LIVRE BLANC DE LA RECHERCHE EN MÉCANIQUE

Enjeux industriels et sociétaux
Recherche, innovation, formation

Association Française de Mécanique

Février 2015

AFM
ASSOCIATION FRANÇAISE DE MÉCANIQUE

edp sciences

17, avenue du Hoggar
Parc d activités de Courtaboeuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

La filière mécanique est une pierre angulaire de l'industrie. Elle constitue à la fois un secteur industriel à part entière (l'industrie mécanique représentée par les métiers de l'équipement, de la transformation et de la précision regroupés au sein de la FIM, Fédération des Industries Mécaniques), mais aussi un ensemble de technologies sur lesquelles se fondent de nombreux secteurs tels que ceux qui construisent des matériels pour les transports, l'énergie, la santé, l'environnement.

Ce Livre Blanc de la Recherche en Mécanique est élaboré par le Haut Comité Mécanique (HCM) dans le cadre de l'Association Française de Mécanique (AFM). Ses objectifs sont : l'identification des besoins industriels et des technologies innovantes, la proposition des orientations de recherche et technologie pour faire initier des projets R&D, et l'apport de l'information pour des industriels, des décideurs mais aussi des scientifiques qui peuvent ignorer les ressources que recèle leur milieu.

Quatre grands chapitres composent ce Livre Blanc. Après la présentation des éléments du panorama, les grands enjeux dans les secteurs industriels sont détaillés, les défis scientifiques sont traités par thématiques de recherche et les approches qui permettent de concevoir et produire autrement sont abordées. On trouve, en annexe du livre, une liste des organismes et des laboratoires de recherche dans le domaine de la Mécanique.

Ce livre est un ouvrage collectif de 114 auteurs. Le comité de rédaction, Michel Lebouché, président du HCM, Mansour Afzali, Pierre Devalan et Claude Hauviller, a rassemblé et structuré les contributions d'individuels, des groupes de travail de l'AFM et des sociétés savantes. Il a été publié avec l'aide du Centre Technique des Industries Mécaniques et de la Fédération des Industries Mécaniques.

Imprimé en France

ISBN : 978-2-7598-1683-5
e-ISBN : 978-2-7598-1775-7
DOI : 10.1051/978-2-7598-1683-5

Cet ouvrage est publié en *Open Access* sous licence *creative commons* CC-BY-NC-ND (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/fr/) permettant l'utilisation non commerciale, la distribution, la reproduction du texte, sur n'importe quel support, à condition de citer la source.

© AFM 2015

Table des matières

Préface 1
Résumé analytique 3
Contributions 5
Introduction 9

Chapitre 1 : Éléments de panorama 15
1.1. Au commencement était la mécanique 15
1.1.1. L'industrie au cœur de l'économie 15
1.1.2. La mécanique au cœur de l'industrie 16
1.1.3. Un acteur économique majeur, un tissu de PME 17
1.1.4. Une réussite qui se joue à l'international. 19
1.1.5. À la base des grandes innovations industrielles 19
1.1.6. Des outils technologiques indispensables 21
1.1.7. Des nouveaux métiers, une image à améliorer 23
1.1.8. Le mécanicien du XXIe siècle au service de la société : les défis à venir… l'usine du futur. 24
1.2. Les technologies prioritaires. 25
1.2.1. Méthodologie. 26
1.2.2. « Entreprise performante » 27
1.2.3. « Développement durable » 28
1.2.4. « Matériaux et surface ». 29
1.2.5. « Conception et simulation de produit et procédé » 30
1.2.6. « Procédés de fabrication » 30
1.2.7. « Mécatronique ». 31
1.2.8. « Contrôle et surveillance des systèmes de production » 32
1.3. Un atout majeur pour l'innovation et l'emploi des jeunes. 33
1.3.1. La mécanique et l'emploi : tendance à venir et besoins. 34
1.3.2. Les types de profils recherchés 34
1.3.3. Les formations et l'apprentissage en mécanique 35
1.3.4. L'attractivité des métiers 36
1.3.5. Les atouts des métiers de la mécanique 37

1.4. La formation (enseignement supérieur) 38
1.4.1. Constat 38
1.4.2. Propositions 43

Chapitre 2 : Les grands enjeux : les secteurs industriels 47

2.1. L'industrie automobile 47
2.1.1. Importance macroéconomique du secteur 47
2.1.2. Tendances, enjeux et défis du secteur à l'horizon 2020 48
2.1.3. Attentes vis-à-vis des partenaires-fournisseurs équipementiers-ensembliers 48
2.1.4. Domaines clés de recherche et innovation 49
2.2. L'industrie aéronautique et spatiale 50
2.2.1. Importance macroéconomique du secteur 50
2.2.2. Tendances, enjeux et défis du secteur à horizon 2020 52
2.2.3. Attentes vis-à-vis des partenaires-fournisseurs équipementiers-ensembliers 54
2.2.4. Domaines clés de recherche et innovation 56
2.2.5. Bibliographie 58
2.3. L'énergie 58
2.3.1. Les énergies fossiles 59
2.3.2. La filière Oil and Gas 59
2.3.3. L'énergie nucléaire 62
2.3.4. Les énergies renouvelables traditionnelles 65
2.3.5. Autres formes d'énergie renouvelable en pleine expansion 66
2.3.6. Des politiques d'économie d'énergie 67
2.4. L'industrie ferroviaire 68
2.4.1. Importance macroéconomique du secteur 68
2.4.2. Tendances, enjeux et défis du secteur à l'horizon 2020 69
2.4.3. Attentes vis-à-vis des partenaires-fournisseurs équipementiers-ensembliers 70
2.4.4. Domaines clés de recherche et innovation 70
2.5. L'industrie navale et l'ingénierie maritime 71
2.5.1. Importance macroéconomique du secteur 71
2.5.2. Tendances, enjeux et défis à l'horizon 2020 74
2.5.3. Attentes vis-à-vis des partenaires-fournisseurs équipementiers-ensembliers 76
2.5.4. Domaines clés de recherche et d'innovation 77
2.6. L'industrie agroalimentaire 79
2.6.1. Importance macroéconomique du secteur 79
2.6.2. Enjeux et défis des IAA à horizon 2020 81

2.6.3. Équipements, procédés, lignes de production dans les IAA : moteurs de l'innovation 82
2.6.4. Axes de recherche et d'innovation pour les équipementiers-ensembliers 84
2.6.5. Bibliographie 86
2.7. L'industrie des technologies de l'environnement 87
2.7.1. Importance macroéconomique du secteur 87
2.7.2. Tendances, enjeux et défis du secteur à l'horizon 2020 88
2.7.3. Attentes vis-à-vis des partenaires-fournisseurs équipementiers-ensembliers 89
2.7.4. Domaines clés de recherche et innovation 90
2.7.5. Bibliographie 92

Chapitre 3 : Les défis scientifiques 93

3.1. Mécanique théorique 93
3.1.1. Descriptif de la thématique 93
3.1.2. Principales avancées de la thématique pendant les trente dernières années 94
3.1.3. Orientations ou réorientations nécessaires en fonction des enjeux 96
3.1.4. Les verrous scientifiques et technologiques à lever 96
3.1.5. Les laboratoires concernés 98
3.1.6. Les enjeux industriels et sociétaux par domaines d'application . . . 98
3.1.7. Les liens et concertations nécessaires avec les autres disciplines . . . 99
3.1.8. La position française par rapport à l'international. 99
3.1.9. Recommandations et perspectives 99
3.2. Mécanique et physique 100
3.2.1. Descriptif de la thématique 100
3.2.2. Principales avancées de la thématique depuis le rapport Germain . 101
3.2.3. Orientations ou réorientations nécessaires en fonction des enjeux . . 101
3.2.4. Les verrous scientifiques et technologiques à lever 101
3.2.5. Les enjeux scientifiques, industriels et sociétaux 102
3.2.6. Les liens et concertations nécessaires avec d'autres disciplines . . . 102
3.2.7. La position française par rapport à l'international. 103
3.3. Modélisation des matériaux et des structures 103
3.3.1. Introduction 103
3.3.2. Un état de l'art s'appuyant sur des états de conjoncture ou avis récents. 104
3.3.3. Les nécessaires orientations scientifiques en fonction des enjeux . . . 105
3.3.4. Les verrous scientifiques et technologiques à lever 106
3.3.5. Les laboratoires concernés 107
3.3.6. Les enjeux industriels et sociétaux par domaines d'application . . 107
3.3.7. La position française par rapport à l'international. 107
3.3.8. Recommandations et perspectives 108

3.4. Mécanique et incertain 109
3.4.1. Une thématique aux origines anciennes 109
3.4.2. Un état de la thématique et ses verrous scientifiques 111
3.4.3. Les laboratoires et centres concernés 114
3.4.4. Les enjeux sociétaux et industriels 114
3.4.5. Les liens nécessaires et concertations avec les autres disciplines . . . 115
3.4.6. La position française par rapport à l'international. 116
3.5. Mécanique expérimentale des matériaux et des structures 116
3.5.1. Descriptif de la thématique 116
3.5.2. État de l'art 117
3.5.3. Les orientations nécessaires en fonction des enjeux 118
3.5.4. Les verrous scientifiques et technologiques à lever 118
3.5.5. Les laboratoires concernés 118
3.5.6. Les enjeux industriels et sociétaux par domaine 119
3.5.7. Les liens et concertations nécessaires avec les autres disciplines . . . 119
3.5.8. La position française par rapport à l'international. 119
3.5.9. Recommandations et perspectives 120
3.6. Mécanique des matériaux composites 120
3.6.1. Descriptif de la thématique 120
3.6.2. État de l'art 122
3.6.3. Les orientations en fonction des enjeux 123
3.6.4. Les verrous scientifiques et technologiques à lever 124
3.6.5. Les laboratoires concernés 124
3.6.6. Les enjeux industriels et sociétaux 125
3.6.7. Les liens nécessaires avec d'autres disciplines 125
3.6.8. La position française par rapport à l'international. 125
3.6.9. Recommandations et perspectives 125
3.7. Tribologie 126
3.7.1. Descriptif de la thématique 126
3.7.2. Un état de l'art s'appuyant sur des états de conjoncture ou avis récents. 126
3.7.3. Les orientations nécessaires en fonction des enjeux 129
3.7.4. Les verrous scientifiques et technologiques à lever 130
3.7.5. Les laboratoires concernés 131
3.7.6. Les enjeux industriels et sociétaux par domaines d'application . . . 132
3.7.7. Les liens et concertations nécessaires avec les autres disciplines . . . 132
3.7.8. La position française par rapport à l'international. 133
3.7.9. Recommandations et perspectives 133
3.8. Rhéologie 133
3.8.1. Descriptif de la thématique 133
3.8.2. Un état de l'art s'appuyant sur des états de conjoncture ou avis récents. 134
3.8.3. Les orientations nécessaires en fonction des enjeux 135
3.8.4. Les verrous scientifiques et technologiques à lever 136
3.8.5. Les laboratoires concernés 137

3.8.6. Les enjeux industriels et sociétaux par domaines d'application . . . 137
3.8.7. Les liens et concertations nécessaires avec les autres disciplines . . . 138
3.8.8. La position française par rapport à l'international. 139
3.8.9. Recommandations et perspectives 139
3.9. Mécanique pour le vivant 140
3.9.1. Descriptif de la thématique 140
3.9.2. Un état de l'art s'appuyant sur des états de conjoncture ou avis récents. 141
3.9.3. Les orientations nécessaires en fonction des enjeux 143
3.9.4. Les verrous scientifiques et technologiques à lever 144
3.9.5. Les enjeux industriels et sociétaux par domaines d'application. . . 144
3.9.6. Les liens et concertations nécessaires avec les autres disciplines . . 146
3.9.7. La position française par rapport à l'international. 146
3.9.8. Recommandations et perspectives 146
3.9.9. Les laboratoires concernés 147
3.10. Mécanique des fluides 147
3.10.1. Descriptif de la thématique 147
3.10.2. État de l'art 148
3.10.3. Les orientations nécessaires en fonction des enjeux 149
3.10.4. Les enjeux industriels et sociétaux 150
3.10.5. Les verrous scientifiques et technologiques à lever 150
3.10.6. Les laboratoires concernés 155
3.10.7. La position française au niveau international. 155
3.10.8. Recommandations et perspectives 156
3.10.9. Bibliographie 156
3.11. Vibrations et vibroacoustique, aéroacoustique 157
3.11.1. Vibrations et vibroacoustique. 157
3.11.2. Aéroacoustique 162
3.12. Transferts thermiques 167
3.12.1. Descriptif de la thématique 167
3.12.2. Un état de l'art s'appuyant sur des états de conjoncture ou avis récents. 167
3.12.3. Les orientations nécessaires en fonction des enjeux 173
3.12.4. Les verrous scientifiques et technologiques à lever 174
3.12.5. Les laboratoires concernés 175
3.12.6. La position française par rapport à l'international. 175
3.13. Combustion 175
3.13.1. Descriptif de la thématique 175
3.13.2. L'état de l'art de la recherche en combustion 178
3.13.3. Les nouveaux enjeux scientifiques de la combustion 180
3.13.4. Les enjeux industriels et sociétaux 184
3.13.5. La concertation avec les autres disciplines 185
3.13.6. La position française par rapport à l'international. 186
3.13.7. Recommandations et perspectives 186

3.14. Simulation numérique en mécanique des solides et des structures . 187
3.14.1. Descriptif de la thématique 187
3.14.2. État de l'art 188
3.14.3. Les orientations scientifiques nécessaires en fonction des enjeux . . . 191
3.14.4. Les verrous scientifiques et technologiques à lever 192
3.14.5. Les laboratoires concernés 193
3.14.6. Les enjeux industriels et sociétaux 193
3.14.7. Les liens et concertations nécessaires avec les autres disciplines . . . 194
3.14.8. La position française par rapport à l'international. 194
3.14.9. Recommandations et perspectives 195
3.14.10. Bibliographie 196
3.15. Modélisation et simulation numérique des procédés d'assemblage par soudage et de mise en forme par grandes déformations 196
3.15.1. Descriptif de la thématique 196
3.15.2. État de l'art 198
3.15.3. Les orientations scientifiques nécessaires en fonction des enjeux . . . 200
3.15.4. Les verrous scientifiques et technologiques à lever 202
3.15.5. Les laboratoires concernés 203
3.15.6. Les enjeux industriels et sociétaux par domaines d'application . . . 203
3.15.7. Les liens et concertations nécessaires avec les autres disciplines . . . 204
3.15.8. La position française par rapport à l'international. 204
3.15.9. Recommandations et perspectives 205
3.15.10. Bibliographie 206
3.16. Calcul haute performance et intensif en mécanique des fluides . . . 206
3.16.1. Descriptif de la thématique 206
3.16.2. Un état de l'art s'appuyant sur des états de conjoncture ou avis récents. 208
3.16.3. Les orientations nécessaires en fonction des enjeux 211
3.16.4. Les verrous scientifiques et technologiques à lever 212
3.16.5. Les laboratoires concernés 216
3.16.6. Les enjeux industriels et sociétaux par domaines d'application . . . 216
3.16.7. Les liens et concertations nécessaires avec les autres disciplines . . . 217
3.16.8. La position française par rapport à l'international. 218
3.16.9. Recommandations et perspectives 219
3.17. Mécatronique 220
3.17.1. Descriptif de la thématique 220
3.17.2. Un état de l'art s'appuyant sur des états de conjoncture ou avis récents. 220
3.17.3. Les orientations scientifiques nécessaires en fonction des enjeux . . . 222
3.17.4. Les verrous scientifiques et technologiques à lever 222
3.17.5. Les laboratoires concernés 223
3.17.6. Les enjeux industriels et sociétaux par domaines d'application . . . 224
3.17.7. Les liens et concertations nécessaires avec les autres disciplines . . . 224
3.17.8. La position française par rapport à l'international. 225
3.17.9. Recommandations et perspectives 225
3.17.10. Bibliographie 226

Chapitre 4 : Concevoir et produire autrement . . 227
4.1. Conception des produits 227
4.1.1. Descriptif de la thématique 227
4.1.2. État de l'art 229
4.1.3. Les orientations nécessaires en fonction des enjeux 231
4.1.4. Les verrous technologiques à lever 233
4.1.5. Les enjeux industriels et sociétaux par domaines d'application . . . 235
4.1.6. Les liens et concertations nécessaires avec les autres disciplines . . . 236
4.1.7. La position française par rapport à l'international. 237
4.1.8. Recommandations et perspectives 237
4.1.9. Les laboratoires concernés 238
4.1.10. Bibliographie 238
4.2. Procédés de fabrication 239
4.2.1. Descriptif de la thématique 239
4.2.2. État de l'art 241
4.2.3. Les orientations nécessaires en fonction des enjeux 243
4.2.4. Les verrous technologiques à lever 245
4.2.5. Les enjeux industriels et sociétaux par domaines d'application . . . 246
4.2.6. Les liens et concertations nécessaires avec les autres disciplines . . . 246
4.2.7. La position française par rapport à l'international. 247
4.2.8. Recommandations et perspectives 248
4.2.9. Les laboratoires concernés 249
4.2.10. Bibliographie 250
4.3. Production mécanique 251
4.3.1. Descriptif de la thématique 251
4.3.2. État de l'art 251
4.3.3. Les orientations nécessaires en fonction des enjeux 254
4.3.4. Les verrous technologiques à lever 255
4.3.5. Les enjeux industriels et sociétaux par domaines d'application . . . 256
4.3.6. Les liens et concertations nécessaires avec les autres disciplines . . . 256
4.3.7. La position française par rapport à l'international. 257
4.3.8. Recommandations et perspectives 257
4.3.9. Les laboratoires concernés (production mécanique) 258
4.4. L'usine du futur 258
4.4.1. Un nouveau concept 258
4.4.2. Les besoins sociétaux 259
4.4.3. Le contexte technologique 259
4.4.4. Bibliographie 260

Annexe : Liste des laboratoires et organismes . 261

Préface

Pour préparer le futur de nos industries mécaniques ;
pour ouvrir des perspectives aux entreprises qui ont fait le choix de l'innovation technologique ;
pour orienter les politiques publiques afin de soutenir cet indispensable socle industriel, base de la création des richesses d'une nation, de ses emplois, d'une société où il fait bon vivre ;
où faut-il porter le regard ?

Sans aucun doute vers ceux qui apportent les connaissances scientifiques et techniques, vers la recherche et la formation en mécanique.

Ce Livre Blanc de la Recherche en Mécanique nous livre les nombreuses clés qui permettront de comprendre les phénomènes qui interviennent dans les produits et procédés mécaniciens, et d'agir en conséquence.

Près d'une centaine de chercheurs académiques et d'ingénieurs de l'industrie ont apporté leur vision de l'état de l'art et des grands enjeux de la mécanique, dans leurs domaines respectifs. Nous vous invitons à la lecture d'un texte peuplé de modèles, de dispositifs expérimentaux, de couplages multiphysiques, de changements d'échelles… jusqu'aux méthodes qui cherchent à maîtriser les incertitudes. Au détour de plusieurs phrases, vous découvrirez que le progrès technique change de visage et devient plus complexe du fait qu'il doit de plus en plus mêler intimement les disciplines suivantes : mécanique, science des matériaux, physique, mathématiques, énergétique, technologies de l'information et de la communication, biologie, chimie…

Parce que demain il ne sera plus possible d'inventer des produits ou procédés sans considérer ces divers aspects ;
parce que demain les industriels concevront et produiront autrement, dans une usine du futur dont on devine déjà les contours ;
les entreprises de la mécanique, les centres techniques, les grands opérateurs de recherche et les laboratoires académiques doivent développer leurs concertations pour créer les conditions des succès à venir.

À cet égard, ce Livre Blanc de la Recherche en Mécanique pourra être un outil précieux pour améliorer la connaissance réciproque des mondes industriel

et académique, favoriser la prise de conscience des grands enjeux de demain et donner à tous l'envie de travailler et gagner ensemble.

Puisse ce Livre blanc favoriser des discussions approfondies et passionnées, et orienter résolument les sciences de la mécanique vers l'avenir.

Jerôme Frantz	Michel Lebouché	Pierre Devalan
Président de la FIM	Président du HCM	Président de l'AFM

Résumé analytique

« Ut tensio sic vis » écrivait Robert Hooke en 1678 pour définir la loi fondamentale de la mécanique des solides qui porte son nom. Bien des siècles plus tard, cette même mécanique est toujours là, socle de nombreuses activités humaines.

Avec 1 200 000 emplois, 40 % de la production industrielle en France et 35 % des dépenses nationales de R&D, la filière mécanique est une pierre angulaire de l'industrie et par là même un élément nécessaire pour une relance efficace. Elle constitue à la fois un secteur industriel à part entière (l'industrie mécanique représentée par les métiers de l'équipement, de la transformation et de la précision regroupés au sein de la Fédération des Industries Mécaniques (FIM)), mais aussi un ensemble de technologies sur lesquelles se fondent de nombreux secteurs tels que ceux qui construisent des matériels pour les transports, l'énergie, la santé, l'environnement. C'est une filière transversale qui touche quasiment tous les secteurs industriels et en constitue donc un investissement de base. Compétitivité est le maître-mot et cela signifie avant tout innovation. Et une innovation dans la mécanique commence par la théorie, son développement pratique, des applications et seulement, au final, son industrialisation.

Ce Livre Blanc de la Recherche en Mécanique, élaboré par le Haut Comité pour la Mécanique (HCM) dans le cadre de l'Association Française de Mécanique (AFM) vient pour rappeler son importance et montrer les nombreuses retombées de la mécanique. Déjà en 1980, le professeur Paul Germain, à la demande du président de la République, publiait un Livre blanc sur la mécanique, « Les sciences mécaniques et l'avenir industriel de la France ». Trente ans plus tard, une remise à niveau s'avère nécessaire, en particulier pour aider à préparer un futur à nos industries manufacturières.

Les objectifs de ce Livre Blanc de la Recherche en Mécanique sont multiples :

- identifier les besoins industriels, les technologies innovantes ;
- proposer des orientations de recherche et technologie pour faire initier des projets R&D associant le monde scientifique et les industriels, qui vont contribuer à la création de la valeur permettant à nos industriels de gagner une part du marché ;
- apporter l'information pour des industriels, des décideurs, mais aussi des scientifiques qui peuvent ignorer les ressources que recèle leur milieu. La communication entre ces grands acteurs en résulte naturellement.

Quatre grands chapitres composent ce Livre blanc. Après la présentation des éléments du panorama, les grands enjeux dans les secteurs industriels sont détaillés, les défis scientifiques sont traités par thématiques de recherche et les approches qui permettent de concevoir et produire autrement sont abordées.

Le panorama commence par une présentation de l'industrie vue par la Fédération des industries mécaniques. La prospective est ensuite traitée en décrivant les technologies prioritaires en mécanique issues des travaux du Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM). Enfin, la formation à tous les niveaux, fer de lance de l'innovation avec la recherche, est présentée.

On trouve de grands enjeux techniques dans tous les secteurs industriels, dans les transports, l'automobile, l'aéronautique et l'espace, le ferroviaire et le naval, dans l'énergie, mais aussi dans l'agroalimentaire et l'environnement.

L'innovation n'existerait pas sans la recherche et les défis scientifiques associés. Chacun de ces défis scientifiques sont étroitement liés les uns aux autres, soit parce qu'ils résultent les uns des autres (l'industrialisation d'une application étant la suite d'un développement scientifique lui-même basé sur des théories), soit par une multidisciplinarité plus que nécessaire. Les défis scientifiques sont dans tous les domaines :

- le domaine théorique : mécanique théorique, mécanique et physique, modélisation ;
- le domaine plus expérimental : matériaux aussi bien composites que vivants et leurs comportements, fluides de toutes sortes (gaz, liquides…) ;
- la simulation numérique et les calculs associés.

L'usine du futur est aussi traitée ; elle recouvre les approches innovantes dans les principales activités industrielles que sont la conception, la fabrication et la production.

