés radiatives optimales et l'approche statistique du rayonnement. La communauté française, très active à l'échelle internationale, entretient de nombreux liens avec des partenaires académiques et industriels de la combustion, de la thermique du bâtiment, des énergies renouvelables et du secteur aéronautique et spatial. Les travaux en cours couplant transferts en champs proche et lointain cherchent à obtenir une vision unifiée du transport radiatif, de l'échelle atomique à celle des systèmes industriels.

5. Transferts multiphasiques dans les milieux hétérogènes

Cette thématique couvre en premier lieu la thermique des milieux multiphasiques où interviennent des changements de phase : condensation, évaporation ébullition avec une prise en compte fine du rôle exercé par les interfaces et la caractérisation thermo-cinétique de collections de gouttes (projection thermique, sprays refroidissants) ou encore la compréhension de phénomènes multi-physiques gouvernant le déclenchement et la propagation de feux naturels ou industriels aux échelles locales et globales. En second lieu, s'est dégagé en France une communauté très reconnue autour des transferts thermiques dans les milieux poreux dont l'originalité est fondée sur le développement de méthodes d'homogénéisation (par prise de moyenne volumique ou approches asymptotiques) permettant de combiner les différentes échelles contribuant au transport. Cette dynamique

s'est encore récemment accrue grâce au développement de méthodes de calcul intégrant directement des images 3D (μ -tomographie X, IRM...) permettant de connecter grandeurs homogénéisées et paramètres texturaux des milieux. Les applications sont multiples et concernent notamment la sûreté nucléaire, la géothermie, le secteur pétrolier, le stockage des déchets, la mise en forme des composites, la combustion de la biomasse, l'isolation thermique dans les bâtiments

6. Optimisation énergétique des systèmes

Cette thématique multi-échelle met en avant le système lui-même qui devient le cœur de l'activité de recherche. Un système est constitué de différents composants au travers desquels le transfert de l'énergie thermique peut être couplé à d'autres phénomènes tels que le transfert de masse, l'apport d'énergie mécanique, chimique, électromagnétique, nucléaire ou encore bio-chimique. L'objectif est donc l'optimisation des échanges énergétiques entre composants, dans un but finalisé de diminution de la consommation d'énergie spécifique ou d'utilisation optimale du potentiel énergétique du système (cogénération par exemple). À ce titre cette activité devra renforcer ses liens avec les préoccupations environnementales, économiques et juridiques au cœur des grandes mutations socio-économiques de notre siècle.

C. Moyens d'action et organisation

Plus de la moitié de la trentaine de laboratoires ayant une activité forte en thermique/ énergétique est rattachée principalement à la section 10 avec une répartition géographique couvrant tous les sites universitaires où l'INSIS est historiquement implanté. Plusieurs structures souples soutenues par le CNRS fédèrent la vie de la communauté : GdR ACCORT, SYRE-

DOSSI et Feux, GDRE « Thermique des Nanomatériaux et des Nanosystèmes » à l'échelon européen. Certaines thématiques se retrouvent également dans les GdR MIC et « Mesures de champs et identification en mécanique des solides » relevant de la section 9 ainsi que dans les GdR HySPàC et Thermoélectricité portés par la section 15. Une autre initiative à souligner est le groupe METTI dont les écoles thématiques attirent des chercheurs du monde entier. Par ailleurs la communauté est dotée d'une société savante nationale, la SFT, qui organise un congrès annuel ainsi que plus d'une dizaine de journées thématiques par an. Elle est très active sur la scène internationale dans l'organisation de conférences et de réseaux : *International Heat Transfer Conference (IHTC)*, *International Center for Heat and Mass Transfer (ICHMT)*, *Eurotherm*, *European Conference on Thermal Properties (ECTP)*.

D. Recommandations

La place de la thermique/énergétique au CNRS mérite aujourd'hui un débat de fond, qui pourrait prendre la forme d'assises, dans la mesure où ses effectifs en section 10 ont été divisés par deux entre 2005 et 2014. Ainsi, la

pluridisciplinarité qui constitue l'une de ses originalités peut aussi s'avérer être une faiblesse, ses chercheurs pouvant se déporter au-delà de ses frontières communes avec d'autres thématiques. Des questionnements demeurent aussi sur son articulation interne entre les activités liées aux transferts d'énergie à nano-échelle (marquées par une forte empreinte physicienne), celles plus métrologiques menées à l'échelle du composant, et celles proches du génie des procédés à l'échelle du système. La communauté doit donc se poser la question de son ressourcement en lien avec les disciplines situées à ses interfaces : physique de la matière condensée, optique, électromagnétisme, sciences des matériaux, mécanique, biologie...

À ce titre, les préoccupations liées à la transition énergétique doivent aujourd'hui ouvrir à la discipline un champ d'action favorable à un nouvel essor : qu'il s'agisse de conversion, de stockage ou d'utilisation optimisée de l'énergie thermique au sein de systèmes, elle est au cœur de nombreux verrous identifiés par la cellule Énergie du CNRS et par l'Alliance ANCRE. Des efforts sont à mener vers les sciences des matériaux car la conception d'un système énergétique optimisé passe nécessairement par le recours à des matériaux « hors normes » et par une interaction « intelligente » entre ses composants.

Comité national de la recherche scientifique. « Section 10- Milieux fluides et réactifs : transports, transferts, procédés de transformation ». *Rapport de conjoncture 2014*, [édition PDF en ligne]. ISBN : 978-2-271-08746-1. Disponible sur : <http://rapports-du-comite-national.cnrs.fr/>