Enfin est annexé à ce Livre blanc une liste des organismes et des laboratoires de recherche dans le domaine de la mécanique.

Contributions

Le comité de rédaction – Michel Lebouché, président du HCM, Mansour Afzali, Pierre Devalan et Claude Hauviller – a rassemblé et structuré les contributions d'individuels, des groupes de travail de l'AFM et des sociétés savantes.

La liste qui suit est, sauf erreur ou omission, celle des contributeurs au Livre Blanc de la Recherche en Mécanique.

Mansour Afzali	CETIM	Senlis
Olivier Allix	LMT/ENS	Cachan
Emmanuel Ardillon	EDF R&D	Chatou
Éric Arquis	I2M INP Bordeaux-Aquitaine	Bordeaux
Olivier Asserin	CEA	Saclay
Mejdi Azaiez	I2M INP Bordeaux-Aquitaine	Bordeaux
Françoise Baillot	CORIA	Rouen
Christophe Bailly	École centrale Lyon	Écully
Marianne Béringhier	P' ISAE-ENSMA	Poitiers
Alain Bernard	École centrale Nantes	Nantes
Régis Bigot	ENSAM	Metz
Jean-François Boujut	G-SCOP	Grenoble
Jean-Marc Bourinet	IFMA	Clermont-Ferrand
Jean-Marie Bouvier	Clextral	Firminy
Alain Bovis	DCNS	Paris
Marianna Braza	IMFT	Toulouse
Daniel Brissaud	G-SCOP	Grenoble
Marie-Ange Bueno	LPMT ENSISA	Mulhouse
Yolande Bufquin	FIM	Paris La Défense
Guy Caignaert	LML université Lille 1	Lille
Sébastien Candel	EM2C École centrale Paris	Châtenay-Malabry
Denis Cavallucci	INSA	Strasbourg
Hélène Chanal	IFMA	Clermont-Ferrand

Xavier Château	Navier université Paris-Est	Marne-la-Vallée
Mohammed Cherfaoui	CETIM	Senlis
Mehdi Cherif	I2M INP Bordeaux-Aquitaine	Bordeaux
Francisco Chinesta	École centrale Nantes	Nantes
Jean-Yves Choley	Supméca	Saint-Ouen
Alain Cimetière	P' ISAE-ENSMA	Poitiers
Stéphane Colin	Institut Clément-Ader INSA	Toulouse
Michel Combarnous	I2M INP Bordeaux-Aquitaine	Bordeaux
Alain Combescure	LAMCOS INSA	Lyon
Philippe Contet	FIM	Paris La Défense
Laurent Couvé	CETIM	Senlis
Jerôme Crépin	Mines ParisTech	Paris
Jean-Yves Dantan	ENSAM	Metz
Nasser Darabiha	EM2C École centrale Paris	Châtenay-Malabry
Alain Delage	IMdR	Gentilly
Didier Delaunay	LTN université Nantes	Nantes
Franck Delvare	LMNO université Caen	Caen
Pierre Devalan	AFM	Paris La Défense
André Dragon	P' ISAE-ENSMA	Poitiers
Mohamed Eid	INSA	Rouen
Benoît Eynard	UTC	Compiègne
Emmanuel Foltête	FEMTO-ST	Besançon
Michael Fontaine	FEMTO-ST	Besançon
Samuel Forest	Mines ParisTech	Paris
Yannick Frein	G-SCOP	Grenoble
Jean Frêne	P' ISAE-ENSMA	Poitiers
Benoît Furet	IRCCYN	Nantes
Jean-François Ganghoffer	LEMTA université de Lorraine	Nancy
Philippe Gatignol	UTC	Compiègne
Renée Gatignol	Institut Jean-Le-Rond-d'Alembert UPMC	Paris
Nicolas Gayton	IFMA	Clermont-Ferrand
Jean-Michel Génevaux	LAUM ENSIM	Le Mans
Michel Grediac	Université Blaise-Pascal	Clermont-Ferrand
Abdellah Hadjadj	CORIA	Rouen
Damien Halm	P' ISAE-ENSMA	Poitiers
Jean-Yves Hascouet	IRCCYN	Nantes
Stéphane Henriot	IFPEN	Rueil-Malmaison

Charlotte Heslouin	ENSAM	Metz
Jean-Pierre Jeandreau	CETIM	Saint-Étienne
Chantal Labadie	Pôle de compétitivité I-Trans	Le Mont Houy
Pierre Ladevèze	LMT/ENS	Cachan
Éric Lamballais	P' ISAE-ENSMA	Poitiers
Jacques Lamon	LMT/ENS	Cachan
André Lannoy	IMdR	Gentilly
Sylvie Le Brun	GEP-AFTP	Paris La Défense
Michel Lebouché	LEMTA université de Lorraine	Nancy
Maurice Lemaire	PHIMECA	Clermont-Ferrand
Alain Lemasçon	CETIM	Nantes
Christian Lexcellent	FEMTO-ST	Besançon
Danaila Luminita	CORIA	Rouen
Gérard Maeder	AFM	Paris La Défense
Denis Maillet	LEMTA université de Lorraine	Nancy
Patrick Martin	ENSAM	Metz
Philippe Marty	LEGI	Grenoble
Pascal Mognol	IRCCYN	Nantes
Matthieu Museau	G-SCOP	Grenoble
Sébastien Neukirch	Institut Jean-Le-Rond-d'Alembert UPMC	Paris
Nicolas Noiray	Alstom	Paris
André Orcesi	IFSTTAR université Paris-Est	Marne-la-Vallée
Maurice Pendola	PHIMECA	Clermont-Ferrand
Philippe Perreau	GEP-AFTP	Paris La Défense
Serge de Perthuis	Areva	Le Creusot
Patrice Peyre	LIM ENSAM	Paris
Pierre Plion	EDF R&D	Chatou
Christine Prelle	UTC	Compiègne
Yves Ravalard	Pôle de compétitivité I-Trans	Le Mont Houy
Joël Rech	ENISE	Saint-Étienne
Véronique Roig	INPT	Toulouse
Benoît Roman	PMMH	Paris
Thierry Rouaud	GEP-AFTP	Paris La Défense
Christine Rousselle	Université d'Orléans	Orléans
Khemais Saanouni	UTT	Troyes
Pierre Sagaut	M2P2 université Aix-Marseille	Marseille
Géry de Saxcé	LML université Lille 1	Lille

Dominique Sentagnes	L'ELECTROLYSE	Bordeaux
Mohamed Souli	LML université Lille 1	Lille
Bruno Sudret	ETHZ	Zurich
Pierre Suquet	LMA/CNRS	Marseille
Thierry Thomas	Messier-Bugatti-Dowty groupe Safran	Vélizy-Villacoublay
Serge Tichkiewitch	EMIRACLE	Grenoble
Christophe Tournier	LURPA/ENS	Cachan
Michel Trinité	CORIA	Rouen
Dany Vandromme	INSA	Rouen
Luc Vervisch	CORIA	Rouen
Denis Veynante	École centrale Paris	Châtenay-Malabry
Jean-Marie Virely	LMT/ENS	Cachan
Philippe Watillon	Airbus Defence and Space	Saint-Médard-en-Jalles
Alexandre Watzky	MSME université Paris-Est	Créteil
Thierry Yalamas	PHIMECA	Clermont-Ferrand
Peggy Zwolinski	G-SCOP	Grenoble

Introduction

La dernière étude détaillée sur la recherche française dans le domaine des sciences et industries mécaniques a été présentée par le professeur Paul Germain, secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, dans un rapport présenté au président de la République et intitulé « Les sciences de la mécanique et l'avenir industriel de la France ». Elle date de septembre 1980.

L'état de la recherche en sciences de la mécanique constitue en effet un enjeu de premier ordre car ses résultats conditionnent les principales innovations dans le vaste secteur de la mécanique, elles-mêmes décisives pour l'avenir industriel de la France.

La mécanique est la pierre angulaire de toutes les industries. Elle constitue à la fois un secteur industriel à part entière (l'industrie mécanique représentée par les métiers de l'équipement, de la transformation et de la précision, regroupés au sein de la Fédération des Industries Mécaniques, la FIM), mais aussi un ensemble de technologies sur lesquelles se fondent de nombreux autres secteurs tels que ceux qui construisent des matériels pour les transports, l'énergie, la santé, l'environnement. Il s'agit d'une filière qui ne représente pas moins de 40 % de la production de l'industrie française, 1 200 000 emplois et 35 % des dépenses nationales de R&D des entreprises. Ce socle industriel est indispensable à notre économie ; on estime[1] qu'un emploi dans l'industrie génère trois à quatre emplois hors industrie. Les technologies et la science mécanique sur lesquels repose cette filière sont certes anciennes, mais elles sont en constante évolution et demeurent l'un des vecteurs de progrès humain important pour l'avenir, en particulier pour le renouveau industriel de la France.

Dans un environnement industriel malmené, il est important que, 34 ans plus tard, un nouveau point soit fait sur la recherche française dans les différents domaines de la mécanique et ses applications, et qu'un diagnostic soit effectué sur l'adéquation de cette recherche aux besoins du monde industriel.

Les objectifs de ce Livre Blanc sur la Recherche en Mécanique sont multiples :

– montrer que les sciences de la mécanique répondent à des enjeux scientifiques, industriels et sociétaux d'aujourd'hui ;

[1] Pacte pour la compétitivité de l'industrie française, Louis Gallois, commissaire général à l'investissement, juillet 2012.

– faire prendre conscience aux chercheurs eux-mêmes de l'importance et des richesses de leur communauté scientifique, de la diversité des enjeux auxquels ils sont confrontés et des ressources qu'ils peuvent trouver dans leur environnement scientifique ;
– contribuer aux réflexions et aux développements des briques technologiques nécessaires pour « l'usine du futur » par les développements scientifiques et technologiques dans le domaine de l'ingénierie numérique pour la simulation de produits et de procédés, la réalité augmentée, le développement des procédés innovants comme la fabrication additive, l'automatisation des procédés et l'utilisation des robots dans la production manufacturière... ;
– informer les industriels du potentiel que représentent les laboratoires de mécanique français et la formidable source d'informations que constitue l'ensemble des recherches en cours ;
– en rapprochant le monde académique et le monde industriel, favoriser la création de consortia qui permettront de s'attaquer avec quelques chances de succès aux verrous scientifiques et technologiques qui freinent l'innovation ;
– enfin, convaincre les responsables de la politique scientifique de notre pays de l'importance des enjeux que portent les sciences de la mécanique et du potentiel d'innovation que représentent les recherches en cours dans les domaines qu'elle recouvre.

L'Association Française de Mécanique (AFM) – et plus particulièrement son Conseil scientifique et technique – a ainsi décidé, à la demande du Haut Comité Mécanique (HCM), de mobiliser ses membres, industriels et académiques, pour la rédaction de ce Livre blanc.

Il est organisé en quatre grandes parties.

La première partie présente des éléments de panorama :

– présentation des industries mécaniques, au cœur de l'économie, à la base des grandes innovations industrielles, sources d'outils technologiques indispensables, créatrices de nouveaux métiers et emplois, au service de la société du XXI^{e} siècle ;
– identification, par le Centre Technique des Industries Mécaniques, le CETIM, des technologies prioritaires pour la mécanique, qui contribueront au développement des produits et procédés innovants par l'industrie mécanique, pour développer ses positions sur les marchés ;
– présentation de la mécanique comme un atout pour l'innovation et l'emploi des jeunes. La préoccupation principale du comité « Formation, emploi, recrutement » de la Fédération des industries mécaniques est de donner une formation scientifique et surtout technologique adaptée aux 50 000 jeunes dont les industries mécaniques ont besoin chaque année ;
– présentation des filières de l'enseignement supérieur dans les domaines de la mécanique, indissociable de la dimension recherche, et des enjeux d'une meilleure concertation avec le monde industriel.

La deuxième partie concerne les perspectives et les enjeux des recherches dans les grands domaines industriels et sociétaux où la mécanique a un poids significatif. Rédigés par des personnalités du monde industriel reconnues dans

leur spécialité, ces articles transversaux font état de la situation, des forces, des difficultés et des attentes des secteurs industriels concernés par les résultats de ces recherches en mécanique.

Les secteurs industriels identifiés et analysés sont les suivants :

- l'automobile,
- l'aéronautique,
- le spatial,
- l'énergie nucléaire, fossile et renouvelable,
- le ferroviaire,
- le naval,
- l'agroalimentaire,
- les technologies de l'environnement.

La métallurgie, qui a fait l'objet d'un Livre blanc récent, ne figure pas dans la liste des secteurs industriels traités. Elle est toutefois présente dans nombre des articles transversaux et thématiques.

La troisième partie rassemble des articles ciblés sur les thématiques scientifiques retenues après analyse des technologies prioritaires identifiées par le CETIM et des priorités scientifiques mises en avant par le rapport de conjoncture du Centre National de la Recherche Scientifique, le CNRS. Ces articles ont été rédigés sous la responsabilité des groupes scientifiques et techniques de l'AFM et restituent les principales orientations des travaux développés dans les laboratoires de recherche.

Dans chaque article, on s'est efforcé de suivre la structuration suivante :

a. un court descriptif de la thématique,
b. un état de l'art s'appuyant sur des états de conjoncture ou avis récents,
c. les nécessaires orientations en fonction des enjeux,
d. les verrous technologiques à lever,
e. les laboratoires concernés,
f. les enjeux industriels et sociétaux par domaine d'application (interaction avec les articles transversaux),
g. les liens et nécessaires concertations avec les autres disciplines,
h. la position française par rapport à l'international,
i. une conclusion sous forme de recommandations.

La quatrième partie traite des articles directement en lien avec les principales activités industrielles, de manière à montrer comment ces activités seront impactées par l'évolution des travaux scientifiques, notamment les méthodes et procédés qui permettent de concevoir et de produire autrement.

Ainsi, chacun pourra trouver dans cet ouvrage les points précis qui le préoccupent :

- une vision d'ensemble des industries mécaniques, des technologies clés et des enjeux de formation ;
- les attentes des industriels dans les grands domaines où la mécanique a une place significative et contribue à l'innovation ;

– un état de l'art et une meilleure compréhension des enjeux et perspectives des différentes thématiques qui constituent les « sciences de la mécanique », en fonction de ses centres d'intérêt : mécanique théorique, mécanique et physique, modélisation des matériaux et structures, mécanique et incertain, mécanique expérimentale des matériaux et structures, mécanique des matériaux composites, tribologie, rhéologie, mécanique pour le vivant, mécanique des fluides, vibrations et vibroacoustique, aéroacoustique, transferts thermiques, combustion, simulation numérique en mécanique des solides et des structures, modélisation et simulation numérique des procédés d'assemblage par soudage et de mise en forme par grandes déformations, calcul haute performance et intensif en mécanique des fluides, mécatronique ;
– un éclairage sur l'avenir des activités industrielles : conception, fabrication, production, parties intégrantes de l'usine du futur.

Nous souhaitons que cet ouvrage contribue à une prise de conscience de l'importance des sciences de la mécanique pour l'avenir scientifique et industriel de notre pays, provoque des échanges entre les acteurs eux-mêmes et participe en particulier au rapprochement entre les mondes industriel et académique.

Le Haut Comité Mécanique (HCM)

Créé en 1989 à l'initiative de Paul Germain, secrétaire perpétuel de L'Académie des sciences, pour rapprocher selon son expression « les trois mondes des ingénieurs, des enseignants-chercheurs, et des entreprises des industries mécaniques ». Il est actuellement constitué des représentants de ces trois « collèges ». La Fédération des Industries Mécaniques (FIM), étroitement associée à son fonctionnement, propose en particulier les candidatures du collège « entreprises ».
Le HCM est actuellement positionné comme le comité stratégique de l'Association Française de Mécanique (AFM), à la fois force de proposition d'actions et porte-voix de l'AFM, vecteur de son rayonnement auprès des instances dirigeantes de l'administration et des grandes entreprises. Il se saisit des questions importantes pour la mécanique et établit des recommandations précédant ou accompagnant les actions conduites par ailleurs par d'autres instances, en particulier l'AFM. Ainsi, sur le plan pratique, le comité a eu une action déterminante dans les domaines du transfert de technologie et de l'action collective en matière de recherche : technologies clés et mécanique, grand projet machine-outil, financement de l'innovation, etc., et a engagé des réflexions sur la formation des jeunes aux métiers de la mécanique et la participation des chercheurs et enseignants-chercheurs aux activités de normalisation.

L'Association Française de Mécanique (AFM)

L'AFM réunit des ingénieurs de l'industrie, des chercheurs et des enseignants qui partagent leurs connaissances et leurs compétences pour développer la recherche et les technologies au profit de l'industrie.
Forte d'environ 2 700 membres, l'AFM a été créée en 1997 sous l'impulsion du Haut Comité de la Mécanique (HCM), de la Fédération des industries mécaniques (FIM), du Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM) et de l'Association Universitaire de Mécanique (AUM).
Ses actions consistent à favoriser les échanges entre les membres des communautés industrielles et universitaires, à renforcer la position de la mécanique dans les systèmes de formation, à mener une promotion de la mécanique auprès des pouvoirs publics français et européens, à coopérer avec les sociétés savantes au niveau international.
Son fonctionnement repose sur une vingtaine de groupes et commissions par domaines de spécialités scientifiques, technologiques ou encore sur des thématiques transverses afin d'échanger et de diffuser l'information au travers d'ateliers, de manifestations ou de congrès.
L'AFM se situe au cœur d'un réseau d'associations partenaires avec lesquelles elle entretient des liens étroits, telles que AMAC, AUGC, CSMA, DYMAT, GFR, MECAMAT, SFA, SFT, SHF et le réseau national AIP-Primeca.

1 Éléments de panorama

1.1. Au commencement était la mécanique

Au commencement était la mécanique…*
L'origine de la mécanique remonte à des temps anciens mais son histoire ne commence véritablement qu'avec Galilée, qui en a posé les fondements. Depuis, la mécanique a traversé les époques, marquant de sa présence les grandes avancées technologiques et les révolutions de tous les secteurs de l'économie : les transports, la construction, la communication, la santé, l'énergie, etc.

Discrète par endroits, centrale ailleurs, la mécanique a toujours été l'un des vecteurs du progrès humain. Elle participe de toutes les industries, devenant de plus en plus difficile à isoler, à identifier…

1.1.1. L'industrie au cœur de l'économie

L'industrie regroupe l'ensemble des activités économiques qui produisent des biens matériels par la transformation et la mise en œuvre de matières premières. Au cours des deux derniers siècles, l'industrie a permis de produire trente fois plus en deux fois moins de temps. C'est le progrès* industriel qui a généré l'augmentation des richesses et l'amélioration des conditions et la réduction de la durée du travail. Dans notre pays, l'industrie se situe toujours au cœur de la création de richesses et de l'emploi puisqu'elle représente 85 % des dépenses de R&D et 80 % des exportations de biens et de services, réalise 13,8 % du PIB national et emploie un peu plus de 13 % des actifs salariés. Se concentrant sur ses savoir-faire clés, elle a progressivement confié beaucoup d'activités périphériques au secteur des services à l'entreprise industrielle ; ceux-ci ont vu doubler leurs effectifs depuis le début des années 1980, gagnant près de deux millions d'emplois, pendant que la production manufacturière stricto sensu en perdait un million et demi. Néanmoins, sans socle industriel, une grande partie des emplois de services n'existerait pas. Les industries manufacturières sont ainsi présentes partout dans le monde et progressent fortement dans les pays émergents ou se maintiennent inexorablement,

* Max von Laue, *Histoire de la physique*, 1946.

dans certaines économies hautement développées pour lesquelles elles constituent un « fer de lance » des exportations.

1.1.2. La mécanique au cœur de l'industrie

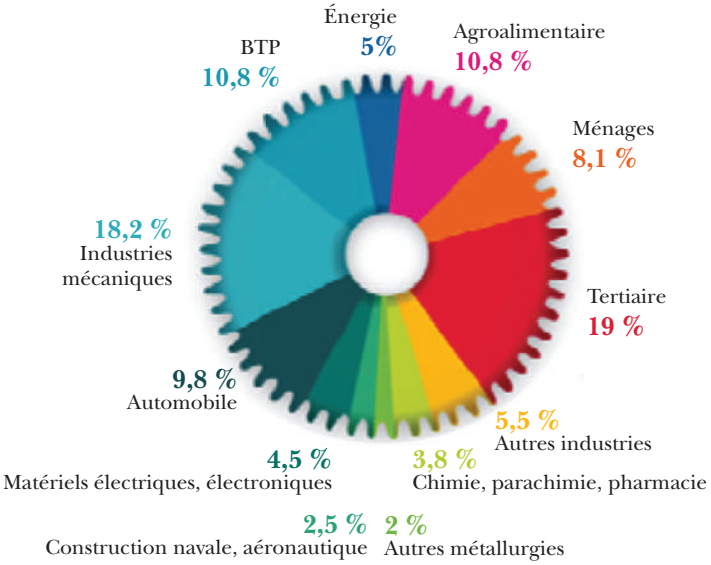


FIGURE 1.1. – Les principaux secteurs économiques clients des industries mécaniques. *Source :* FIM.

Au cœur du développement de toutes les activités industrielles, conjuguant une panoplie toujours plus vaste de nouvelles technologies et de techniques plus traditionnelles, les industries mécaniques interviennent dans des métiers et sur des marchés extrêmement variés : l'automobile, l'aéronautique, l'énergie, le BTP, le transport, l'électronique, l'informatique, la construction navale, l'agroalimentaire, le textile, le médical, la chimie, ou encore la parachimie et la pharmacie… Là où il y a production industrielle, il y a mécanique : un moteur d'avion, un capteur, un autocuiseur, une paire de lunettes, un chariot élévateur, un robot, un extincteur, une fourchette, un scanner, une éolienne…

L'industrie mécanique travaille et assemble des matériaux qui vont bien au-delà des matériaux métalliques. Elle intègre en permanence des technologies de toute nature, particulièrement celles de l'électronique et de l'informatique, afin de fournir des ensembles de plus en plus complexes, répondant à des fonctions habituelles ou innovantes. Au-delà, elle apporte des solutions pour assurer la qualité et réduire les prix des produits requis par le marché.

Omniprésente, transversale – des secteurs de haute technologie dans lesquels la France se positionne parmi les meilleurs, comme le spatial, l'aéronautique, l'énergie, le ferroviaire grande vitesse ne peuvent se développer sans le concours des scientifiques, ingénieurs et industriels de la mécanique –, celle-ci reste quasiment invisible, probablement parce que sa structure est très dispersée, constituée

pour l'essentiel de moyennes et petites entreprises qui ont souvent choisi une stratégie de niche compatible avec des ressources financières limitées. La mécanique reste, en outre, un domaine très technique dont la relative faiblesse de rentabilité n'attire pas le monde financier.

Elle recouvre trois grands domaines d'activité : la transformation des métaux (sous-traitance, outillages, articles de ménages), les équipements industriels (machines, systèmes de production, composants) et la mécanique de précision (optique, instruments de mesure). La force de la mécanique en France ne réside pas seulement dans sa capacité à produire des solutions, mais aussi et surtout dans celle de les concevoir et de les rendre possibles. Cet indéniable atout résulte du savoir-faire de plus de 628 000 femmes et hommes qui entretiennent et transmettent les compétences d'hier, et inventent celles de demain.

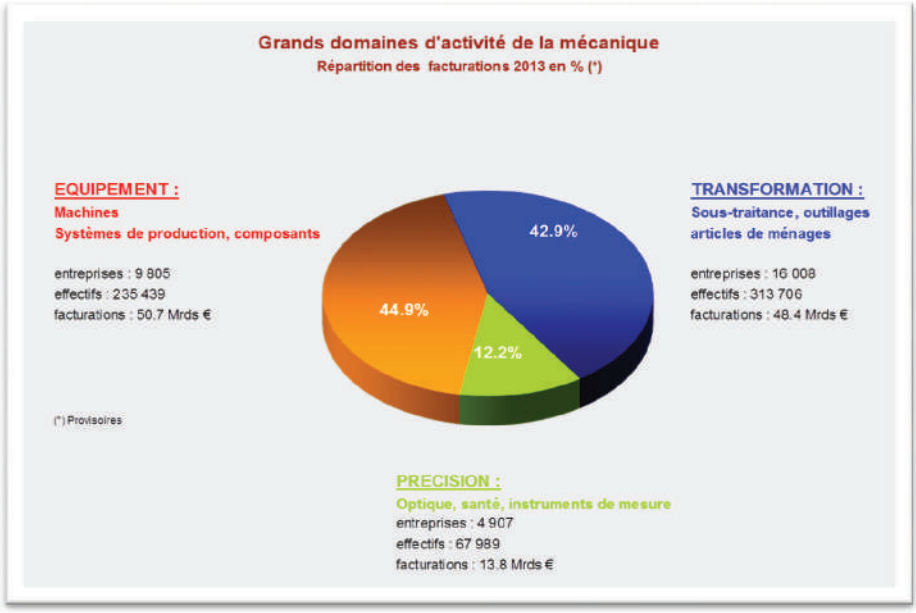
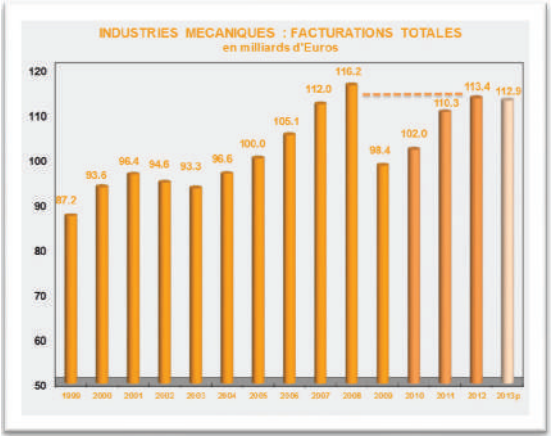


Figure 1.2. – Les trois grands domaines d'activités des industries mécaniques. *Source :* FIM.

1.1.3. *Un acteur économique majeur, un tissu de PME*

Dans un environnement industriel malmené, l'industrie mécanique française maintient son activité, avec près de 113 milliards d'euros de chiffre d'affaires (source FIM). Quelle que soit la taille de ses entreprises, la mécanique française participe au développement économique de la France et de ses régions, et pense son avenir au niveau international.



Sources : INSEE FIM – 30720 Entreprises de plus de un salarié

FIGURE 1.3. – Évolution du chiffre d'affaires des industries mécaniques.

L'industrie mécanique regroupe trente métiers, fédérés par la Fédération des Industries Mécaniques (FIM). En charge des intérêts économiques et techniques de ces trente professions, la FIM a pour objectif d'aider les mécaniciens à concevoir, produire et vendre en France et à se développer sur l'ensemble des marchés internationaux. Elle assure, sur les plans français et international, la défense et la promotion de ce secteur majeur de l'industrie française.

Accompagnant les entreprises dans leurs préoccupations collectives, la FIM leur apporte aussi des solutions dans tous les domaines de leur activité mécanicienne : juridique, environnement, marchés, technique, fiscalité, international, financement…

Le tissu des industries mécaniques est essentiellement composé de TPE et PME. 89 % des entreprises de mécanique comptent de 10 à 100 salariés. Par rapport aux pays concurrents et, en particulier l'Allemagne, la France compte peu de moyennes entreprises entre 250 et 3 000 salariés. En Allemagne, ces moyennes/grosses entreprises sont deux fois plus nombreuses qu'en France dans la transformation des métaux et la précision, et trois fois plus pour les biens d'équipement (source : « 2010–2020 : l'industrie au cœur de la croissance durable », GFI). En quelques chiffres (source : INSEE – SESSI) :

- 43,7 % d'entreprises de 10 à 20 salariés,
- 33,2 % d'entreprises de 21 à 50 salariés,
- 12 % d'entreprises de 51 à 100 salariés,
- 9,4 % d'entreprises de 101 à 500 salariés,
- 1,7 % d'entreprises de plus de 500 salariés.

Ces entreprises sont majoritairement sous contrôle capitalistique français, avec des centres de décision en France.

1.1.4. Une réussite qui se joue à l'international

Les mécaniciens sont depuis longtemps tournés vers l'international et près de la moitié de leur production est aujourd'hui exportée. Les PMI de la mécanique ont développé des stratégies pour partir à la conquête des marchés étrangers (innovation, alliances, travail collaboratif, qualité…). L'évolution du chiffre d'affaires et des effectifs est étroitement liée à la croissance des exportations. La conquête de nouveaux marchés (notamment hors de la zone euro) permet aussi aux entreprises de s'adapter à la demande mondiale et d'innover. Pour toutes ces raisons, l'avenir de l'industrie mécanique réside dans sa compétitivité et sa réussite à l'international.

Le marché communautaire constitue encore le principal débouché (55,3 % de notre production) et le principal fournisseur (66,1 %) de la France.

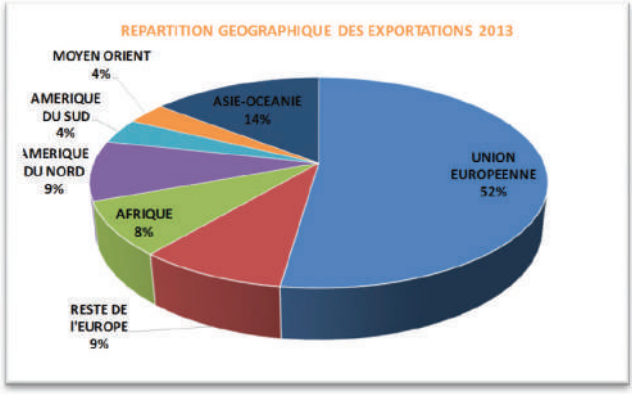


Figure 1.4. – Les débouchés à l'export des industries mécaniques.

Cet « eurotropisme » n'est pas propre à notre pays. En effet, schématiquement, les échanges des cinq premiers producteurs européens (Allemagne, Italie, France, Royaume-Uni et Espagne) s'effectuent majoritairement entre eux. Cependant, l'Allemagne et l'Italie couvrent respectivement leurs importations à hauteur de 177 % et 200 %, tandis que la France est déficitaire. Relativement peu tournée vers l'exportation hors de l'Union Européenne, la France accuse un retard par rapport à ses principaux concurrents européens.

La France exporte principalement dans des zones à faible croissance et insuffisamment dans les zones de grand développement (Asie, Amérique latine). En 2013, les cinq principaux pays clients de la mécanique française sont l'Allemagne (14,8 % du total des exportations), les États-Unis (7,4 %), le Royaume-Uni (6 %), l'Espagne (5,7 %) et l'Italie (5,6 %).

1.1.5. À la base des grandes innovations industrielles

L'industrie mécanique est un acteur majeur en matière d'investissements de R&D ; ils peuvent varier de 2 à 8 % du chiffre d'affaires en fonction du secteur et de la

taille des entreprises mécaniciennes. Les industries mécaniques représentent 35 % des dépenses nationales de R&D des entreprises. Il existe des « champions » dans tous les domaines de la mécanique : les équipements et les *process* pour l'agroalimentaire, le BTP, la manutention, le textile, l'optique, le médical, les composants de transmission de puissance…

La mécanique française est avant tout un incroyable levier d'innovation pour tous les secteurs de l'économie. Son inventivité rend possible des avancées de premier plan, visibles à travers les réalisations de grandes entreprises : l'Airbus, l'AGV (le TGV nouvelle génération), le Grand Stade Lille, ITER… La recherche fondamentale, en physique notamment, nécessite elle aussi de recourir aux compétences de la mécanique. Les nombreuses filières industrielles clientes comptent sur son aptitude à innover, à créer, à inventer pour toujours offrir les meilleurs produits et les meilleures prestations que le marché peut attendre.

Pour bien servir ces filières clientes, l'industrie mécanique doit faire face à un certain nombre de défis économiques et techniques :

- la mondialisation des marchés et des capitaux ne maintient aujourd'hui sur le territoire français que des productions ou produits possédant un avantage concurrentiel certain, alors que les marchés régionaux et nationaux semi-protégés étaient courants dans les années 1980. Les conditions socio-économiques françaises nécessitent des efforts soutenus de productivité et surtout d'innovation pour maintenir le potentiel industriel ;
- la notion d'entreprise étendue dans les filières clientes de la mécanique se généralise. Cette démarche conduit à confier à l'entreprise fournisseur la responsabilité d'une solution technique complète, qu'il s'agisse du choix du matériau et de sa mise en œuvre, de la réalisation d'une fonction mécanique ou d'un équipement de production adapté au processus du client. La responsabilité de recherche et développement est reportée sur de plus petites entreprises élargissant leur rôle de sous-traitant de capacité ou de fabricant de composants ou d'équipements « sur étagère » à celui de fournisseur de solutions. Elle nécessite, de plus, l'intégration de l'entreprise mécanicienne dans le processus de conception du donneur d'ordre autour de modèles virtuels l'obligeant à des efforts importants d'évolution de ses méthodes de travail et d'informatisation. Par ailleurs, les attentes des clients d'offres de solutions complètes (offres de fonction globale au lieu d'offres de composant ou de sous-produit) rendent nécessaires l'association de compétences et donc le travail en réseau avec des entreprises ou organismes disposant de compétences complémentaires ;
- la rapidité de mise sur le marché des produits et leur personnalisation sont des facteurs désormais critiques. Cette évolution modifie en profondeur les processus de conception (conception simultanée) et de fabrication (procédés adaptés à des séries plus faibles, flexibilité des systèmes de production, diminution des temps de mise au point des outillages) ;
- les impératifs réglementaires sont croissants, qu'il s'agisse de bruits, de vibrations ou de pollution (économie d'énergie, limitation des émissions, cycle de vie des produits dont leur recyclage en fin de vie). Ils nécessitent des efforts soutenus de recherche et développement. Bien que souvent pénalisantes

sur le plan économique, ces contraintes n'en constituent pas moins des opportunités de s'assurer d'un avantage concurrentiel par l'innovation, sous réserve que la réglementation et les modalités de son application soient bien homogènes dans les différents pays.

1.1.6. Des outils technologiques indispensables

Pour faire face à ces défis économiques modernes, les entreprises de la mécanique évoluent et innovent sans cesse. L'innovation, la capacité à réagir, à s'adapter aux nouvelles attentes du marché sont essentielles pour que l'industrie française renforce sa compétitivité et poursuive un développement durable.

Si l'innovation en tant que telle consiste en la création de nouveaux produits ou nouveaux procédés, celle-ci s'appuie, en général, sur des compétences, technologies, idées nouvelles qui peuvent provenir de veille technologique, d'actions de recherche et développement réalisées par d'autres entités que l'entreprise innovante elle-même. C'est le cas, entre autres, des laboratoires et centres de recherche…

Malgré la compétence des chercheurs, les PME éprouvent des difficultés à asseoir leurs développements sur des relations étroites et durables avec le monde de la recherche. Pour résoudre cette difficulté, l'organisation professionnelle mécanicienne, représentant un large tissu de petites et moyennes entreprises, conscientes de l'importance de l'innovation, a créé des Centres Techniques Industriels (CTI) pour disposer de moyens collectifs de recherche technologique, mettre en commun des moyens pour permettre aux entreprises de partager des équipements, des compétences et des informations qui, sans cela, leur seraient souvent demeurés inaccessibles. La FIM a ainsi créé le CETIM en 1965. Les principales missions du CETIM consistaient à apporter aux entreprises ressortissantes des moyens et des compétences pour accroître leur compétitivité, participer à la normalisation, faire le lien entre la recherche scientifique et l'industrie, promouvoir le progrès des techniques et aider à l'amélioration du rendement et à la garantie de la qualité.

Aujourd'hui, les technologies évoluent très rapidement. Les entreprises doivent s'adapter en permanence dans un monde de plus en plus globalisé. Le CETIM, au service des entreprises, met en œuvre des programmes de recherche technologique et organisationnelle en concertation avec les professions, dans un contexte de plus en plus ouvert au niveau européen et international. Les missions actualisées du centre technique se déclinent aujourd'hui autour de grands axes technologiques tels que :

- organiser un transfert et donc une appropriation par les entreprises indépendamment des résultats des recherches collectives pour leur permettre d'innover et de faire évoluer leurs métiers, leurs propres produits et services, et de développer le niveau de formation et de qualification de leurs salariés ;
- offrir l'accès aux PME aux grands programmes de recherche publique, nationaux et européens ou, à défaut, à leurs retombées technologiques ;
- soutenir la présence des PME dans la normalisation, outil stratégique de défense des intérêts économiques, en contribuant de manière significative à

la logistique des bureaux de normalisation sectoriels, de manière à en faciliter l'accès aux experts des entreprises et en apportant un soutien technique aux commissions de normalisation à travers la participation d'experts des CTI aux travaux de normalisation et la réalisation d'études prénormatives le cas échéant ;
- organiser une veille stratégique des technologies et des marchés pour aider les entreprises à connaître les évolutions prévisibles des technologies et des marchés, et ainsi anticiper les ruptures (développement du travail en réseau, concept d'entreprise étendue, développement des services…), faire évoluer leurs produits afin qu'ils respectent les réglementations ;
- aider les entreprises à améliorer leurs performances industrielles et environnementales par l'évaluation et l'organisation de la conception, de la fabrication, de la maintenance et du contrôle (modélisation et simulation des procédés et des produits), à développer des composants et des équipements fiables, performants, compétitifs et respectueux des exigences réglementaires, à améliorer la productivité et la maîtrise de l'outil de production et à surveiller la conformité et la performance des produits.

D'autres outils sont à la disposition des entreprises.

Les pôles de compétitivité sont une opportunité ; ils constituent un outil important de politique industrielle pour renforcer la compétitivité de l'industrie française. Ils offrent une précieuse passerelle vers le monde de la recherche académique. Ils sont implantés sur les territoires, donc très proches des acteurs de terrain, et les entreprises peuvent orienter les thèmes de recherche pour qu'ils répondent aux besoins du marché. La coordination de leurs actions, comme le permet la plate-forme MECAFUTURE, portée par la FIM en partenariat avec le CETIM, qui fédère huit pôles de compétitivité dédiés à la mécanique et aux matériaux (Arve Industries, Elastopôle, EMC2, Matéralia, Microtechiques, Plastipolis, Pôle de l'industrie nucléaire, ViaMéca), est essentielle pour concentrer les efforts, éviter les redondances, consolider les projets de recherche et faire plus au service des entreprises avec des moyens donnés.

L'Union Européenne a décidé de renforcer les capacités de développement et d'innovation en Europe en déployant son 7e programme cadre de recherche et développement (PCRD) et en préparant le 8e programme « Horizon 2020 » centré sur l'innovation et la connaissance pour la croissance. Des plates-formes technologiques européennes ont été créées pour faciliter l'identification des verrous technologiques et des problématiques techniques rencontrés par les acteurs économiques, et en particulier les PME, et faire en sorte que les actions de recherche financées répondent au mieux aux attentes des entreprises et des marchés. C'est le cas de la plate-forme MANUFUTURE, plus particulièrement destinée à ce que soient conservées en Europe des capacités de production et des compétences sur les systèmes de production. Une implication forte des acteurs professionnels mécaniciens dans ces réseaux européens de recherche permet la constitution de relais et de compléments substantiels à travers le montage de projets de R&D européens facilitant la prise en compte des attentes françaises. C'est aujourd'hui une mission importante de la plate-forme MECAFUTURE.

Consciente de l'importance de nouer et développer les liens les plus forts avec la communauté scientifique, l'Organisation professionnelle mécanicienne a toujours eu à cœur de développer un réseau structuré avec les représentants du monde académique. Le Haut Comité Mécanique a été créé suite à une proposition d'un rapport de l'Académie des sciences sur la mécanique publié en 1981. Abrité par la FIM, il est composé d'industriels et de partenaires d'organismes de recherche et d'universitaires, et constitue une autorité morale très enracinée dans les différents tissus représentatifs de la mécanique française. Le HCM situe ses réflexions et ses initiatives, de nature stratégique, dans le cadre d'une vision globale de ce que doit être la mécanique dans une société contemporaine « au cœur du monde en mouvement » : une discipline scientifique présente dans de nombreux domaines, des plus fondamentaux aux plus proches des besoins immédiats du « terrain », et dans les champs d'application les plus vastes, avec une approche plus technique qui, par le biais de la conception et de la réalisation d'objets et de systèmes de plus en plus complexes, développe une aptitude permanente à l'intégration des savoirs et des fonctions au service des entreprises et des besoins du pays.

La FIM a, par ailleurs, activement contribué à la création en 1997, aux côtés du HCM, du CETIM et de l'AUM (Association universitaire de mécanique), de l'Association Française de Mécanique (AFM). Cette société savante réunit des ingénieurs de l'industrie, des chercheurs et des enseignants qui partagent leurs connaissances et leurs compétences pour développer la recherche et les technologies au profit des industries. L'AFM constitue une plate-forme d'échanges entre les membres des communautés industrielles et universitaires, visant à renforcer la position de la mécanique dans les systèmes de formation, de soutien et d'évaluation de la recherche, menant des actions de promotion de la mécanique auprès des pouvoirs publics français et européens, et coopérant avec des sociétés savantes françaises et internationales.

1.1.7. Des nouveaux métiers, une image à améliorer

L'exigence d'innovation industrielle requiert des niveaux de qualification de plus en plus élevés, permettant ainsi la création d'un cercle vertueux de développement des compétences et d'accélération de la performance. On voit ainsi émerger des métiers répondant aux nouvelles demandes des entreprises de la mécanique, tels les concepteurs de solutions globales, les coordonnateurs d'équipes éclatées géographiquement, juridiquement et culturellement (acheteurs, coordonnateurs, chefs de projet, chefs de chantier, etc.), les mécatroniciens, les opérateurs d'éolien, les électromécaniciens ou les ingénieurs en écoconception. En créant de nouveaux besoins, la mécanique développe de nouvelles compétences et stimule l'emploi. Les mécaniciens doivent prendre les devants et créer les formations qui feront émerger les compétences recherchées sur le terrain, comme les licences professionnelles…

La culture industrielle française est le fruit d'une histoire, d'un enracinement. C'est une culture de la performance, du développement humain et du progrès technique. Négligée par les jeunes, l'industrie française, et notamment sa filière mécanique, prend conscience de l'urgence d'inverser ce mouvement. Pour les

attirer, il faut avant tout pallier le déficit d'image de la mécanique, faire connaître ses métiers, sa créativité et ses parcours professionnels. Des ambassadeurs de tous les secteurs de la mécanique doivent aller à la rencontre des jeunes pour raconter leurs expériences. La France a toutes les cartes en main : des techniciens ultra-qualifiés, des élites de haut niveau, des infrastructures modernes. Toutefois, il faut réaffirmer la fierté de la communauté mécanicienne, valoriser ses expertises, ses Hommes et ses succès.

1.1.8. Le mécanicien du XXIe siècle au service de la société : les défis à venir… l'usine du futur

La société doit se préparer à relever trois grands défis au cours des prochaines décennies :

- le défi de la démographie et de la consommation : 9 milliards d'êtres humains vivront sur la planète en 2050, constituant des enjeux majeurs en termes :
  - d'alimentation (productivité agricole, hygiène et qualité des *process* et produits alimentaires…),
  - de gestion de l'eau (problématiques de raréfaction (économie), de désalinisation, d'accessibilité, d'épuration, de stockage, de recyclage…),
  - de santé (vieillissement de la population et problématique de dépendance, d'amélioration du confort de vie, nouveaux outils de diagnostics et d'intervention…),
  - de logement (économies d'énergie, d'eau (pompes/robinets, tuyauterie…), diminution des pollutions, déconstruire plutôt que démolir…) ;

- le défi du développement durable, constituant des enjeux majeurs en termes :
  - d'écoconception (moins de matière, moins d'énergie, moins de déchets…),
  - d'écoproduction (réduction des pollutions – captage et stockage du CO_2, recyclage des déchets…),
  - d'énergie (limitation de la consommation, accroissement de la production par sources alternatives et renouvelables, réduction des gaz à effet de serre…),
  - d'énergies renouvelables (éolien, hydraulien, biomasse…) ;

- le défi de la mobilité, de la communication et de la connectivité, constituant des enjeux majeurs en termes de :
  - transport : augmentation des besoins de mobilité tout en garantissant sécurité et rapidité et en diminuant les effets négatifs sur l'environnement (automobile hybride/électrique, TGV, aéronautique plus performante, naval grande capacité…),
  - nouvelle organisation des flux industriels : navires usine déportant en mer les procédés industriels indésirables sur terre (centrales énergétiques, traitement des déchets, chimie, pétrochimie…),
  - circulation accélérée de l'information et des personnes, connectivité…

L'innovation doit être, plus que jamais, comprise comme un élément clé de l'ADN de la mécanique française. C'est grâce à son inventivité et à sa créativité que la mécanique française saura trouver les solutions pour répondre à ces grands défis industriels de demain. Il n'est donc de développement possible des secteurs de haute technologie ou de la recherche fondamentale que sur la base d'un socle mécanicien solide. Demain, ce seront les nanotechnologies, les biotechnologies, les nouveaux matériaux, les équipements pour réduire l'impact environnemental ou produire de l'énergie autrement, les robots pour l'aide à la personne, qui auront plus encore besoin des compétences mécaniciennes. Avec la révolution environnementale et énergétique qui se prépare, le monde de demain sera plus que jamais demandeur de solutions industrielles largement issues de la mécanique : qu'il s'agisse de produits et procédés consommant moins de ressources naturelles devenues rares ou de substitution de technologies ou de matériaux satisfaisant aux impératifs du développement durable. Au-delà de l'intégration « mécatronique » aujourd'hui largement pratiquée, l'industrie mécanique, qui apparaît comme mature, devra organiser une interaction forte de ses technologies avec celles de la chimie et de la biologie.

Pour répondre à l'obligation grandissante de la protection de l'environnement, l'industrie se donne, pour les années qui viennent, une ambition forte fondée sur deux constats. Sa propre compétitivité et donc sa durabilité dépendront de plus en plus de son souci d'économie d'énergie et de matières premières mais aussi, sur le plan international, de son image de « partenaire » de l'écologie. Les progrès dans la protection de l'environnement ne pourront s'effectuer sans le recours à de nouveaux procédés, techniques et équipements industriels, et donc sans croissance des efforts de recherche et d'innovation dans ce domaine.

D'une manière générale, ces orientations stratégiques se retrouvent dans le concept d'usine du futur. Les industriels mécaniciens étant les principaux fournisseurs des équipements de production de toutes les filières industrielles, l'organisation professionnelle mécanicienne, associée à ses partenaires technologiques CETIM, IS et AFM, a mis en place un grand projet fédérateur destiné à affirmer son rôle de référent en matière d'usine du futur. Ce grand projet aura pour vocation d'aider les chefs d'entreprise à s'approprier le concept et construire des usines du futur, à accompagner les pouvoirs publics dans leurs différents programmes de soutien aux entreprises dans le cadre de l'usine du futur et à contribuer, auprès des acteurs de la recherche, à ce que les nombreux programmes de recherche sur le sujet répondent aux besoins des industriels et de l'économie du pays.

1.2. Les technologies prioritaires

Dans le cadre de sa mission d'anticipation technologique, le CETIM réalise depuis 1997 un exercice de prospective « technologies prioritaires en mécanique », qui a pour objectif d'identifier les technologies pouvant apporter un avantage compétitif aux entreprises de la mécanique.

Mené tout d'abord en écho à l'exercice « technologies clés » du ministère de l'Industrie, « technologies prioritaires en mécanique » est devenu, au fil des

années, une démarche dynamique et reconnue permettant l'identification de pistes de réflexion stratégique, individuelle et collective, de l'ensemble des entreprises mécaniciennes françaises et des acteurs économiques en charge du développement de cette filière transversale.

Grâce à un groupe de pilotage actif, réunissant la FIM, ainsi que d'importants industriels de la mécanique, des représentants du monde universitaire et d'autres centres techniques (LRCCP, Institut de soudure, CETIAT), le CETIM est en mesure non seulement de publier tous les cinq ans un ouvrage, mais surtout de mettre à jour chaque année (sous format électronique) une version « *up to date* » de ces technologies prioritaires en mécanique.

Cette mise à jour annuelle en fait l'un des très rares exercices de prospective technologique au monde à être aussi dynamique. Elle permet de s'adapter à la fois au rythme (de plus en plus rapide) d'évolution des technologies, et à celui des innovations que doivent proposer les entreprises de la mécanique à leurs clients.

Toujours dans le souci de rendre cet exercice de prospective facile à exploiter, le nombre de technologies prioritaires est volontairement limité à une quarantaine. Et la priorité est donnée à des technologies diffusantes, c'est-à-dire accessibles, à court ou moyen terme, à des PME.

1.2.1. Méthodologie

Les technologies prioritaires en mécanique sont identifiées en analysant :

- les évolutions et progrès scientifiques et technologiques au niveau international, vus à travers les travaux de recherche et les *roadmaps*,
- les exigences et besoins des grands secteurs clients de la mécanique (automobile, aéronautique, énergie…),
- l'évolution du contexte réglementaire et politique français,
- les apports des fournisseurs des secteurs mécanique et informatique (matériaux, capteurs, logiciels…).

Le CETIM et ses partenaires exploitent ainsi leur vision multifilière et multitechnologie pour identifier des technologies dans divers domaines, qui tendent à déborder de plus en plus du périmètre mécanicien, vers l'électronique ou les biotechnologies par exemple.

Les technologies retenues comme prioritaires doivent avoir un caractère transversal (impact de plusieurs professions de la mécanique), ne sont pas forcément développées par des mécaniciens et peuvent constituer une innovation de rupture, mais aussi (et le plus souvent) une innovation incrémentale.

Chaque technologie prioritaire est présentée dans une fiche de deux pages, donnant l'essentiel de ce qu'il faut connaître pour appréhender la technologie.

Ces technologies prioritaires sont classées en sept briques, correspondant aux grands domaines d'innovation d'une entreprise de mécanique :

- entreprise performante,
- développement durable,

– matériaux et surfaces,
– conception et simulation de produit et procédé,
– procédés de fabrication,
– mécatronique,
– contrôle et surveillance.

Ces technologies prioritaires en mécanique répondent à des objectifs majeurs : compétitivité, réduction de la consommation d'énergie, fiabilité, allègement…

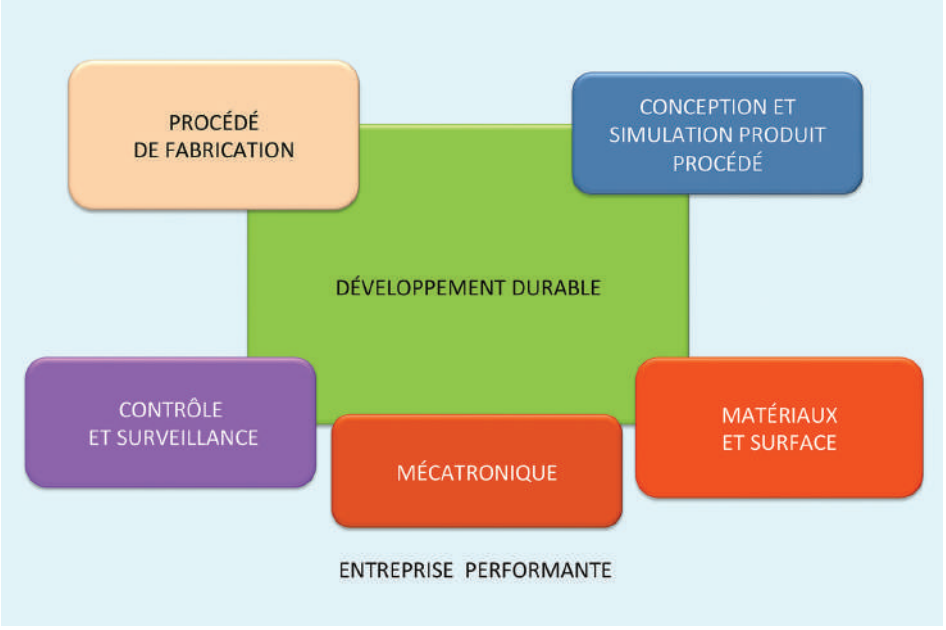


Figure 1.5. – Les sept briques des technologies prioritaires en mécanique.

1.2.2. « Entreprise performante »

Il s'agit des moyens informatiques (méthodes et outils) qui contribuent à la performance de l'entreprise en termes de productivité, de compétitivité et de visibilité sur le marché. Les évolutions concernent l'informatique décentralisée distribuée, les méthodes et outils de la performance, les services et applications techniques mobiles, les offres de services en mode *cloud* et la gestion de l'information stratégique : veille et visibilité.

On note également les plans stratégiques lancés aux États-Unis (plan Obama), en Allemagne et en France pour dynamiser les industries manufacturières dans ces pays. En France la vision « usine du futur » et en Allemagne le plan stratégique Industrie 4.0 visent à mettre en place des machines intelligentes, les procédés robotisés et appliquer l'intelligence collaborative aux moyens de production.

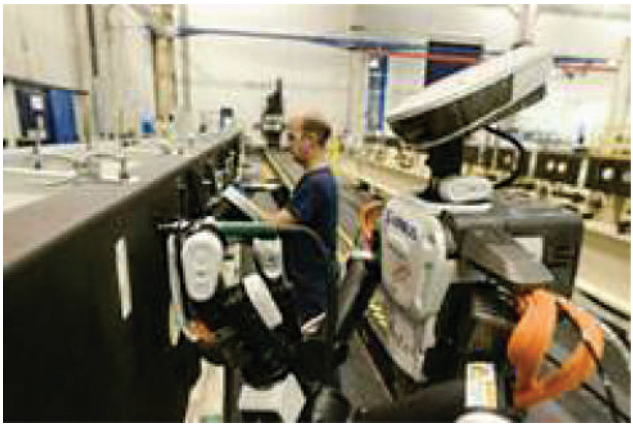


FIGURE 1.6. – Un robot collaboratif sur les chaînes d'assemblage Airbus.

La nouvelle technologie prioritaire « applications techniques mobiles », introduite en 2014, traduit le développement très rapide des outils et services disponibles sur tablettes et smartphones, tant pour le calcul ou la simulation en bureau d'études que pour le pilotage de machines.

On note également un fort intérêt des entreprises de la mécanique pour améliorer leur démarche interne de veille.

1.2.3. « Développement durable »

Portée par la prise en compte des problématiques de l'environnement et de la maîtrise de la consommation énergétique ainsi que des besoins sociétaux, les technologies qui ont le plus évolué concernent :

- l'écoconception, avec l'apparition des premières directives (EuP) et des premières normes spécifiques aux produits de la mécanique, ainsi qu'une sensibilisation accrue des donneurs d'ordres vis-à-vis de la performance environnementale des produits achetés ;
- la réduction de la consommation énergétique de produits et de procédés est également portée par un contexte réglementaire fort avec les objectifs issus du Grenelle de l'environnement pour réduire les émissions de CO_2 ;
- le développement des énergies renouvelables visant à améliorer la performance technique et économique des énergies éoliennes, marines et photovoltaïques.

Enfin, l'ajout de deux technologies sur les bioproduits, qui intègrent des matériaux ou substances issus du végétal, et les bioprocédés, où des procédés biochimiques se substituent à des procédés mécaniques.

L'efficacité énergétique est un axe fort de préoccupation dans l'industrie mécanique, tant au niveau des produits que des procédés. Les biomatériaux progressent également.

1.2.4. « Matériaux et surface »

Les évolutions marquantes des technologies de la brique « matériaux et surface » concernent en premier lieu les composites thermoplastiques, les procédés de fabrication à grande cadence des pièces en matériaux composites pour les applications de transports terrestres et la mécanique, le traitement de surface des fibres pour une meilleure adhésion fibre/matrice pendant la mise en œuvre et le développement des résines thermoplastiques fluides. Ces évolutions sont fortement liées aux procédés de mise en œuvre des composites à fibre longue notamment.

En ce qui concerne les matériaux composites, les évolutions sont orientées vers le développement des matériaux composites biosourcés et leur mise en œuvre, nouveaux polymères pour le procédé RTM ou pultrusion, les composites à matrice céramique.

Figure 1.7. – Les composites dans les structures des machines d'usinage.

Les autres évolutions concernent :

- la simulation des procédés (formage, RTM) ;
- le couplage des procédés, notamment le formage-injection pour fabriquer les pièces hybrides multimatériaux ;
- la dépollution et le nettoyage par procédés physiques (plasma froid, savon magnétique) ;
- les matériaux résistants à la corrosion sans traitement.

À côté des matériaux métalliques qui poursuivent leurs progrès et des matériaux composites dont les applications structurales se développent, on note l'émergence de multimatériaux.

1.2.5. « Conception et simulation de produit et procédé »

Les développements les plus marquants ont été réalisés autour de l'introduction des approches fiabilistes en conception et leur mise en œuvre pour les applications industrielles.

L'introduction du prototype virtuel et de la réalité virtuelle augmentée concrétise la généralisation des approches numériques en conception et en procédés de mise en œuvre.

Plusieurs technologies ont été introduites au cours de ces dernières années :

- le vieillissement et la durabilité des polymères et composites correspondent à la prise en compte des problématiques d'endommagement spécifiques à ces matériaux, en liaison avec la progression de leur utilisation en mécanique ;
- la conception pour l'assemblage, la séparabilité et le montage intègre à la fois une réflexion sur la conception modulaire et la prise en compte de la chaîne logistique et de la fin de vie des produits ;
- la simulation multiéchelle qui est de plus en plus couplée à l'approche multiphysique, pour affiner les simulations de phénomènes complexes ;
- la simulation du procédé et le lien avec la conception des produits pour optimiser la phase d'industrialisation et améliorer la qualité des produits.

Les évolutions plus récentes pour la brique « conception et simulation » sont en lien avec l'innovation collaborative ou *open innovation*, l'éco-innovation comme une opportunité de différenciation et/ou comme un outil pour la prise en compte des réglementations environnementales, le dimensionnement par *rapid sizing* et le développement des méthodes de la réduction de modèles permettant de réaliser des calculs paramétriques à moindre coût.

La nouvelle technologie prioritaire « conception biomimétique » (identifier des solutions en s'inspirant du vivant) commence à trouver des applications industrielles intéressantes et variées.

Dans une approche plus classique de la conception, et avec le développement de la simulation multiphysique, la notion de chaînage numérique devient prioritaire.

1.2.6. « Procédés de fabrication »

Les technologies de la brique « procédés de fabrication » ont sensiblement évolué ces dernières années.

Pour la technologie assemblage multimatériaux, les évolutions concernent les techniques de collage, notamment pour la caractérisation d'assemblages métal/composite. Les procédés de mise en œuvre des composites sont traités dans la brique « matériaux et surface ».

La fabrication additive de pièces métalliques s'est développée grâce à la mise sur le marché de machines et de matériaux permettant de répondre aux besoins de l'industrie sur des pièces complexes en petites séries. Les évolutions majeures pour cette technologie concernent la disponibilité de machines d'impression 3D à bas coût, la machine combinée frittage laser/fraisage à grande vitesse et la

technique micro MIM (*Metal powder Injection Molding*) pour fabriquer des pièces complexes en métal.

Le *manufacturing* fait l'objet d'un intérêt fort des industriels et des pouvoirs publics au niveau européen, notamment les travaux de l'association EFFRA (European Factories of the Future Research Association) en lien avec les besoins de la recherche et développements exprimés dans la feuille de route intitulée « Factories of the Future ». Ces travaux ont permis d'initier la vision « usine du futur » en France comme le plan allemand « industrie 4.0 ».

La fabrication additive est assurément la plus grande innovation de rupture que connaît la mécanique actuellement, avec un développement exponentiel des possibilités. Les applications de la robotique et les machines intelligentes se développent parallèlement.

Figure 1.8. – Fabrication additive, véritable opportunité en aéronautique.

1.2.7. « Mécatronique »

Il s'agit de la brique qui porte les technologies qui ont le plus fortement impacté la conception des produits mécaniciens.

Les deux technologies qui ont le plus progressé concernent en premier lieu la gestion de l'énergie embarquée qui assure l'autonomie des systèmes et une meilleure maîtrise de la consommation énergétique. En second lieu, l'émergence de l'adaptronique est constatée, avec le passage des travaux de R&D en amont vers les produits industriels, pour intégrer des actionneurs directement dans les composants et les structures.

L'intégration des capteurs se généralise dans les composants et équipements, y compris pour des applications en environnement sévère avec le développement de capteurs adaptés.

L'utilisation des actionneurs électriques progresse grâce à leur augmentation de puissance et l'utilisation de lois de commandes avancées plus efficaces, notamment pour les applications aéronautiques.

Les technologies de la communication sans fil sont devenues plus matures, gagnant en fiabilité et en vitesse de transmission de l'information.

Pour la technologie adaptronique, les évolutions récentes ont concerné les suspensions actives pour améliorer le confort en réduisant les vibrations, la récupération d'énergie par actionneur inverse et la récupération et l'utilisation de la chaleur des moteurs.

Les notions d'objets communicants et d'adaptronique deviennent omniprésentes, y compris en mécanique. Et le développement de la mécatronique pose la question de la tolérance aux pannes de ces systèmes.

1.2.8. « Contrôle et surveillance des systèmes de production »

Les évolutions pour la technologie capteurs, surveillance, CND ont concerné d'une part les méthodes intelligentes de traitement des données, les méthodes de CND par combinaison des techniques comme l'électromagnétisme et les ultrasons et la mise sur le marché de capteurs bas coût pour les applications de détection de la contamination des fluides hydrauliques ou la détection de présence. Les techniques CND pour la détection de défauts dans les matériaux composites et des assemblages multimatériaux se développent avec un intérêt fort de la part des industriels, notamment l'aéronautique.

D'autres évolutions plus récentes en lien avec les capteurs et le traitement des données concernent la miniaturisation des capteurs, les composants avec fonction de surveillance intégrée et les applications de surveillance sur tablette.

On peut citer également la corrélation d'images numériques parmi les nouveaux axes dans cette brique.

Les technologies prioritaires en mécanique sont mises à jour régulièrement et sont disponibles sur le site Internet du CETIM (www.cetim.fr).

Annexe : liste des technologies prioritaires en mécanique

ENTREPRISE PERFORMANTE
Informatique décentralisée distribuée
Méthodes et outils de la performance
Veille stratégique
Entreprise étendue
Intégration du facteur humain

DÉVELOPPEMENT DURABLE
Biomatériaux
Écoconception
Usines du développement durable, écofabrication
Formage et usinage écologiques
Procédés propres de préparation et traitement de surfaces
Efficacité énergétique des produits et procédés

MATÉRIAUX ET SURFACES
Aciers très hautes performances et superalliages
Alliages légers et de titane
Composites thermoplastiques
Élastomères nanochargés
Surfaces fonctionnelles

PROCÉDÉS DE FABRICATION
Intégration des robots en production
Procédés de formage *near net shape*
Usinage hautes performances
Fabrication directe de pièces métalliques ou polymères
Microfabrication
Systèmes de production agiles et adaptatifs
Assemblages multimatériaux
Techniques de soudage à hautes performances
Technologies innovantes de formage des tôles

CONCEPTION ET SIMULATION DE PRODUIT ET PROCÉDÉ
Conception et fabrication intégrées
Conception de produits fiables et sûrs
Méthodes innovantes de conception
Simulation et optimisation numériques produit ou procédé
Spécification géométrique des produits
Conception biomimétique

MÉCATRONIQUE
Conception/simulation mécatronique
Capteurs autonomes et communicants
Commande et contrôle avancés
Composants et machines communicants
Adaptronique (*smart materials*)

CONTRÔLE ET SURVEILLANCE
Surveillance en continu
Techniques avancées de CND
Télésurveillance et pilotage à distance
Traçabilité

1.3. Un atout majeur pour l'innovation et l'emploi des jeunes

La mécanique est le premier employeur industriel de France avec 628 000 salariés.

Le savoir-faire et la compétence du personnel est au cœur de la compétitivité de la mécanique.

Les métiers de l'industrie doivent lutter contre leur mauvaise image pour attirer des compétences et être en mesure de faire face aux besoins de recrutement

auxquels les entreprises sont confrontées. Elles doivent s'ouvrir aux jeunes, aux familles, aux écoles…

Le développement de l'apprentissage et de l'alternance et le renforcement des liens avec l'Éducation nationale, les universités, etc., sont nécessaires pour favoriser l'intérêt des jeunes pour nos filières et ne pas bloquer les entreprises dans leur croissance faute de personnel qualifié.

Dans cette perspective, le comité FER (Formation, Emploi, Recrutement) de la FIM a pour rôle et pour missions :

- améliorer la compétitivité des entreprises de la mécanique en leur permettant de disposer du personnel qualifié dont elles ont besoin ;
- coordonner les initiatives prises par les diverses professions de la mécanique en matière de formation et de valorisation des métiers ;
- assurer le lien avec l'appareil éducatif public ou professionnel en matière de formation.

1.3.1. La mécanique et l'emploi : tendance à venir et besoins

Les industries de la métallurgie, dont les industries mécaniques représentent une très large part, recrutent en moyenne entre 60 et 80 000 personnes par an, dont 30 à 40 % de jeunes ; 40 à 50 000 le sont dans les industries mécaniques.

Ces opportunités sont le résultat d'une vague massive de départs à la retraite et de la nécessité pour les entreprises de relever les défis mondiaux de l'innovation pour rester compétitives.

Le mécanicien est amené à innover à la demande de ses clients en s'intéressant de plus en plus près à leurs métiers et à leurs besoins. Cela l'amène à fournir, non plus un produit ou un service isolé, mais une fonction complète dont il garantit la performance. Cela induit une augmentation notable d'emplois de plus en plus qualifiés.

La hausse du niveau de qualifications est une tendance lourde. Si historiquement, l'industrie recrutait majoritairement des personnels de niveau CAP ou BEP, la tendance s'est inversée ces dernières années au profit des niveaux de formation supérieurs, y compris pour les postes d'employés ou d'ouvriers qualifiés. Les baccalauréats et les baccalauréats professionnels devraient représenter à terme 25 % des recrutements, les BTS et les DUT 23 % et les masters et autres doctorats 17 %.

En dix ans, la proportion des ouvriers hautement qualifiés est passée de 15 à 22 %. Dans le même temps, le nombre d'ingénieurs a grimpé de 50 %. Ils représentent aujourd'hui 21 % des salariés des entreprises (source : UIMM).

1.3.2. Les types de profils recherchés

Conséquence de la montée des niveaux de compétences et de l'adaptation des formations initiales au développement des innovations : l'émergence de nouveaux métiers tels que les concepteurs de solutions globales (« architectes »,

intégrateurs) et les coordonnateurs d'équipes éclatées géographiquement, juridiquement et culturellement (acheteurs, coordonnateurs, chefs de projet, chefs de chantiers, etc.).

Les équipes monodisciplinaires disparaissent progressivement au profit d'équipes montées par projet.

Par ailleurs, les fonctions relatives à la réalisation d'outillages, au redéploiement des machines, à la programmation des commandes numériques ou encore à la maintenance préventive ou curative des machines prennent toujours plus d'importance pour améliorer l'adaptabilité rapide des outils de production à une nouvelle commande et pour éviter tout blocage coûteux de la fabrication.

Quelques métiers émergents :

- les métiers de la recherche et du développement, notamment dans l'automobile, le naval, l'aéronautique et le ferroviaire, et les équipements mécaniques ;
- les métiers de l'électronique et de la mécatronique ;
- les métiers du contrôle et de la qualité ;
- la robotique ;
- la méthode, les *process* de fabrication ;
- les métiers liés aux composites ;
- la maintenance ;
- les métiers liés à l'environnement.

1.3.3. Les formations et l'apprentissage en mécanique

L'éventail des formations est large ; il s'étend du CAP en alternance au bac +5 ingénieur et plus. Cinquante-et-un centres de formation des apprentis de l'industrie (CFAI), répartis sur l'ensemble du territoire, forment chaque année par la voie de l'apprentissage industriel plus de 25 000 apprentis aux bacs professionnels, BTS et licences pro. Plus de 1 700 ingénieurs sont diplômés tous les ans des 23 ITII (instituts des techniques d'ingénieurs de l'industrie).

Il existe aujourd'hui trois filières pour accéder aux emplois de la mécanique : les formations à temps plein de l'Éducation nationale, les contrats de professionnalisation et les contrats d'apprentissage. Chaque année, plus de 36 000 jeunes de 16 à 26 ans, garçons et filles, signent ces types de contrats. Les premiers permettent d'obtenir en six à douze mois un Certificat de Qualification Professionnelle de la Métallurgie (CQPM). Les seconds préparent sur un, deux ou trois ans un diplôme de l'Éducation nationale ou un titre d'ingénieur.

Les entreprises de mécanique accordent une très grande place à la formation et à l'apprentissage : à la fois comme voie d'accès privilégiée à l'emploi dans ces entreprises pour les jeunes et comme moyen d'améliorer les compétences et les savoir-faire des salariés en poste. On parle d'entreprises « apprenantes ». Via les dispositifs de formation continue, de responsabilité des équipes, ces métiers favorisent l'ascenseur social : ces entreprises permettent de passer d'un BEP à un bac pro, puis BTS, puis ingénieur.

L'effort de formation est supérieur à la moyenne nationale.

L'apprentissage est également une excellente porte d'entrée dans l'entreprise, et débouche très souvent sur une embauche. Selon une enquête 2010 de l'UIMM effectuée sur les sortants de juin–septembre 2009, 50 % des apprentis sont restés dans leur entreprise d'accueil avec un nouveau contrat de travail. Parmi l'autre moitié, 43 % ont mis moins d'un mois pour trouver un emploi dans une autre entreprise et 35 % entre un et trois mois.

1.3.4. L'attractivité des métiers

- Enjeu : le paradoxe entre le déficit d'image des industries mécaniques et le dynamisme et l'attractivité de leurs métiers.
- Les atouts des métiers de la mécanique : des emplois stables, des rémunérations attrayantes, des perspectives d'évolution de carrière.
- La FIM et ses professions s'investissent pour promouvoir les métiers de la mécanique : organisation de colloques, participation à des salons, réalisation d'outils pédagogiques pour présenter les métiers, actions spécifiques aux professions…

Si la crise a touché durement certaines entreprises de mécanique, d'autres continuent actuellement à rechercher des collaborateurs et doivent préparer les recrutements à venir.

L'industrie souffre aujourd'hui d'un grave déficit d'image qu'il faut corriger car il ne permet pas de percevoir la réalité des entreprises mécaniciennes.

En effet, l'image vieillissante des industries mécaniques, en contradiction avec son dynamisme et son modernisme, doit être cassée pour pallier les conséquences en termes d'attractivité, de relève de la main d'œuvre et de transmission des savoir-faire.

Un facteur pénalisant, et peut-être le plus crucial, est la motivation ou plutôt son absence. Les jeunes ne sont pas attirés par les métiers de l'industrie et peu orientés vers les filières professionnelles considérées comme dévalorisantes, notamment par ceux qui ont connu le monde de l'usine à une époque où les conditions physiques de travail étaient difficiles.

Par conséquent, le vivier de jeunes pour les métiers industriels, et plus particulièrement de la mécanique, se tarit d'année en année.

L'enjeu est capital car les difficultés subsistantes en période de crise vont s'amplifier lors de la reprise et risquent de bloquer les entreprises dans leur croissance.

Les problèmes de formation ne peuvent être résolus par une politique de court terme. La persévérance est de rigueur. Poursuivre les campagnes de mobilisation des jeunes, introduire et valoriser de nouvelles formations en mécanique dans les universités et collèges avec une pratique plus généralisée de l'alternance, accroître les moyens de formation technique permanente pour permettre une meilleure adaptation des « seniors », mieux coordonner les écoles d'ingénieurs en mécanique sont autant de leviers pour répondre à l'enjeu des compétences indispensables aux entreprises mécaniciennes.

1.3.5. Les atouts des métiers de la mécanique

Les emplois offerts par les entreprises de mécanique sont relativement stables : « 92 % des salariés de la métallurgie sont en contrat à durée indéterminée, contre 84 % pour l'ensemble des secteurs et 83,4 % dans le tertiaire. »

En plus d'offrir des emplois stables, le niveau de rémunération des métiers industriels n'est pas négligeable, comparé notamment à certains salaires dans les services : sous l'effet de la hausse des qualifications et de la baisse proportionnelle de l'emploi non qualifié, les entreprises de mécanique semblent offrir des emplois bien rémunérés (de 1 500 à 2 200 euros pour les opérateurs/ouvriers qualifiés ; de 1 700 à 3 100 euros pour un technicien ou un agent de maîtrise ; de 2 600 à 3 400 euros pour un ingénieur ou cadre débutant – source : UIMM – ; puis, de 3 000 à 5 000 euros pour un ingénieur ou cadre en fonction de la mission et du niveau de responsabilité ou d'expertise).

Enfin, les évolutions de carrière sont très importantes dans les emplois qu'offrent nos entreprises, ce qui est un gage de mise à niveau constante des compétences. Dans la métallurgie, 430 000 salariés sont concernés chaque année (18 millions d'heures) par la formation continue (source : UIMM). Le développement de compétences professionnelles nouvelles permet à chacun de progresser dans son métier, favorise la mobilité interne et accompagne les réorientations.

La FIM et les professions qu'elle regroupe agissent chaque jour pour valoriser l'image de leurs métiers afin d'inverser la tendance. L'enjeu est de taille : permettre aux entreprises mécaniciennes de disposer des compétences dont elles ont besoin pour être compétitives.

Quelques exemples d'actions menées par la FIM et ses professions :

- l'organisation en octobre 2011 d'un colloque « Choisir la mécanique : des métiers d'avenir » pour faire découvrir au monde éducatif la richesse des industries mécaniques et de ses métiers, et réfléchir ensemble aux moyens à mettre en place pour développer les liens entre l'Éducation nationale et les entreprises de ce secteur ;
- Jérôme Frantz, président de la FIM, et Pascal Charvet, directeur de l'ONISEP, ont signé en mars 2013 à la Maison de la mécanique une convention de partenariat pour une durée de trois ans. Objectif : contribuer à valoriser les métiers de la mécanique auprès du grand public par le biais de ses syndicats membres ;
- plusieurs professions de la mécanique et un centre de formation participent chaque année sous l'égide de la FIM au salon l'Aventure des métiers pour promouvoir auprès des jeunes les métiers de la mécanique. Sur cet espace dont le slogan est « Industries mécaniques : faites bouger le monde ! », les visiteurs peuvent découvrir concrètement les métiers de la mécanique au travers de diverses animations : un simulateur de soudage, une maquette de matériel de manutention simulant des pannes, un atelier de production taille réduite… ;
- en 2012, plus de 1 000 jeunes, collégiens et lycéens ont participé à l'une des interventions organisées par la FIM et le CETIM pendant la Semaine de l'industrie dans 14 établissements scolaires de France ; neuf régions au total étaient concernées.

À cette occasion, un quiz ludique et interactif « La mécanique au cœur de la vie » a été lancé. Cet outil pédagogique a pour objectif de permettre aux industriels, enseignants… de présenter les métiers de la mécanique dans les établissements scolaires au travers de cinq thématiques : emploi, secteurs, métiers, produits et environnement. Plus de trente questions et de nombreuses interviews et vidéos de portraits de métiers pour comprendre leur richesse et les technologies proposées par cette industrie !

En 2013, 2 760 opérations – dont 364 pour la mécanique qui arrive en tête des secteurs organisateurs d'opérations ! – sont organisées sur l'ensemble du territoire, soit 21 % de plus qu'en 2012. La majorité de ces opérations sont des visites de sites industriels et des journées portes ouvertes, permettant ainsi au grand public, notamment aux jeunes et aux demandeurs d'emploi, de découvrir l'industrie du XXI^{e} siècle, ses métiers et ses carrières.

- La FIM et le CETIM se sont associés pour réaliser un document PowerPoint animé qui présente la mécanique, ses défis et ses métiers au travers de nombreux exemples d'innovations mécaniciennes et de témoignages.
  Objectif : donner un support de communication complet aux industriels qui vont présenter la mécanique dans les écoles, les collèges, les universités.
- La FIM a lancé en mars 2013 un site Internet dédié à ceux qui souhaitent découvrir la mécanique et/ou la promouvoir auprès des jeunes.

Le site www.lesmetiersdelamecanique.net offre deux entrées aux internautes :

- « Découvrir » pour trouver des informations sur la mécanique et ses métiers, ses formations, les besoins de recrutement des entreprises du secteur… ;
- « Promouvoir » pour les industriels, enseignants et conseillers d'orientation psychologues qui peuvent télécharger les outils de promotion développés par la FIM : la présentation PowerPoint « Les défis de l'industrie mécanique », le quiz « La mécanique au cœur de la vie », la vidéo « Au cœur de toutes les industries… La mécanique »…

Le site laisse une large place aux témoignages avec la rubrique « Portraits ». Jeunes, apprentis, chefs d'entreprise, salariés, etc., y racontent leur expérience sous forme écrite ou vidéo.

1.4. La formation (enseignement supérieur)

1.4.1. Constat

Il est difficile de faire une synthèse sur l'état de la formation en mécanique en France, les enjeux, les changements de méthodes, les points faibles et forts.

Néanmoins, il est possible de faire plus ou moins facilement des bilans purement comptables :

- les besoins chiffrés de l'industrie en termes d'emplois, qui sont publiés par les syndicats professionnels de l'industrie mécanique ;

- les données fournies par les établissements d'enseignement supérieur (universités, IUT, écoles d'ingénieurs...) sur le nombre de diplômés formés, par niveaux, dans le domaine de la mécanique ;
- l'évolution du nombre d'offres d'emploi dans un secteur à partir des organismes de placement (APEC par exemple) ;
- les enquêtes, réalisées depuis quelque temps par les écoles d'ingénieurs et les IUT et plus récemment par les universités, sur le devenir de leurs diplômés.

Tous ces indicateurs sont pertinents et instructifs. Il faut cependant être conscient de leur limite et les utiliser avec rigueur. En effet :

- le nombre d'offres d'emploi ne donne aucune indication sur la mission confiée au recruté ou sur ses possibilités d'évolution de carrière quelques années plus tard ;
- les enquêtes de devenir peuvent souffrir d'un taux de réponses statistiquement non représentatif, car parfois renseignées en priorité par ceux qui sont en recherche d'emploi, plus disponibles pour répondre à ces enquêtes relativement longues ;
- les besoins chiffrés de l'industrie sont à considérer avec précaution, en particulier lorsqu'ils sont très précis sur la spécialité demandée. Lorsqu'ils sont calculés à partir d'une classe d'âges partant à la retraite, cela semble assez correct. En revanche, lorsqu'ils sont basés sur des prévisions de développement d'un nouveau secteur d'activités, ces prévisions sont délicates à établir avec précision et nécessitent des études très approfondies[2].

Il est surtout important que la formation prodiguée dans les universités et les écoles d'ingénieurs corresponde aux besoins de la profession à long terme. Pour cela, les écoles s'appuient sur des conseils de perfectionnement et les universités font intervenir de plus en plus d'industriels dans la formation. Cependant, l'horizon des industriels est souvent dans le court ou moyen terme. Les formateurs se doivent de rappeler qu'un diplômé doit être formé pour les 45 années à venir. Sa formation doit lui fournir les moyens de s'adapter, d'évoluer et bien sûr de se former/progresser tout au long de sa vie professionnelle. Si cela a de tout temps été l'objectif, aujourd'hui la vitesse à laquelle évolue notre environnement rend celui-là beaucoup plus difficile à atteindre.

L'enjeu actuel est donc de former des mécaniciens non seulement bien préparés à leur futur métier, mais surtout disposant des capacités et des compétences nécessaires pour s'adapter tout au long de leur vie professionnelle à l'évolution de leur métier. La solution pourrait sembler avoir déjà été trouvée, puisque les personnes actuellement en fin de carrière ont réussi le challenge ; il suffirait donc de reproduire le même modèle. Cependant, un élément nouveau complique

[2] La Cour des comptes a relevé ce point par exemple dans son rapport sur « La politique de développement des énergies renouvelables » de juillet 2013.

sérieusement la situation : les étudiants qui entrent aujourd'hui dans l'enseignement supérieur sont très différents de ceux qui y rentraient il y a 40 ans :

- l'évolution rapide de notre société et des technologies a conduit à changer l'enseignement dans les cycles primaire et secondaire. Cela s'est traduit par l'introduction de nouveaux enseignements dès le plus jeune âge, comme l'informatique, l'éveil à l'art, etc., et la technologie, qui a en partie pris la place de la physique de base. Aujourd'hui, le bachelier a des connaissances dans de nouveaux domaines mais, comme le nombre d'heures d'enseignement n'a pas augmenté, il a dans certaines matières des connaissances moins approfondies ;
- les enseignements en mathématiques et en physique de la seconde à la terminale scientifique S (comparée à l'ex-terminale C) ont été réduits de respectivement 26 % et 19 % depuis 1990, ce qui représente 150 heures et 75 heures de moins. Pour acquérir les fondements nécessaires, entre autres, à la mécanique, les élèves disposent de moins de temps. Les seuls qui peuvent réellement y parvenir sont les meilleurs ou les privilégiés qui sont, par exemple, dans des lycées ayant les moyens financiers et humains de proposer des heures d'accompagnement personnel transformées en heures de mathématiques. Les conséquences se traduisent par l'écart grandissant entre les meilleurs élèves et ceux en difficulté, comme l'a montré l'enquête PISA de 2009, hélas confortée par celle de 2012 (Programme International pour le Suivi des Acquis des élèves). La France est aujourd'hui dans la moyenne des pays de l'OCDE pour le niveau de performance en compréhension de l'écrit et en sciences, alors qu'elle était au-dessus de la moyenne auparavant ;
- 20 % de la population avait le baccalauréat en 1970, contre 45 % en 1990, et 75 % actuellement[3,4]. De plus, aujourd'hui, 75 % des bacheliers s'inscrivent dans l'enseignement supérieur[5]. Par ailleurs, le nombre d'ingénieurs diplômés a plus que doublé depuis 1990[6]. L'admission dans l'enseignement supérieur est donc beaucoup moins sélective ;
- l'étudiant actuel a accès à un grand nombre d'informations. C'est un avantage mais cela peut présenter des effets pervers :
  - o l'information obtenue provient en général d'Internet ; elle est souvent non contrôlée et donc parfois fausse,
  - o si toutefois l'information n'est pas immédiatement accessible via un moteur de recherche grand public, l'étudiant n'est pas habitué à rechercher l'information ailleurs (moteur de recherche spécialisé, livres, etc.) ou à la vérifier ;

- dès l'école élémentaire, il a été constaté que l'élève est moins apte à une concentration longue, ce qui rend difficile un apprentissage ardu, du fait

[3] http://media.education.gouv.fr/file/2008/82/4/chap8-9_33824.pdf

[4] http://www.education.gouv.fr/cid143/le-baccalaureat.html

[5] http://cache.media.enseignementsup-recherche.gouv.fr/file/etat_du_sup_en_2013/41/6/EESR_2013_Complet_116_web+index_250416.pdf

[6] Rapport de la Conférence des directeurs des écoles françaises d'ingénieurs (CDEFI), janvier 2014.

en particulier de l'usage intensif qui est parfois fait d'Internet ou des jeux vidéo[7].

Par ailleurs, les besoins de l'industrie ont évolué.

- Tout d'abord dans le cœur de métier, car le produit « mécanique » est aujourd'hui le fruit d'un procédé pluritechnologique et est de plus en plus complexe. Les compétences nécessaires pour le réaliser sont donc de plus en plus larges.

On demande au mécanicien en licence (bac +3) niveau assistant-ingénieur de[8] :

- connaître le rôle et le champ d'application de la mécanique dans tous les secteurs : milieux naturels (océans, atmosphère, espace…), milieux industriels (nucléaire, pétrolier, alimentaire, médical…), transports (terrestre, aérien, maritime…), enjeux sociétaux (sécurité, fiabilité, économie d'énergie, procédés propres…) et « bien-être » (confort, environnement sonore…) ;
- maîtriser les outils fondamentaux de la mécanique : définition d'un système mécanique, approche locale ou globale, équilibre des forces, flux et bilans énergétiques, systèmes conservatifs ou non conservatifs, mécanismes et liaisons ;
- maîtriser les notions de champs de force, déplacement, vitesse, déformation et contrainte pour comprendre des exemples simples de mouvement de solides rigides ou déformables, d'écoulements de fluides et de rhéologie ;
- pouvoir expliquer qualitativement les phénomènes simples de son environnement ;
- estimer les ordres de grandeur, manipuler correctement les unités, intégrer une bonne vision de l'espace et de ses représentations, savoir isoler un système ;
- être capable de formuler un problème avec ses conditions limites, de l'aborder de façon simple, de construire une solution et de conduire une analyse critique des résultats ;
- savoir valider un modèle par comparaison de ses prévisions aux résultats expérimentaux et apprécier les limites de validité d'un modèle ;
- connaître les principales familles de matériaux et leurs propriétés mécaniques ;
- être en capacité de réinvestir les connaissances acquises dans un contexte professionnel.

[7] http://www.academie-sciences.fr/activite/rapport/avis0113.pdf

[8] Référentiel de compétences dans le domaine « sciences, technologies, santé » pour la licence généraliste mention mécanique rédigé par le GTT-AUM de l'AFM, paru dans le livre *La licence scientifique dans l'espace francophone. Essai de référentiel de connaissances et de compétences*, sous la direction d'Évelyne Garnier-Zarli, ISBN : 978-2-343-01859-1.

En plus de ces compétences théoriques, l'assistant-ingénieur doit avoir des compétences pratiques acquises en laboratoire concernant l'instrumentation en mécanique, ainsi que l'acquisition et le traitement des données. À savoir :

- utiliser en autonomie des techniques courantes dans le domaine du génie mécanique : faire un schéma cinématique, connaître les outils de représentation graphique (dessin industriel) et les techniques de fabrication, par enlèvement ou ajout de matière, la mise en forme, utiliser des outils de CAO (conception assistée par ordinateur) et de simulation d'un usinage en FAO (fabrication assistée par ordinateur) ;
- utiliser en autonomie des techniques courantes dans le domaine du génie civil pour l'étude des matériaux, les interactions sols/ouvrages, l'aménagement, les infrastructures, liées à la réglementation, la normalisation, les essais de laboratoire et, in situ, la justification des ouvrages ;
- utiliser en autonomie les techniques courantes dans le domaine du génie des procédés ;
- analyser, interpréter des données expérimentales, développer une argumentation et rédiger un rapport de synthèse ;
- être en capacité d'investir ses savoirs et savoir-faire dans la maintenance industrielle.

À l'ingénieur mécanicien (bac +5), on va demander non seulement de maîtriser un certain nombre de concepts, outils et techniques susmentionnés, mais également d'être capable de les faire évoluer. Prenons l'exemple de la conception assistée par ordinateur. Il n'est pas envisageable aujourd'hui de former quelqu'un au niveau bac +5 qui ne maîtrise pas la CAO. Or la CAO est tout d'abord de la conception et ce n'est pas son apprentissage qui est assisté par ordinateur mais son optimisation (possibilité de simulation de l'objet technique, gestion des données techniques…). L'apprentissage nécessite d'acquérir les fondements de la conception. Le temps nécessaire est donc incompressible. De plus, la cotation fonctionnelle n'est pas non plus facilitée par la CAO. Le gain de temps qu'apporte la CAO dans l'apprentissage se traduit par la suppression du temps nécessaire à la mise en plans qui était antérieurement réalisée manuellement. En conclusion, l'apprentissage lié au logiciel de CAO nécessite du temps supplémentaire.

- De plus, l'industriel demande des connaissances/compétences autres au diplômé (bac +5) :
  - langues étrangères ;
  - management, gestion, gestion de projet, hygiène et sécurité, environnement, (règlement REACH sur l'enregistrement, l'évaluation, l'autorisation et les restrictions des substances chimiques...) ;
  - analyse du cycle de vie complet d'un produit ou d'une machine pour répondre aux exigences liées au développement durable, etc.

Ces demandes accrues ne se sont pas accompagnées d'une augmentation de la durée de formation. Bien au contraire, le nombre d'heures d'enseignement proprement dit a diminué. Il a fallu rajouter des stages de plus en plus longs afin de rendre les jeunes diplômés opérationnels plus rapidement.

En résumé, l'étudiant en mécanique aborde plus de choses qu'il y a vingt ans, mais les fondements scientifiques sont vus plus rapidement. L'entrée dans l'enseignement supérieur est moins sélective. Les exigences dans le cœur de métier sont plus larges, ainsi que dans des domaines périphériques. La formation est toujours du même nombre d'années, mais réduite en heures effectives d'enseignement. Notre système de formation est donc malade !

Contrairement à la recherche, les rencontres consacrées à la pédagogie ne sont pas nombreuses, ce qui limite les échanges entre enseignants. On peut citer le CETSIS, Colloque sur l'enseignement des technologies et des sciences de l'information et des systèmes, qui concerne la communauté en sciences pour l'ingénieur au sens large (EEA, mécanique, optique, physique…) ou encore de manière plus spécialisée la session « Formation et pédagogie » du Congrès français de mécanique (CFM). On peut constater que si initialement les nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC) étaient à l'honneur au CFM, elles ont fait de la place depuis environ cinq ans aux exposés sur des sujets visant à augmenter l'intérêt et la motivation des étudiants (passage de « ceintures »[9], vote des étudiants en cours pour répondre à une question par télévoteurs[10]…) et bien sûr la mise en place de la formation par projets et par compétences ou méthode de classe inversée. On peut également mentionner l'arrivée, qui n'est peut-être qu'une mode, des *massive open online course*, qui fera nécessairement bouger les choses. Néanmoins, même si toutes ces initiatives, visant à motiver davantage l'étudiant et à le rendre acteur de sa formation, sont louables et indispensables, elles ne sont que des médicaments de confort, des palliatifs partiels, qui ne peuvent pas guérir la maladie dont est atteint notre système de formation.

1.4.2. Propositions

Il faut agir au plus vite dans l'enseignement supérieur pour les diplômés de demain, mais également au niveau de l'enseignement primaire et secondaire pour ceux d'après-demain. Les actions à entreprendre doivent non seulement soulager les principaux maux de notre système, mais également les guérir.

Le niveau des lycéens français diminue par rapport à ceux des autres pays de l'OCDE. Il est donc nécessaire d'amorcer au plus vite un changement avec un retour vers les bases fondatrices. Dans l'enseignement primaire et secondaire, il faut redéfinir les fondamentaux nécessaires pour la future vie professionnelle de l'enfant, en mathématiques, en physique et en français, en plus, bien sûr, d'en faire un citoyen. Ces fondamentaux doivent être prioritaires. Par conséquent, il est indispensable de laisser du temps à l'élève pour les assimiler. Il faut éviter la dispersion : est-ce bien utile que des élèves de terminale scientifique voient la mécanique quantique, sujet traité préalablement dans le supérieur ? Les mêmes questionnements

[9] A. Pelat, J.-M. Génevaux, S. Gougeon, J.-P. Dalmont, N. Joly, « Leur remonter les bretelles avant l'examen ou leur faire passer des ceintures ?... De quoi donner des boutons ! », Congrès français de mécanique, Bordeaux, 26–30 août 2013.

[10] N. Régnier, « Systèmes de réponse instantanée pour une pédagogie active », Congrès français de mécanique, Bordeaux, 26–30 août 2013.

se posent en mathématiques avec la suppression de certains fondements remplacés par des notions « dont l'intitulé fait plutôt penser à des recherches avancées de spécialistes »[11]. La dispersion et la non-compréhension de certains fondements par manque de temps est peut-être une des causes de la désaffection des sciences par les élèves, celles-ci étant réputées dures. Effectivement, les sciences font appel à des notions complexes, mais compréhensibles si on laisse le temps à l'élève de les assimiler, alors qu'elles deviennent rebutantes si elles ne sont pas comprises.

Dans l'enseignement supérieur, nous devons former au plus près des besoins industriels et donc au mieux les mécaniciens de demain. Comme cela a été argumenté plus haut, les exigences dans le cœur de métier sont plus nombreuses, ainsi que dans d'autres domaines liés au métier de l'ingénieur au sens large. En revanche, la formation est toujours de la même durée, voire réduite en heures effectives d'enseignement. Deux moyens d'action sont possibles : réaménager les compétences demandées à durée de formation constante, ou augmenter la durée de formation à compétences demandées constantes.

Les propositions ci-dessous peuvent toutes coexister. Elles sont illustrées au niveau bac +5 ; néanmoins, elles peuvent aisément être adaptées à d'autres niveaux. La première proposition consiste en un réaménagement des compétences à durée de formation constante et les deux suivantes impliquent une augmentation de la durée de formation.

- À durée de formation constante, et par conséquent à volume de formation équivalent, les ambitions pédagogiques doivent être réaménagées. À l'opposé du référentiel actuel unique définissant l'ingénieur/le master, redéfinissons-le en fonction du métier ciblé. Cependant, aucune concession ne doit être faite sur le socle des sciences fondamentales dont la mécanique constitue une large part : le diplômé doit les maîtriser. Les réaménagements doivent être opérés dans certaines disciplines bien ciblées. L'ingénieur mécanicien en entreprise est, en fonction de ses aspirations, de sa personnalité et de ses aptitudes, un scientifique expert ou un scientifique manager. Sa formation peut donc être déclinée selon ces deux orientations. Le scientifique expert doit être très performant en science et/ou technologie, mais peut avoir une formation allégée en sciences humaines et sociales (management, gestion de projet, qualité…), ce qui représente aujourd'hui environ 20 % de la formation d'un ingénieur. Le scientifique manager peut être un mécanicien un peu moins performant sur certains aspects. Il ne lui est pas demandé de maîtriser de logiciel de CAO, mais la conception mécanique doit lui être familière. Il n'est pas un expert en calcul numérique, ne connaît pas forcément les codes de calcul les plus connus, mais doit pouvoir faire un calcul de résistance des matériaux « à la main ». En revanche, sa formation en sciences humaines et sociales doit être solide.
  Cette solution permet de recentrer les compétences demandées sur le métier du mécanicien en entreprise, sans handicaper le futur ingénieur dans sa carrière. En effet, l'étudiant dispose de plus de temps pour assimiler les

[11] http://www-fourier.ujf-grenoble.fr/~demailly/manuscripts/communique_math_TS_2011.pdf

notions qui lui sont enseignées. Il est à souligner qu'aucun moyen humain et financier supplémentaire n'est nécessaire. Pour qu'au cours de sa vie professionnelle le scientifique expert puisse devenir scientifique manager, ou inversement, il faut que l'accès à la formation continue ou par alternance soit grandement facilité. Une politique dynamique de validation des acquis de l'expérience doit être menée en concertation avec l'industrie.

- Une autre solution est que la formation au niveau bac +5 (master ou ingénieur) comporte une année supplémentaire réalisée en alternance. Toutes les compétences actuellement demandées sont validées, mais une partie de la formation est alors externalisée dans les entreprises. En effet, il est envisageable de confier certains modules de formation aux entreprises partenaires, la validation étant effectuée par l'établissement délivrant le diplôme : management, gestion de projet, qualité, etc. La formation gagnerait certainement en efficacité, les entreprises étant en général plus performantes que les enseignants-chercheurs dans la plupart de ces domaines. Il est alors nécessaire de définir préalablement l'attente que l'établissement de formation a de l'entreprise.
- La troisième solution consiste à allonger la durée de formation pour permettre d'atteindre les niveaux de formation requis aujourd'hui en termes de compétences. Cela est envisageable dans le système européen LMD (licence, maîtrise, doctorat) qui est basé sur la capitalisation de compétences via des unités d'enseignement dont la valeur est comptée en ECTS (*European Credits Transfer System*). Un étudiant peut assimiler plus à son rythme certaines notions difficiles et réussir à valider les crédits ECTS nécessaires pour l'obtention du diplôme, sans que cela soit synonyme pour autant de redoublement. L'étudiant peut préparer en un semestre un nombre de crédits ECTS inférieur à 30 (nombre de crédits préparés dans le système actuel en un semestre).

Ces solutions sont toutes envisageables à surcoût réduit, voire nul. Certaines présentent l'avantage d'impliquer davantage les entreprises. Cependant, elles supposent toutes que le référentiel des formations d'ingénieur ou de master (bac +5) soit flexible pour s'adapter à la situation actuelle décrite dans la première partie de ce chapitre. L'enseignement supérieur a la capacité et la réactivité suffisante pour agir vite, mais laissons-lui la possibilité :

- de former des scientifiques experts ou des scientifiques managers en cinq ans. Pour les deux types de scientifiques, experts ou managers, cela suppose que l'évolution de salaire soit identique, comme cela est pratiqué dans certaines entreprises, fleurons de l'industrie française ;
- d'allonger la formation d'un an en associant des entreprises pour des compétences « métier » complémentaires ;
- d'adapter la durée de la formation au rythme de l'étudiant.

Faisons de l'enseignement des fondamentaux une priorité ! Des solutions existent ; donnons-nous collectivement la liberté de les mettre en œuvre !

2 Les grands enjeux : les secteurs industriels

La mécanique est la pierre angulaire de toutes les industries. Elle est à la base de la création et de la fabrication de tous les objets technologiques ou communs qui nous entourent.

Pour mieux convaincre le lecteur de cette assertion, ce chapitre a pour but de montrer les grands enjeux auxquels sont confrontés des secteurs industriels importants de notre économie.

2.1. L'industrie automobile

2.1.1. Importance macroéconomique du secteur

La mobilité est devenue un droit et, dans ce cadre, l'automobile reste une composante majeure de la vie quotidienne. Objet de rêve tant qu'elle n'est restée accessible qu'à une minorité, elle a perdu progressivement son caractère magique. Sa généralisation, par les contraintes qu'elle entraîne, a mis en lumière des impacts pour la société : pollution, congestion, accidentologie.

En France, l'industrie automobile avec ses constructeurs (deux nationaux Renault et PSA, plus Toyota) et ses équipementiers (Valeo, Faurecia, Plastic Omnium…) reste et restera une industrie majeure de notre pays, malgré les difficultés auxquelles elle est confrontée. Elle représente 2,4 millions d'emplois (25 % fabrication, 25 % services, 50 % transports), soit 10 % de l'emploi direct et indirect en France.

L'industrie automobile est en pleine mutation, devant faire face au défi de la croissance par un marché tiré par les pays émergents (Brésil, Russie, Inde, Chine), au défi de la concurrence en termes de modèles (haut de gamme *versus low cost*), au défi de la compétitivité (fabriquer localement auprès des marchés), aux défis énergétiques et environnementaux (véhicules électriques ou hybrides, pile à combustible, hydrogène, pièges à NOx…).

Cette industrie doit garder une importance stratégique, en s'appuyant sur les réflexions de la Plateforme de la filière automobile mise en place en 2009, pour développer :

- la recherche, l'innovation, les techniques et la normalisation associée ;
- les métiers, les compétences et les formations ;

- l'excellence industrielle ;
- les stratégies et les mutations.

2.1.2. Tendances, enjeux et défis du secteur à l'horizon 2020

Dans le cadre d'une philosophie du retour à l'essentiel liée peut-être à une perte de confiance dans le progrès technique, l'automobile se trouve confrontée au plus grand défi technologique depuis 80 ans. Un foisonnement de solutions techniques pour réduire l'empreinte CO_2 des véhicules, intégrant leur fabrication, entraîne l'industrie automobile dans de multiples voies dont la convergence est incertaine. Il est nécessaire de concevoir, de fabriquer et de vendre dans le cadre d'une approche par le cycle de vie, allant des matières premières à la valorisation du produit usagé, en passant par la fabrication, la distribution et l'utilisation du produit.

Au-delà de la mondialisation qui conduira toujours plus à concevoir et fabriquer auprès de ses marchés, les objectifs techniques à l'horizon 2020 concernent :

– le développement de systèmes de motorisation propre, avec l'étude d'un scénario « limité » (continuité des solutions actuelles) et d'un scénario de « rupture » (évolutions radicales), et cela dans le cadre de deux voies : l'amélioration de moteurs à combustion interne et le développement de véhicules hybrides/électriques ;
– des niveaux de consommation accessibles (ou d'autonomie pour un véhicule électrique) par ses caractéristiques masse, dimension, SCx, résistance au roulement ;
– la trace écologique du véhicule par les matériaux employés et leur origine, leur aptitude au démontage et leur recyclabilité, leur coût « CO_2 » de mise en œuvre et l'efficience énergétique des moyens de production ;
– les synthèses véhicule/chaîne de traction/prestations recherchées qui peuvent permettre des équilibres différents ;
– l'acceptabilité de l'automobile en termes de sécurité, en particulier par son caractère non agressif ;
– une conduite apaisée, agréable et confortable par les progrès apportés en matière de silence, de véhicule communiquant, de conduite assistée ou aidée, gage à la fois de la compétitivité de l'offre automobile et de sa bonne contribution à la sécurité globale.

2.1.3. Attentes vis-à-vis des partenaires-fournisseurs équipementiers-ensembliers

Si les constructeurs sont responsables des prestations et de la qualité finale des véhicules qu'ils conçoivent et qu'ils produisent, ils dépendent pour une majorité de composants des équipementiers. La maîtrise et le contrôle de la chaîne des

fournisseurs est d'autant plus essentielle que la décentralisation de la conception et de la fabrication est une donnée a priori irréversible. Il faut en particulier :

– pouvoir communiquer en temps réel et donc avoir les mêmes outils de modélisation et de simulation tout au long de cette chaîne ;
– pouvoir fabriquer au plus près de l'usine de montage du constructeur, pour éviter les problèmes de transport de pièces ou d'ensembles de composants ;
– être capable, à partir d'un cahier des charges fonctionnel, de proposer des solutions innovantes, d'autant plus attendues que les fournisseurs maîtrisent mieux que le constructeur les composants qu'ils conçoivent et fabriquent.

L'optimisation du ratio coût/valeur, par la réduction des coûts de production, la standardisation, la réduction des investissements, la réduction des délais de développement (*time to market* des innovations), ne peut s'obtenir qu'avec la participation active et partagée des équipementiers/fournisseurs dans le monde entier.

2.1.4. Domaines clés de recherche et innovation

L'électronique a envahi l'automobile, que ce soit dans le domaine de la sécurité active, dans le confort, l'assistance à la conduite, l'interface Homme/machine… Mais l'objet automobile reste un produit mécanique de base, auquel on associe l'électronique pour former des produits « mécatroniques », en particulier tous les capteurs et actuateurs intégrés dans le fonctionnement des véhicules.

Indépendamment de cet aspect, on peut retenir que les grands domaines de la R&D de la mécanique sont les suivants :

– réduction de la masse : cette réduction concerne l'utilisation de matériaux à faible densité, en particulier les composites et les alliages d'aluminium ou de magnésium pour la caisse en blanc, les polymères pour les vitrages. Les problèmes principaux à résoudre sont la connaissance des lois de comportement de ces nouveaux matériaux, la simulation de leurs procédés de mise en œuvre, la connaissance de leurs propriétés après transformation et surtout le problème de l'assemblage de matériaux différents, y compris la simulation de ces assemblages ;
– amélioration de l'aérodynamique : cette amélioration concerne les traitements locaux (dessous de caisse, rétroviseurs, passages de roues…), avec l'usage de codes de mécanique des fluides de plus en plus performants pour traiter ces particularités ;
– réduction de la consommation des équipements : cette réduction influe directement sur la consommation du véhicule et est en particulier fondamentale pour l'augmentation de l'autonomie des véhicules électriques. Les principaux équipements qui méritent ce type de développement sont le chauffage, la climatisation, le dégivrage/désembuage, l'essuyage, l'assistance de direction ;
– nouvelles motorisations : le court terme concerne l'amélioration des motorisations classiques, en travaillant sur les rendements thermodynamiques, la mécanique des fluides pour la suralimentation, la réduction des frottements

par l'utilisation de nouveaux revêtements et le traitement acoustique. Le plus long terme consiste à développer des véhicules électriques/hybrides avec des travaux sur les moteurs électriques et le système d'intégration avec gestion thermique et gestion électronique de contrôle et de sécurité ;
- écoconception : ce domaine est étroitement lié à l'utilisation de matériaux soit recyclés, soit biosourcés. Doit être posée la question de l'évaluation de leurs performances qui est souvent coûteuse et limite leurs applications. Il est aussi en relation avec la réutilisation de pièces ou d'ensembles fonctionnels comme pièces de rechange, avec la même question de l'évaluation de leurs performances ;
- écofabrication : il faut limiter les coûts de fabrication et d'assemblage, et limiter les rebuts de production, par une modélisation de la chaîne de fabrication prenant en compte tous les paramètres ;
- analyse du cycle de vie : c'est l'outil de mesure environnemental reconnu par tous. Mais son application est contestée par la non-fiabilité des données d'entrée, par la liberté dans le choix des hypothèses, par la complexité de la méthode difficilement applicable par les PME… Il faut arriver à un logiciel de référence dont la nature des résultats ne soit pas contestée ;
- modélisation et simulation : c'est ce domaine qui a fait les plus grands progrès ces dernières années et qui a changé la structure et le savoir-faire des bureaux d'études et de méthodes. Il n'en reste pas moins que de nombreux progrès sont encore nécessaires pour assurer la continuité de la démarche de l'amont à l'aval, prendre en compte les incertitudes sur les données d'entrée et la dispersion des moyens de production. Il faut des outils qui permettent de concevoir pour produire robuste, conformément au cahier des charges imposé ;
- réalité virtuelle et augmentée : c'est l'environnement actuel du styliste et concepteur, mais peu appliqué à la recherche de solutions mécaniques. Il ne s'agit pas de recherche à proprement parler, mais plus de l'application de solutions existantes à de nouveaux problèmes. Cet aspect peut aussi être relié au prototypage rapide pour valider rapidement des solutions virtuelles.

2.2. L'industrie aéronautique et spatiale

2.2.1. Importance macroéconomique du secteur

Voler, imiter les oiseaux, un rêve que nous avons tous fait. Ce rêve a poussé d'ingénieux inventeurs à prendre des risques inouïs, parfois au péril de leur vie. Le développement des avions, des hélicoptères, des fusées n'a cessé d'améliorer la performance et la sécurité de ces machines, et de permettre à l'Homme de satisfaire ses rêves, ses envies et ses besoins grandissants.

Depuis 1946, la courbe de croissance du trafic aérien ressemble à la trajectoire d'un avion en montée rapide. De 108 millions en 1960, le nombre de passagers est passé à 1 milliard au début des années 1990, puis à 2,9 milliards en 2012. D'après les analyses des spécialistes du secteur, le cap des 3 milliards sera franchi en 2013.

D'après l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale), le trafic devrait dépasser les 6 milliards de passagers d'ici 2030, avec un taux de croissance de 5 % par an.

En 2012, le transport aérien représentait environ 35 % en valeur des échanges commerciaux et a généré, à l'échelle mondiale, plus de 5,5 millions d'emplois directs (industrie manufacturière, aéroports et compagnies aériennes) et plus de 26 millions d'emplois indirects (services, tourisme, etc.) [1, 4]. Actuellement, pour l'Europe, cela signifie 500 000 emplois directs et un chiffre d'affaires d'environ 130 milliards d'euros soit 30 % du chiffre d'affaires mondial [8]. Les acteurs majeurs de ces domaines sont pour l'Europe : Airbus, ATR, Dassault Aviation, Eurocopter, Agusta Westland, Safran, Rolls Royce, Thales, BAE Systems, Finmeccanica, Saab, Avio… Il est important pour les analyses de considérer l'ensemble du cycle de vie du produit du point de vue du coût de possession, de la réparation et du recyclage, et donc des acteurs spécifiques impliqués. Du fait de leur nombre, ils ne sont pas explicitement cités dans cet article, mais leur liste est disponible.

Le secteur spatial européen a représenté en 2012 environ 6,5 milliards d'euros de chiffre d'affaires (consolidé) et procuré plus de 35 000 emplois directs dont 13 000 en France [9, 10]. Ces chiffres ne prennent pas en compte l'activité liée aux missiles stratégiques. Les acteurs majeurs du secteur sont Airbus Defence and Space, Thales Alenia Space, Finmeccanica, OHB, Ruag et Safran.

Les projections sont-elles crédibles ? Il est de notoriété publique que l'aéronautique et le spatial sont des secteurs cycliques de l'industrie (quel domaine ne l'est pas ?). Il n'y a qu'à regarder la courbe de croissance du trafic aérien [3, 4, 7] qui montre régulièrement des stagnations voire des baisses en réaction à des phénomènes économiques ou politiques mondiaux (chocs pétroliers, guerres du Golfe, crises financières…). Il n'en reste pas moins que cette courbe est macroscopiquement en perpétuelle croissance depuis le début.

Pour l'heure, en particulier pour le secteur aéronautique, tous les ingrédients d'une nouvelle période de croissance sont en place. À commencer par le principal : la croissance de l'économie mondiale [2]. D'après les statistiques, 1 point de croissance du PIB mondial représente 1,5 point de hausse du trafic aérien. Compte tenu du fait que les prévisions les plus basses projettent une croissance de l'économie mondiale de 3 % par an, le trafic aérien devrait bien doubler sur les vingt prochaines années. Cette progression devrait être trois fois plus rapide [2] dans les pays émergents. Les prévisions d'Airbus, de Boeing et de l'IATA prévoient également une croissance de 4,6 entre 2012 et 2030 [2, 3, 4, 5, 6, 7] pour l'Inde et la Chine. En effet, ces pays sont en pleine croissance économique et en pleine évolution sociétale qui entraînent des besoins de transports accrus. Or, ces pays ne sont pas encore équipés d'infrastructures terrestres capables de répondre à des besoins croissants. Seul le transport aérien est capable de répondre rapidement à cette demande avec des coûts acceptables pour ces pays.

À ce moteur principal, il faut ajouter le nombre croissant de migrants internationaux (190 millions en 1990 pour 240 projetés en 2013 [2]), la croissance du tourisme et l'augmentation de la classe moyenne mondiale dont l'effectif devrait passer de 2,1 à 5 milliards d'ici 2030 [2].

Toutes les analyses montrent que la croissance du trafic aérien est durable. La communauté mécanicienne est indispensable pour le soutien de cette croissance et doit tout faire pour réussir les développements nécessaires en matière d'aéronefs, d'infrastructures et d'organisation pour être capable de répondre à ces besoins dans le respect de l'environnement, tout en assurant la compétitivité des produits et des entreprises du secteur.

Quant au secteur spatial européen, il se répartit entre le domaine institutionnel, dominé par l'Agence spatiale européenne, et le secteur commercial. Ce dernier étant principalement constitué de ventes aux opérateurs privés de satellites et de ventes de lanceurs à Arianespace. Les perspectives de croissance à moyen terme sont faibles dans le contexte économique occidental actuel. L'effet bénéfique de la croissance des pays émergents sera contrebalancé par l'apparition de compétiteurs nouveaux sur les marchés à l'export (vente de satellites et/ou de services de lancement).

2.2.2. Tendances, enjeux et défis du secteur à horizon 2020

Les domaines aéronautiques et spatiaux sont caractérisés par des temps de développement et d'exploitation longs (5 à 10 ans pour les développements et 10 à 40 ans pour l'exploitation), par la complexité élevée des produits et la nécessité d'atteindre de très hauts niveaux de performance. Il faut y ajouter un niveau d'exigence très élevé du point de vue de la sécurité et de la sûreté de fonctionnement, qui impose un référentiel de certification très contraignant et un niveau de qualité et de contrôle très exigeant. Il faut enfin considérer qu'en opposition avec d'autres domaines techniques, l'aéronautique est paradoxalement un marché que l'on peut qualifier de niche du fait des tailles des séries. En effet, rares sont les modèles d'avions construits à des cadences supérieures à 15 par mois (à l'exception des avions monocouloir construits à une cadence de 40 par mois). Pour le spatial, les cadences sont encore plus basses puisque les produits les plus récurrents (lanceurs) ne dépassent pas 7 modèles par an. Cela implique des exigences d'anticipation sur la maturité (technique et industrielle) des produits lors de leur introduction en service, des exigences en matière d'outils de conception (design, analyse numérique, etc.) et de justification réglementaire (essais, mesures, analyses numériques corrélées, etc.). Idem pour ce qui concerne la production, il est important d'imaginer très en amont les moyens qui devront être mis en œuvre pour relever les challenges, voire paradoxes, liés aux enjeux de coûts, de qualité, de traçabilité et de pérennité.

Dans la suite de cet article, nous focaliserons le propos sur le marché aéronautique civil en sachant que nombre de sauts technologiques sont tirés par les besoins de défense et les opportunités qu'ils ouvrent du fait des financements étatiques, mais aussi des méthodes de certification spécifiques et des séries faibles. L'existence de démonstrateurs technologiques permet de renforcer la maturité des outils de justification et de certification qui seront utilisés pour le civil, et de compléter ou conforter les analyses de risques techniques et industriels. Le spatial, quant à lui, est un merveilleux booster pour la technologie et en particulier dans

les domaines liés à l'allègement, la réduction des consommations électriques et l'adaptation à l'environnement spatial.

Il est important de noter que la prochaine génération d'avions ne verra le jour qu'à l'horizon 2025–2030, compte tenu des programmes de renouvellement en cours qui visent à répondre à un premier niveau de besoin d'évolution des compagnies aériennes en relation avec le coût de possession des aéronefs et leur impact sur l'environnement. Ils s'inscrivent également dans l'agenda stratégique fixé en 2000 par le conseil consultatif pour la recherche aéronautique en Europe, l'ACARE. Cet agenda vise à l'horizon 2020 que les développements technologiques pour les nouveaux avions tendent vers les objectifs suivants : la réduction de 50 % des émissions des gaz à effet de serre, la réduction de 80 % des émissions de NOx et la réduction de 50 % du bruit perçu.

En 2011, un groupe de haut niveau représentant plusieurs secteurs d'activité (infrastructure, aéronefs, exploitation, carburants, recherche) a élaboré pour la commission européenne une nouvelle stratégie à long terme : Vision 2050. À cet horizon, les grands objectifs environnementaux fixés pour les nouveaux appareils sont : réduction de CO_2 de 75 % par passager-km (figure 2.1), réduction des NOx de 90 %, réduction du bruit perçu de 65 % par rapport à une référence de l'année 2000. Ces objectifs seront parmi les lignes directrices qui constitueront les cahiers des charges des aéronefs et de l'ensemble des systèmes et des entités qui contribuent à leur fabrication, leur opération et leur maintenance.

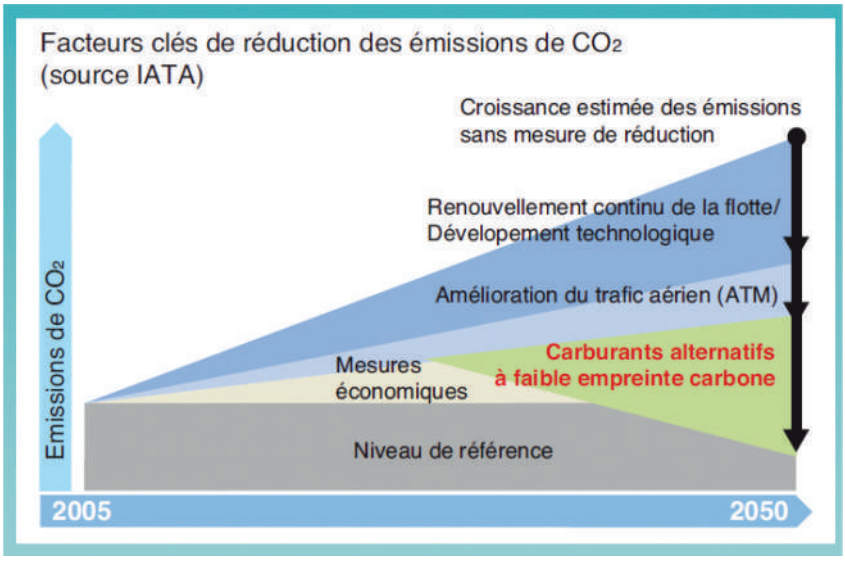


Figure 2.1. – Facteurs clés de réduction des émissions de CO_2.

Il faut noter que l'atteinte de ces objectifs nécessitera la mobilisation de tous les talents du monde technique et scientifique car ils constituent une étape considérable à franchir. Cela venant s'ajouter aux progrès énormes déjà réalisés depuis 50 ans, avec, par exemple : la réduction d'un facteur proche de cinq de la consommation de kérosène (la consommation par passager d'un A380 est inférieure à 3 L/100 km),

20 % de réduction du bruit à la source soit un facteur dix de l'amplitude sonore, réduction quasi totale des hydrocarbures imbrûlés et division par quatre des NOx [1].

Les principaux enjeux du domaine spatial seront de s'adapter aux évolutions du marché (nouveaux entrants et maîtrise des coûts tout en améliorant la flexibilité, la fiabilité et la disponibilité des produits). On considèrera en particulier la propulsion électrique des satellites et l'intégration des concepts de développement durable (ergols « verts », maîtrise des débris orbitaux et gestion de la fin de vie des satellites et étages supérieurs des lanceurs).

2.2.3. *Attentes vis-à-vis des partenaires-fournisseurs équipementiers-ensembliers*

Les principaux leviers d'innovation (figure 2.1) concernent bien évidemment la structure de l'aéronef et son système propulsif (moteur et nacelle), mais aussi tout ce qui touche au trafic aérien lui-même : temps de vol, altitude, trajectoire, optimisation de l'occupation de l'espace aérien.

Pour la structure (qui inclut l'ensemble constitué par la cellule et tous ses systèmes et équipements), il s'agit de trouver un équilibre optimum entre les forces qui s'exercent sur elle en réduisant le poids (allègement des structures, introduction de nouveaux matériaux métalliques, plastiques ou composites), en augmentant la portance pour certaines phases du vol, en réduisant la traînée et en améliorant l'utilisation de la poussée des moteurs par des installations innovantes. On doit également noter que l'optimisation de la masse de l'aéronef passe aussi par celle de l'ensemble de ses équipements et de ses systèmes.

Les turboréacteurs à double flux (figure 2.2) qui équipent la plupart des avions de ligne modernes sont apparus dans les années 1960. Comme tout moteur thermique, ils transforment l'énergie chimique contenue dans le carburant en une énergie mécanique propulsive. Le flux d'air « primaire » fortement comprimé et chauffé au travers du (ou des) compresseur(s), puis de la (ou des) chambre(s) de combustion, transforme l'énergie de la combustion en énergie mécanique grâce à la (ou aux) turbine(s) et à l'arbre (aux arbres). Cette énergie est ensuite utilisée pour comprimer le flux « secondaire », froid, pour créer l'essentiel de la poussée. Dans les turboréacteurs avec soufflantes, on ajoute un étage de diamètre bien supérieur au compresseur BP à l'avant de celui-ci. Cela permet d'obtenir du flux secondaire une poussée maximale. Un des paramètres essentiels d'optimisation de ce type de moteur est le taux de dilution, qui est le rapport du débit du flux secondaire au débit du flux primaire. Son optimisation va nécessiter de maîtriser l'aérodynamique des différents étages et leur interaction, mais aussi la combustion, la tenue mécanique de pièces soumises à des contraintes thermomécaniques extrêmes, tout cela en assurant fiabilité, sécurité, fabricabilité et capacité à une maintenance compatible avec les délais et les coûts objectifs.

Les équipements et les systèmes devront être encore plus légers et efficaces. De nombreux projets sont déjà en cours pour remplacer les vecteurs énergétiques classiques : air comprimé et fluides hydrauliques par le courant électrique afin d'obtenir une diminution significative de la consommation en carburant. C'est aussi l'occasion de mettre plus « d'intelligence » dans les équipements eux-mêmes,

en permettant par exemple leur monitoring et leur pilotage fin in situ. Ce qui aura un effet direct sur la consommation, la masse et la fiabilité des équipements. Notons enfin que de nouveaux systèmes sont en cours de développement, qui viseront à assurer le déplacement au sol des avions sans avoir recours aux moteurs principaux. Ces systèmes (Electric Green Taxiing System, e-GTS) permettront des gains importants de consommation de carburant, mais contribueront aussi à la réduction du bruit sur le tarmac.

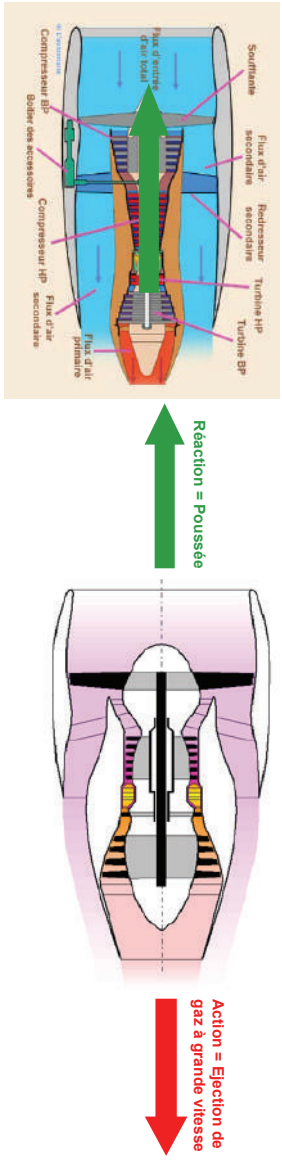


Figure 2.2. – Principe du turboréacteur à double flux équipé d'une soufflante [9].

Une approche toujours plus intégrée, très en amont, dans les travaux de recherche et développement de l'ensemble des acteurs permettra, en optimisant les compromis techniques nécessaires, de réduire l'impact environnemental des avions tout en protégeant l'économie de ce secteur structurant.

2.2.4. Domaines clés de recherche et innovation

L'atteinte des objectifs à moyen et long termes que le domaine transverse aéronautique et spatial s'est fixé en relation avec les enjeux économiques, environnementaux et sociétaux impose une mobilisation de l'ensemble de la communauté mécanicienne. En effet, les enjeux touchent tous les domaines depuis les matériaux (souvent le premier verrou technologique), au développement de concepts innovants permettant d'optimiser l'aérodynamique ou le design (au sens mécanicien du terme) des structures et des équipements à des fins de performances mécaniques ou acoustiques ou l'utilisation de nouvelles sources d'énergie, en passant par les aspects liés à l'ensemble du cycle de vie du produit (figure 2.3).

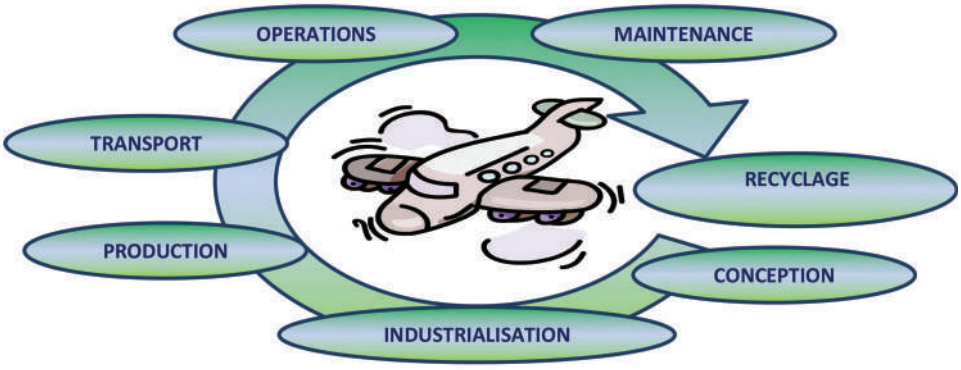


FIGURE 2.3. – Cycle de vie d'un produit.

Dans le domaine des matériaux, il va sans dire que de disposer de matériaux ayant des caractéristiques spécifiques (masse) optimales (mécaniques, thermiques, thermomécaniques, tribologiques, résistance aux chocs, corrosion, usure, compatibilités chimiques, etc.) est un « *must* ». Mais la compréhension et la modélisation de leurs comportement et mode de ruine sont aussi indispensables pour permettre avec le moins d'essais possible de concevoir les systèmes en amont, puis de les justifier dans le cadre de leur certification. Il est donc important que très en amont, un effort particulier soit fait pour comprendre et modéliser leur comportement et leur mode de ruine sous sollicitations complexes et sévères. La capacité à prévoir très en amont le comportement mécanique et thermomécanique en relation avec le milieu dans lequel fonctionne le matériel considéré et/ou des moyens de mise en œuvre envisagés est capitale.

Dans le domaine de la modélisation (mécanique, thermomécanique, fluide…), les enjeux économiques sont énormes. Disposer de modèles prédictifs corrélés dans

des domaines de validité connus et bien tracés (e.g. hautes températures, grandes vitesses de déformation, fatigue, vibrations, milieux corrosifs) est indispensable. Il faut néanmoins que les modèles mis en œuvre soient accessibles en termes de coûts et de moyens. Il faudra donc continuer à faire des efforts pour développer des outils numériques capables de s'adapter à la taille des projets et aux phases considérées (pré-développements, certification, revue de concept – PDR –, revue de figeage de concept – CDR –…). Mais au-delà des phases de conception, ces outils pourront être utilisés comme des outils de capitalisation de l'expérience des entreprises en les connectant à des outils de description des méthodes (guides ou chaînes de conception) ou en les liant aux résultats des essais avec lesquels ils auront été corrélés.

Dans le domaine des essais, il faut mettre en place des filières capables de développer et de maîtriser des moyens innovants qui permettront de disposer des éléments de corrélation et de preuves pour soutenir les justifications nécessaires à la certification des aéronefs, ou à la qualification des lanceurs et de leurs systèmes. Le développement de capteurs et des moyens associés de traitement des données ou des signaux pourrait également permettre de continuer à mettre plus « d'intelligence » au plus près de la fonction, et ainsi d'accéder à un monitoring approprié dont l'impact sur le « sur »dimensionnement inhérent à la nécessité de disposer de spectre de chargement générique pourrait être déterminant. On peut imaginer de même l'utilisation de capteurs capables d'optimiser une fonction de façon autonome. Cela pourrait permettre une réduction de consommation, de bruit ou de l'environnement induit sur la charge utile. Le développement de la mécatronique en milieu sévère est nécessaire pour soutenir ces innovations. En effet, il est important de rappeler qu'une des caractéristiques du secteur transverse aéronautique et spatial concerne les conditions extrêmes dans lesquelles doivent opérer régulièrement, voire en permanence, nos systèmes. En particulier, les conditions vibratoires, thermiques ou hydriques.

Dans le domaine de l'actuation, le passage de l'air comprimé ou de l'hydraulique vers le plus/tout électrique impose des sauts technologiques sans lesquels le poids et la consommation rendront impossible l'introduction de « l'avion tout électrique ». La communauté électromécanicienne doit se mobiliser en interaction très étroite avec les communautés électrotechnicienne, électronicienne et mécatronicienne pour mettre à disposition des équipementiers des systèmes puissants, légers et intelligents qui amélioreront la performance de leurs produits. Les micro- et nanotechnologies doivent faire l'objet d'une attention particulière afin d'atteindre les performances attendues. Attention ! Il ne faut surtout pas que les communautés hydrauliciennes ou celles en relation avec l'air comprimé se démobilisent car les avions produits actuellement sont tous équipés de systèmes hydrauliques et pneumatiques, et voleront tous encore dans 30 à 40 ans. Il est donc important que ces produits puissent continuer à évoluer dans le cadre d'une innovation incrémentale pilotée.

Dans le domaine de la production et de l'ingénierie concourante, rien ne sert d'avoir fait une prouesse sur un ou des prototypes si, en parallèle, l'industrialisation n'a pas été préparée ni les schémas de production capables des performances de coûts et de qualité requis mis en place. Il est nécessaire de continuer à faire des efforts dans les différents domaines techniques de la production en parallèle des développements des nouveaux matériaux et des nouveaux concepts. Pour bien

concevoir, nous avons besoin, très en amont, de développer les nouveaux concepts d'usinage, de formage, d'assemblage, de contrôle… pour disposer lors des phases de design et de dimensionnement des capacités, des coûts caractéristiques et des limites de chacune des techniques. Il est important de mettre en place les outils et les pratiques qui permettront de faire évoluer l'interface entre les concepteurs et les producteurs (ingénierie concourante) et ainsi concevoir dès le début des produits dont le coût de production cible et la fabricabilité sont bien projetés.

La communauté mécanicienne, dans son acception la plus large, est indispensable à la poursuite du développement du domaine aéronautique et spatial ; nous en avons parlé tout au long de cet article. Mais elle doit continuer à coordonner ses efforts avec d'autres communautés indispensables : certaines semblent évidentes ou naturelles – comme celles des thermiciens ou des essais –, là où d'autres doivent le devenir – la production, l'électronique, l'électrotechnique, la mécatronique… Cela permettra de proposer les produits innovants, performants, fiables qu'attendent nos clients et à notre industrie de garder son rang mondial.

2.2.5. Bibliographie

[1] « Aéronautique, espace et environnement », GIFAS (Groupement des industries françaises aéronautiques et spatiales), brochure environnement.
[2] « Pourquoi le transport aérien a de beaux jours devant lui », Bruno Trévidic, *Les Échos*, 20 juin 2013.
[3] « Indicateur du trafic aérien mondial », Pierre Spacaro, traficaerien.canalblog.com, 12 décembre 2012.
[4] « Sur les perspectives d'évolution de l'aviation civile à l'horizon 2040 : préserver l'avance de la France et de l'Europe », rapport du Sénat 12-658, 15 septembre 2013.
[5] « Airbus optimiste pour l'essor du trafic aérien », Florentin Collomp, *Le Figaro*, 4 septembre 2012.
[6] IATA communiqué n° 25, 1er mai 2013.
[7] « IATA : trafic mondial en hausse de 5,9 % en mars », www.air-Journal.fr.
[8] « Quel avenir pour l'industrie aéronautique et spatiale européenne ? », dossier n° 36 de l'Académie de l'air et de l'espace, 2013.
[9] http://www.lavionnaire.fr/MotorTurboReact.php.
[10] ASD-Eurospace, *Facts & Figures*, 16th Edition, June 2012.
[11] ASD-Eurospace, "State of the European Space Industry", Web Release, June 2013.

2.3. L'énergie

Le vaste champ des consommations d'énergie et des formes, très diverses, de production d'énergie est l'un des champs privilégiés de la mécanique, dans nombre de ses dimensions : mécanique des mouvements, mécanique des solides et des structures, mécanique des fluides, matériaux, souvent en interaction avec les grandes disciplines que sont la chimie (voir le rôle considérable de la combustion

dans les procédés de production d'énergie) et la physique, au sens classique du terme, une acception selon laquelle on oublie souvent que la mécanique est une branche de la physique – la première d'ailleurs où l'on a fait du quantitatif – en y intégrant l'astronomie.

On peut considérer l'ensemble des secteurs de production, de diffusion et d'usage de l'énergie en faisant référence au « bouquet énergétique » et en distinguant les énergies fossiles, l'énergie nucléaire qui, quelles qu'en soient les évolutions, relève d'une analyse particulière, les énergies renouvelables traditionnelles et toutes les formes d'énergie renouvelable qui sont actuellement en plein développement relatif.

2.3.1. Les énergies fossiles

Les plus anciens combustibles fossiles **– la tourbe, le lignite et, bien sûr, le charbon –** ne voient pas actuellement leur évolution marquée par des innovations techniques majeures. Ce qui ne signifie pas que, comme toutes les technologies matures, ils ne connaissent pas de progrès. L'une des solutions – souvent évoquée, peu mise en œuvre – consisterait, par exemple, à développer des exploitations « in situ », pour des productions de méthane, en utilisant des puits pour accéder aux gisements, au sein même desquels se développeraient les réactions de transformation. Un tel « rêve » présenterait l'intérêt de permettre le traitement de gisements profonds et souvent d'épargner des vies humaines (le charbon est considéré comme la plus « meurtrière » des sources d'énergie).

2.3.2. La filière Oil and Gas

2.3.2.1. Importance macroéconomique du secteur

L'industrie parapétrolière et paragazière regroupe l'ensemble des sociétés de services pétroliers et gaziers qui réalisent les travaux d'étude et de construction nécessaires à l'exploitation des gisements d'hydrocarbures pour le compte des compagnies. L'expertise de ces sociétés couvre tout le champ de la filière hydrocarbures (exploration, production, développement, logistique, raffinage, distribution) avec des activités très diverses allant de la réalisation d'études sismiques à la construction de plates-formes, d'unités de raffinage ou de traitement de gaz, en passant par la conception et la mise au point d'équipements spécifiques.

Le chiffre d'affaires total pour 2012 est estimé à 35 milliards d'euros générés depuis la France par environ 400 sociétés. La part prise par les travaux en mer a atteint environ 40 % du montant global estimé. L'effectif total du secteur est estimé à 60 000 personnes en France (hors secteurs de la distribution et du commerce).

Environ 350 PME réalisant un CA inférieur à 200 millions d'euros contribuent activement au chiffre d'affaires global pour près de 7 milliards d'euros (18 %), tandis que 35 sociétés de plus de 200 millions d'euros de CA se partagent le solde, soit 28 milliards d'euros (82 %).

L'activité parapétrolière est l'activité unique ou majoritaire de près de 200 entreprises, la moitié restante offrant également des services à d'autres industries.

L'implantation des sièges sociaux sur le territoire national privilégie l'Île-de-France mais s'avère notable dans les régions Rhône-Alpes et Provence – Alpes – Côte d'Azur. Tournées vers l'exportation, les principales entreprises françaises sont présentes ou représentées dans 70 pays étrangers. Leur expertise est internationalement reconnue.

Selon une enquête réalisée en 2013 par le GEP-AFTP auprès d'une centaine d'entreprises, la part à l'exportation du chiffre d'affaires parapétrolier est en moyenne de 56 % pour l'ensemble de l'échantillon, mais atteint plus de 70 % dans le cas de grands groupes dont le chiffre d'affaires total est supérieur à 200 millions d'euros.

La majorité des entreprises anticipaient pour 2013 une hausse du chiffre d'affaires parapétrolier ainsi que de la part à l'exportation. En termes d'emploi, 68 % des entreprises interrogées ont recruté un total de plus de 2 000 personnes en 2012 et 65 % avaient l'intention de recruter de nouveau en 2013. **Toutefois, 63 % éprouvaient des difficultés à trouver des candidats répondant à leurs besoins.**

L'effort en matière de recherche et développement est soutenu puisque 27 % des sociétés interrogées, en particulier les PME/PMI, affirmaient dépenser plus de 5 % de leur chiffre d'affaires à ce poste.

Les tendances dégagées par l'enquête donnent l'image d'un secteur industriel dynamique dont l'activité est en croissance. La filière parapétrolière et paragazière française est donc constituée de quelques grands ensembliers de renommée internationale et d'un grand nombre de PME/PMI. Ces dernières concourent à apporter des solutions innovantes sur la base d'un important effort de R&D.

2.3.2.2. Tendances, enjeux et défis du secteur à l'horizon 2020

Les principaux enjeux et les objectifs du secteur à l'horizon 2020 sont :

- baisser les coûts d'exploration et de production ;
- améliorer les technologies existantes et développer de nouvelles technologies.

Les sujets principaux de ces enjeux sont :

- ✓ les sables bitumineux, huiles et gaz non conventionnels ;
- ✓ les fluides complexes : gaz acides, HP/HT ($T > 180$ °C, $P \geq 2\,000$ bar), huiles visqueuses ;
- ✓ la récupération assistée (EOR) ;
- ✓ les grandes profondeurs d'eau (entre 300 et 4 000 m) ;
- ✓ les zones arctiques.

Les deux derniers items constituent les plus grands défis du secteur.

Au début des années 2000, les dépenses pour le « *deep offshore* » s'élevaient à 7 milliards de dollars. Le marché a énormément progressé pour atteindre un niveau de plus de 30 milliards de dollars en 2008. Après la crise financière, les opérateurs ont réduit leurs investissements. Depuis 2011, la croissance est retrouvée ; c'est ainsi qu'en 2014, la dépense d'investissements est estimée à 45 milliards de dollars. Suivant les opérateurs, les dépenses devraient croître à un taux annuel de 15 % pour atteindre 115 milliards de dollars en 2020.

2.3.2.3. Attentes vis-à-vis des partenaires-fournisseurs équipementiers-ensembliers

La filière parapétrolière et paragazière est très vaste et en constante nécessité d'innovation. Les besoins sont donc importants dans des domaines variés comme : l'exploration et la production, la sécurité, le transport et le stockage, sans oublier l'environnement et le « *local content* », c'est-à-dire la volonté des pays d'employer du personnel et de fabriquer localement.

2.3.2.4. Domaines clés de recherche et innovation

Au sein du GEP-AFTP, il existe un programme de financement de projets de R&D financés par des sponsors privés : Total, GDF Suez, Technip, Saipem, Subsea 7, DORIS, CGG, Entrepose, Schlumberger et Geoservices. Ces sponsors proposent des pistes de recherche et d'innovation dans le domaine de l'exploration de production des hydrocarbures, et à destination de PME et sociétés innovantes.

Ces sponsors ont présenté des sujets tels que :

- ✓ fluides complexes ;
- ✓ matériaux de tout type : polymères, métaux, ciments, performants en conditions extrêmes ;
- ✓ nouveaux capteurs et leur électronique associée dans des conditions extrêmes ;
- ✓ robotisation, automatisation ;
- ✓ ergonomie opérateur, *virtual training* ;
- ✓ gestion de gros volumes de données ;
- ✓ connaissance des réservoirs pétroliers ;
- ✓ forage/production : détection des puits proches, analyse de la boue, et gestion des eaux de production ;
- ✓ forage/production en offshore très profond : déploiement des conduites au fond de la mer, nouveaux risers, équipements au fond, traitement des effluents ;
- ✓ GNL (gaz naturel liquéfié) offshore : pipes cryogéniques, transport, stockage ;
- ✓ environnement : traitement des fuites de pétrole accidentelles, effet des émissions acoustiques sur le milieu marin.

Reste à considérer le domaine actuellement très discuté des **gaz de schiste**. Au-delà des débats, en France, sur l'existence de réserves importantes et sur la gestion des eaux usées lorsque la fracturation des sols est faite en ayant recours à l'eau, les principaux problèmes mécaniques sont liés aux conditions de réalisation d'un réseau de fissures efficace, à sa tenue en fonction du temps… Les réflexions sur des agents de fracturation autres que l'eau sont en cours, aux frontières de la chimie et de la mécanique.

2.3.3. L'énergie nucléaire

La production d'énergie, presque exclusivement sous forme d'électricité, par voie nucléaire, a commencé en 1957. Après un développement régulier et relativement important, s'appuyant sur plusieurs types de réacteurs, la situation s'est stabilisée autour de **modèles à eau légère**. La production d'électricité dans le monde, antérieurement à la catastrophe de Fukushima, marque le pas. Dans ce domaine, on distingue bien trois catégories de composants : ceux qui relèvent du « consommable », comme le combustible, ceux qui sont remplaçables, à l'occasion par exemple de visites techniques, et ceux qui ne sont pas remplaçables, au premier rang desquels figure bien sûr la cuve.

2.3.3.1. La construction nucléaire

On ne traite dans cet article que le nucléaire civil. Sont couverts non seulement la construction, mais aussi l'exploitation et la maintenance.

2.3.3.1.1. Importance macroéconomique du secteur

Le secteur de l'énergie nucléaire est très développé en France ; il est l'un des premiers dans le monde.

Sans parler de la partie militaire, la partie civile comporte principalement :

1. l'exploitation par EDF de 56 réacteurs qui assurent près de 80 % de la production française d'électricité ;
2. une industrie complète, avec :
   - pour les réacteurs, la conception et la construction de réacteurs électrogènes et l'ensemble des composants et matériaux spéciaux,
   - pour le combustible, un cycle passant par la mine, la fabrication du combustible et son retraitement ;
3. un domaine de la recherche très développé, avec des installations au premier rang mondial.

La France exporte des réacteurs depuis près de trente ans et, désormais, les industries de premier rang ainsi que leurs sous-traitants sont reconnus et exportent aussi leurs produits et savoir-faire.

Le nucléaire représente :

– 125 000 emplois directs, soit 4 % de l'emploi industriel en France ;
– 410 000 emplois totaux (directs, indirects, induits), soit 2 % de l'emploi en France ;
– trois fois plus d'emplois créés en France pour chaque euro investi que les autres filières de production d'électricité ;
– une valeur ajoutée totale de 33 milliards d'euros en France, soit une contribution totale équivalente à 2 % du PIB français.

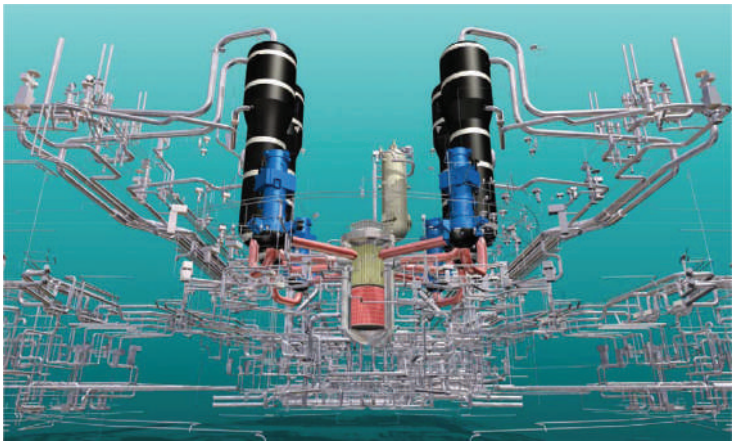


Figure 2.4. – Image numérique des circuits primaire et secondaire et des auxiliaires de l'EPR.

2.3.3.1.2. Tendances, enjeux et défis du secteur à l'horizon 2020

La production d'électricité restera majoritairement nucléaire en France car les alternatives (éoliennes, solaires) ne pourront pas à cet horizon être installées à un niveau suffisant de capacité et à un coût d'installation compétitif.

Dans le monde, de nombreux pays s'appuient sur le nucléaire, ce qui donne des opportunités très importantes pour les industries françaises.

Des chantiers de nouveaux réacteurs existent actuellement en France, en Finlande, en Chine, aux États-Unis et au Brésil. On attend prochainement la construction de nouveaux réacteurs anglais.

Il apparaît que les gaz de schiste deviennent le concurrent le plus sévère au nucléaire.

Si l'on peut dire que les États-Unis ont perdu leur statut de leader mondial, qui maintenant peut être revendiqué par la France, on peut supposer que dans une génération, la Chine sera devant nous si elle continue au rythme actuel. C'est un enjeu stratégique de se positionner par rapport à ce grand pays.

2.3.3.1.3. Attentes vis-à-vis des partenaires-fournisseurs équipementiers-ensembliers

Les clients sont les « *utilities* », producteurs d'électricité exploitants nucléaires. En France, il s'agit d'EDF.

AREVA est le constructeur européen de centrales (basé en France, filiales en Allemagne et aux États-Unis).

S'il est vrai qu'EDF et AREVA sont les acteurs majeurs de la filière, le volume des études ou fabrications sous-traitées est très important. L'enjeu est, tant en France que dans les autres pays du monde, de **retrouver des fournisseurs qualifiés**. La construction nucléaire a été ralentie pendant deux décennies. Certes, on peut se réjouir d'un regain de nouveaux projets, mais il est difficile de retrouver tout

le tissu industriel et la « culture » de qualité nucléaire. Alors que les petites sociétés cherchaient d'autres débouchés, on a observé dans le même temps un durcissement progressif des règles imposées par les autorités de sûreté, qui risquent d'éloigner de plus en plus les fabrications nucléaires des fabrications courantes de l'industrie. Il y a donc un double défi :

- ne pas différencier inutilement les niveaux d'exigences nucléaires du reste de l'industrie,
- recréer des compétences « nucléaires » dans l'industrie dans son ensemble.

Ce sont des défis mondiaux et si les entreprises françaises les surmontent, elles pourront prétendre aux marchés exports.

2.3.3.1.4. Domaines clés de recherche et innovation

La mécanique est présente dans les domaines suivants :

- mécanique des fluides :
  - o simple phase,
  - o couplage avec les réactions neutroniques,
  - o couplage avec le comportement des systèmes ;
- échanges de chaleur et « thermo-hydraulique » :
  - o double phase (par exemple eau-vapeur) ;
- dynamique :
  - o séisme,
  - o simulation d'accidents (graves),
  - o chute d'avion,
  - o vibrations ;
- thermomécanique :
  - o comportement non linéaire,
  - o endommagement (fatigue) ;
- rupture ;
- effets de vieillissement des matériaux :
  - o irradiation,
  - o corrosion,
  - o usure ;
- simulation multi-physique :
  - o interactions fluides/structures ;
- procédés de fabrication : interaction mécanique/métallurgie :
  - o solidification des lingots,
  - o forgeage,

- soudage,
- usinage,
- traitements thermiques ;

- « vieillissement » en service (effets décrits ci-dessus).

Les problèmes sont abordés par simulation et essais dans des centres dédiés, principalement au CEA, chez EDF et chez AREVA.

Les logiciels utilisés sont soit des logiciels « généraux » du commerce (éléments finis, mécanique des fluides par exemple), français ou non (la France occupant le premier rang mondial), soit des logiciels « spécialisés » spécifiques de la filière nucléaire, dont là encore, la France est leader mondial. On constate que les logiciels commerciaux prennent progressivement de l'importance dans des domaines non exclusivement nucléaires : ayant une base de marché plus grande, ils peuvent se développer avec des équipes conséquentes. L'effort pour les logiciels spécialisés, qui était très important dans les années 1980, se réduit mondialement. Cependant, en France, il demeure très significatif dans notre décennie. La Corée apparaît dans ce domaine, mais pas la Chine.

On n'oubliera pas les idées de développement de ce que l'on appelle la génération IV, surgénératrice, pour laquelle le problème principal est lié, pour l'instant, à l'utilisation du sodium, un problème qui n'est pas seulement mécanique.

En ce qui concerne le futur, relativement lointain, ce n'est pas avant la fin de la seconde moitié de ce siècle que la **fusion contrôlée** pourrait, peut-être, apporter sa contribution à la demande en énergie. Sur ce thème, de nombreux problèmes de physique se posent, mais l'essentiel se situe au niveau des matériaux, qui doivent pouvoir résister à l'érosion du plasma et aux flux de neutrons. Parmi les deux solutions possibles, c'est la voie par confinement magnétique qui mobilise actuellement les chercheurs (différents tokamaks, le JET, ITER…).

2.3.4. Les énergies renouvelables traditionnelles

Il ne faut pas perdre de vue que les énergies renouvelables furent les premières formes d'énergie utilisées, dans le but de produire du feu, puis, via divers processus, de l'électricité. Dans certaines zones, où la consommation d'énergie par habitant est modeste, la part des énergies renouvelables dans le bouquet énergétique est encore très importante, voire majoritaire. C'est le cas, par exemple, du continent africain dans son ensemble où, en moyenne, la part des énergies renouvelables avoisine les 75 % de toutes les formes d'énergie utilisées. Par ses liens historiques et culturels avec l'Afrique, la France peut jouer un rôle important dans l'évolution du mix énergétique sur ce continent.

L'hydraulique est la forme la plus anciennement utilisée, avec le feu et l'énergie éolienne, des énergies renouvelables. L'exploitation en France de cette forme d'énergie, « la houille blanche », a très tôt été fortement développée. Les problèmes mécaniques principaux de ce type de production restent liés aux barrages, avec, d'une part, des problèmes de sécurité liés tout particulièrement aux barrages-voûtes et à leur accroche sur les terrains encaissants, et, d'autre part, au vieillissement du parc, un problème de plus en plus rencontré actuellement.

Le second secteur d'importance est, bien entendu, celui de la biomasse, ou plus exactement **des biomasses.** Qu'il s'agisse de la récolte, du traitement (combustion, méthanisation…), de la transformation (les biocarburants par exemple), voire, demain, des démarches impliquant les microalgues, il y a dans ce secteur une croissance importante de produits nouveaux intéressants ou de procédés adaptés qui se développent, parfois très fortement, à une vitesse entraînant à l'évidence la participation d'industriels, relevant souvent du secteur mécanique, pas toujours de très grande taille, de manière importante (on peut prendre en exemple le développement des chaudières à gaz à condensation, ou celui spectaculaire des « *pellets* » pour divers poêles et chaudières).

2.3.5. Autres formes d'énergie renouvelable en pleine expansion

Les crises énergétiques, l'accroissement des populations, le souci de chacun d'un minimum vital ont constitué des facteurs stimulants, et ce depuis le choc pétrolier de 1973, mais plus encore avec les crises récentes, pour une très grande variété de sources d'énergie renouvelable, parfois assez inédites par rapport à ce qui se faisait il y a moins de dix ans.

Digne successeur d'une activité ancienne, celle des moulins à vent, **l'énergie éolienne** connaît depuis une dizaine d'années, partout dans le monde, un développement considérable. Actuellement, ce ne sont pas moins d'une trentaine de firmes industrielles qui produisent, de par le monde, les éoliennes « standard », d'une puissance de 2 à 5 MW en moyenne. Des projets de plus grande puissance, jusqu'à 8 MW, sont en cours et, qu'il s'agisse des machines elles-mêmes, de l'amélioration de leur rendement, de leur mise en place ou de leur interaction avec les courants d'air locaux, les sujets de réflexion et de recherche ne manquent pas. Fin 2013, la puissance totale des éoliennes en fonction était, dans le monde, d'un peu plus de 300 GW, ce qui, en prenant en compte un taux de charge de 25 % en moyenne, correspond à près d'une centaine de « tranches », nucléaires ou à charbon, de 1 000 MW environ (avec un taux de charge de 80 %). Le taux de croissance annuel est nettement « à deux chiffres ».

On peut évoquer ici, car c'est bien souvent avec l'éolien qu'on les évoque, avec ses intermittences naturelles, les problèmes et techniques de stockage de l'énergie, de l'électricité en particulier. En dehors des stockages gravitaires qui impliquent l'existence de deux « réservoirs » d'eau à des altitudes différentes, ce qui correspond à des géographies particulières (la Suisse est bien évidemment un bon exemple pour la mise en œuvre, effective, de cette technique), d'autres techniques de stockage sont à l'étude, comme dans le domaine du photovoltaïque. Nous y reviendrons. Le problème de la gestion fine des réseaux, compte tenu du développement des sources intermittentes, avec la problématique dite des « *smart grids* », est important mais ne relève que très partiellement des compétences des industries mécaniques.

S'agissant de l'usage potentiel des éléments naturels pour la production d'électricité, on doit noter le développement de nombreux projets d'exploitation des **courants marins, des marées, de la houle…** Le développement des **hydroliennes** est un

champ actuellement en plein essor. Sur tous ces sujets, la mécanique en général, qu'il s'agisse de l'étude des systèmes ou des matériaux, est bien sûr mise à contribution.

C'est aussi le cas pour ce que l'on appelle la « **thermodynamique solaire** » ou le « **solaire à concentration** », pour lesquels divers dispositifs (champs de miroirs cylindro-paraboliques, tours à concentration, miroirs paraboliques, miroirs de Fresnel) sont testés un peu partout dans le monde, en grandeur nature. Il existe des installations fonctionnant depuis plus de vingt ans, avec des productions de l'ordre de la centaine de mégawatts ; toutes sont structurées de manière à stocker de l'énergie, sous forme de sels fondus par exemple, permettant de compenser les périodes sans soleil, avec éventuellement le couplage avec des turbines à gaz.

Enfin, on ne saurait oublier les **systèmes photovoltaïques** qui, avec les « fermes éoliennes », constituent une source, non négligeable, de production électrique. Leur développement se fait actuellement à un rythme toujours plus important (une croissance également « à deux chiffres », comme pour l'éolien) : fin 2012, la puissance installée dans le monde était supérieure à 100 GW crête, soit avec un taux de charge moyen estimé à 12 % environ, l'équivalent d'une quinzaine de « tranches » de centrale nucléaire. Mais le photovoltaïque concerne peu les mécaniciens.

Les évolutions des modes de production de l'électricité, avec la montée en puissance de formes de plus en plus intermittentes, éoliennes et photovoltaïques en particulier, mettent l'accent sur des vecteurs d'énergie intermédiaires qui pourraient jouer un rôle tout à la fois dans le domaine du stockage de l'électricité et dans celui de l'usage direct de ces vecteurs énergétiques. C'est le cas, en particulier, de l'hydrogène.

Si l'emploi de l'hydrogène, comme fluide industriel, est courant depuis bien longtemps avec plusieurs centaines de kilomètres de « pipes » de par le monde, en Europe notamment, la mise au point de systèmes de stockage intégrés à des dispositifs de production d'électricité fait l'objet d'expériences et de projets pilotes variés. Au-delà de cette voie qui repose toujours sur une production solaire d'électricité, suivie d'une phase d'électrolyse de l'eau, les différents modes de stockage de l'hydrogène, en vue d'applications dans les transports, font et feront à court terme l'objet de nombreux travaux : il peut s'agir de stockage en masse sous forme liquide ou gazeuse, ou de stockage sous forme adsorbée, sur des solides divisés de compositions chimiques variées.

2.3.6. Des politiques d'économie d'énergie

Ont été évoquées ici les différentes formes de production d'énergie, en ne perdant pas de vue la vision « vecteurs énergétiques ». Il ne fait aucun doute que l'approche « consommation » plutôt que « production » se révélera féconde pour la mise en place du principal, les stratégies et tactiques au service d'une vision essentielle, la réduction des consommations d'énergie dans maints secteurs par l'utilisation rationnelle de cette énergie.

Le secteur de l'énergie est, avec la gestion de l'eau et des matières premières (y compris la gestion des déchets), l'un des grands problèmes des prochaines décennies, à l'échelle mondiale, auquel il convient d'adjoindre les activités relevant de l'informatique et de la communication, secteur qui demande une attention toute

particulière. La population mondiale a considérablement augmenté ces dernières décennies, sans que les inégalités soient pour autant significativement réduites.

Le secteur de l'énergie est donc bien un secteur où nombre des concepts qui ont fortement émergé ces dernières années vont prendre tout leur sens, dans le cadre de ce que l'on désigne parfois sous le nom de « transition énergétique » : **analyse des cycles de vie, écologie industrielle, généralisation des approches systémiques, écoconception…** Il est évident qu'il nécessitera des mécaniciens.

La mécanique française a permis au cours des siècles passés de fournir au pays l'énergie dont il avait besoin. Dans le futur, et aussi dans le contexte des débats actuels sur l'énergie, il est évident que les mécaniciens doivent encore jouer un rôle essentiel.

2.4. L'industrie ferroviaire

2.4.1. Importance macroéconomique du secteur

L'histoire du transport par chemin de fer remonte aux débuts de l'ère industrielle. L'essor de ce mode de transport se situe vers les années 1850 avec les tramways tirés d'abord par des chevaux à Londres, Berlin, Paris, Milan, et un boom ferroviaire à la même époque avec les locomotives à vapeur. Par ailleurs, c'est à la fin du XIX^{e} siècle que le métro est apparu à Londres, puis à Budapest et à Paris. Ce mode de transport a dominé pendant près d'un siècle avant d'être supplanté, depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, par le transport routier automobile.

Après la machine à vapeur, c'est la traction électrique et le moteur Diesel qui révolutionnent le moyen de propulsion, et c'est vers 1930 que les réseaux ferrés se généralisent en France. À partir des années 1980, les trains à très grande vitesse (Shinkansen au Japon, TGV en France, ICE en Allemagne) révolutionnent l'image de ce mode de transport qui reprend des parts de marché à l'aéronautique sur les distances inférieures à 1 000 km.

Aujourd'hui, le marché mondial du matériel ferroviaire roulant est estimé à 39,5 milliards d'euros et connaît actuellement une croissance annuelle moyenne de 3,2 %.

En France, ce secteur est constitué par environ 250 entreprises, dont une quarantaine d'équipementiers de rang 1 réalisant un chiffre d'affaires de l'ordre de plus de 4 milliards d'euros pour un effectif d'environ 16 000 salariés en France. Alstom Transport est l'ensemblier dominant et représente les 2/3 de l'effectif et du chiffre d'affaires du secteur. Le second ensemblier étant Bombardier Transport, avec environ 1 700 salariés en France. Les autres entreprises de ce secteur sont des équipementiers de premier rang, dont le principal est Faiveley Transport avec environ 1 000 salariés, des équipementiers de deuxième rang (comme Mersen à Amiens ou Stratiforme Industries à Bersée) et des sous-traitants.

Le domaine de l'infrastructure ferroviaire compte également quelques grandes entreprises françaises dans les domaines du génie civil, des équipements de voie, comme de la signalisation. Il représente un marché mondial de 45,7 milliards d'euros – de 4,4 milliards d'euros en France – pour 22 000 emplois.

Parmi les principaux acteurs européens, on peut citer : Thales ou Ansaldo STS pour le domaine de la signalisation, Egis Rail, Vossloh Cogifer, Tata Steel, Colas Rail ou encore Bouygues pour la construction de voies.

Les sociétés d'ingénierie comme Systra bénéficient d'une renommée mondiale pour la conception de systèmes complets de voie.

Les exploitants, bien que n'étant pas dans ce secteur industriel, tels que la SNCF ou la RATP, disposent de filiales, regroupant près de 100 000 salariés, qui participent au progrès du secteur par la réalisation de travaux de maintenance et de développement de l'infrastructure, et leurs services d'ingénierie.

La SNCF et le RFF sont également associés aux principaux industriels du secteur ferroviaire, dans l'institut de recherche technologique (IRT) Railenium, qui rassemble les meilleurs chercheurs français dans les domaines d'expertises liés au ferroviaire.

2.4.2. Tendances, enjeux et défis du secteur à l'horizon 2020

Le secteur est confronté à une double tendance.

- D'une part, un développement du transport de passager depuis l'avènement du TGV, qui devrait se poursuivre avec des trains allant encore plus vite, mais qui dépend essentiellement de la construction de nouvelles infrastructures par les États dans lesquels ces réseaux ferrés se développeront, les infrastructures existantes ne pouvant supporter des trains à grande vitesse. Également au niveau du transport de passagers, le renouvellement du transport urbain et régional, notamment les tramways, qui implique aussi des infrastructures spécifiques dont l'investissement dépend de la politique des agglomérations et régions.

Il est clair dans ce contexte que les enjeux, tant environnementaux que socio-économiques, renforcent l'attractivité du transport ferroviaire pour lequel les constructeurs, les exploitants du matériel roulant et les gestionnaires de l'infrastructure sont soumis à des contraintes de plus en plus sévères. Il faut aller plus vite, à des prix compétitifs, tout en assurant un confort aux usagers en minimisant autant que possible l'impact sur les riverains (bruit et vibrations).

- D'autre part, il s'agit de répondre aux enjeux sécuritaires ; en particulier, une partie du réseau ferroviaire est vieillissante, les coûts d'entretien et de réparation ne cessent d'augmenter, la fiabilité se dégrade. Pour minimiser ce processus à la fois coûteux et chronophage, tous les acteurs s'accordent à dire que la voie ferrée du futur doit faire l'objet d'une analyse *globale* prenant en compte l'ensemble des éléments qui la constituent et la sollicitent, depuis le véhicule jusqu'au sous-sol (Railway Track Sciences and Engineering – Ballast : Issues and Challenges, Paris, décembre 2013), tout en considérant qu'il faut développer en parallèle de nouveaux systèmes de surveillance et de détection des défauts, ainsi qu'une signalisation apportant une aide intelligente pour répondre à ces défis de sécurité.

Enfin, en ce qui concerne plus spécifiquement le fret ferroviaire, la construction de wagons de marchandises est en forte régression. Après un début de XXI^e siècle marqué par une forte demande de matériel pour faire face à la croissance économique ressentie dans toute l'Europe, le secteur s'est doté de fortes capacités de production qui ont, peu à peu, saturé la demande. Alors que le fret ferroviaire génère plus de trafics dans d'autres pays européens, il semble poursuivre son déclin en France.

Cependant, un enjeu majeur demeure sur le long terme afin de faire passer le transport de marchandises des routes au rail, dans le but de réduire les embouteillages sur les routes et les émissions de CO_2. Mais la libéralisation totale des services de fret ferroviaire début 2007 en Europe n'a pas encore conduit à des résultats marquants.

2.4.3. Attentes vis-à-vis des partenaires-fournisseurs équipementiers-ensembliers

Les principaux leviers d'innovation de ce secteur se situent dans la recherche d'une économie durable, les trains, métros, tramways apportant un mode de transport qui réduit l'impact environnemental du transport terrestre dans l'optique d'une optimisation de la gestion de l'énergie et d'une réduction de l'empreinte carbone. Mais il ne faut pas pour autant négliger les autres modes de transport et l'extension de la comodalité, qui sera une nécessité pour une attractivité et une accessibilité des transports, et devrait conduire au développement de nouveaux modèles socio-économiques de l'innovation.

Actuellement, les exploitants de ce secteur sont très exigeants sur la fiabilité et la qualité des matériels pour assurer la sécurité des personnes et des opérateurs, et imposent des cahiers des charges contraignants qui se basent sur des réglementations et des normes. Ce qui conduit à des coûts et des délais importants de mise sur le réseau freinant le développement de l'innovation.

Les partenaires et fournisseurs des constructeurs de matériels roulants et des infrastructures auront, dans ce contexte, à travailler plus étroitement ensemble pour répondre aux défis d'un secteur en plein renouveau, comme l'attestent les nombreux projets collaboratifs du pôle de compétitivité I-Trans. C'est cette volonté qui a permis la création de l'lRT Railenium.

2.4.4. Domaines clés de recherche et innovation

Comme dans les autres secteurs du transport, la recherche d'allègement est une préoccupation majeure, qui a pour objectifs de réduire la consommation d'énergie et l'impact en CO_2, mais aussi de diminuer la pénibilité des tâches des personnels qui manipulent des pièces parfois lourdes, comme par exemple un tendeur d'attelage. Il s'agit d'étudier des pièces mécaniques fabriquées dans des matériaux légers et résistants : composites, titane, mais aussi aciers à haute résistance en réduisant la matière utilisée tout en répondant aux exigences de sécurité.

En matière de sécurité, une gestion du trafic plus sûre implique des recherches sur des systèmes mécatroniques, ainsi que des systèmes de contrôle élaborés pour la surveillance et le suivi des défauts de la voie.

Les recherches sur les composants électriques et caténaires demeurent également une voie d'innovation si l'on veut des trains allant plus vite. Il s'agit par exemple de réduire l'encombrement par l'utilisation de composants d'électronique de puissance. Ou encore d'étudier des systèmes électriques réduisant la maintenance tout en augmentant la performance, venant remplacer des systèmes pneumatiques existants pour la fermeture des portes, le freinage…

Il faut aussi considérer que depuis l'avènement du train, les vitesses et charges par essieu n'ont cessé d'augmenter, sans pour autant que le système constitué du train et de son environnement ne fassent l'objet de beaucoup d'investigations. Les solutions d'origine n'ayant presque pas changé, alors que de nombreux accidents récents montrent que ce changement s'impose. Le développement de modèles numériques pour mieux appréhender le comportement du système global constitué de la voie et du train est en conséquence un axe de progrès dans un secteur dans lequel ce type d'approche n'a pas été suffisamment mis en œuvre.

De même, la nécessité d'optimiser les interconnexions entre les différents modes de transport implique le développement de modèles logistiques prenant en compte la plurimodalité et permettant de simuler les flux de passagers ou de fret, dans la double perspective de réduire les délais et d'augmenter le trafic.

L'IRT Railenium a ainsi identifié un certain nombre de thématiques de recherche qui couvrent l'ensemble des composants et systèmes de l'infrastructure, les interfaces avec le matériel roulant ainsi que les activités s'y rapportant :

- les différents types de voies et leurs composants ;
- la maîtrise et la modélisation des contacts roue/rail ;
- l'élaboration de réseaux de capteurs intelligents pour l'état de la voie et la surveillance des points critiques de l'infrastructure ;
- le recours aux matériaux issus de ressources renouvelables ;
- les leviers pour augmenter la capacité d'une ligne ferroviaire ;
- l'optimisation des opérations de maintenance et de chantier ;
- la durabilité de la voie et de sa plate-forme ;
- les systèmes de localisation des trains ;
- la mise au point de réseaux de communication à très haut débit utilisant la technologie laser ;
- les systèmes de signalisation ferroviaire et leur interopérabilité.

2.5. L'industrie navale et l'ingénierie maritime

2.5.1. Importance macroéconomique du secteur

La mer recouvre 72 % de la surface de la « planète Bleue », la Terre. Origine de la vie, elle influe de multiples façons sur notre existence. Climats et biodiversité sont, en particulier, fortement dépendants de la dynamique des océans.

Mais la mer représente également un enjeu économique majeur pour l'avenir du monde.

Les échanges commerciaux de la planète se font à plus de 80 % en volume par voie maritime grâce à 50 000 navires de haute mer qui sillonnent en permanence les océans. Le transport maritime, qui a plus que doublé au cours des vingt dernières années, croît proportionnellement au PIB mondial. On prévoit 30 % de croissance du transport de conteneurs d'ici à 2018. Pourtant, ce mode de transport ne génère que 3 % des émissions de CO_2 attribuées à l'ensemble des transports.

Plus de 95 % des communications téléphoniques intercontinentales, dont notamment les liaisons de données et Internet, passent par les réseaux de câbles sous-marins. La pose, la surveillance et l'entretien de ces réseaux nécessitent une flotte câblière d'une centaine d'unités réparties principalement entre quatre nations : les États-Unis, le Japon, la France et le Royaume-Uni.

Première source de protéines animales pour l'alimentation humaine, les océans fournissent annuellement 163 millions de tonnes de poissons (chiffre 2009 de la FAO), 55 % en provenance de la pêche et 45 % par aquaculture, une proportion en constante augmentation.

Les exploitations offshore produisent déjà plus de 30 % des hydrocarbures, pétrole et gaz, chiffre en croissance puisque l'on estime que les champs sous-marins pourraient représenter jusqu'à 90 % des réserves mondiales. Les réserves immergées de minerais, et notamment de métaux rares, sont estimées à plus de 200 fois les réserves terrestres connues.

Suivant certaines estimations, l'énergie de la mer, sous toutes ses formes – éolienne, hydrolienne, énergie des vagues, énergie thermique – pourrait produire annuellement 120 000 TWh d'électricité, soit l'équivalent de la consommation totale de l'humanité.

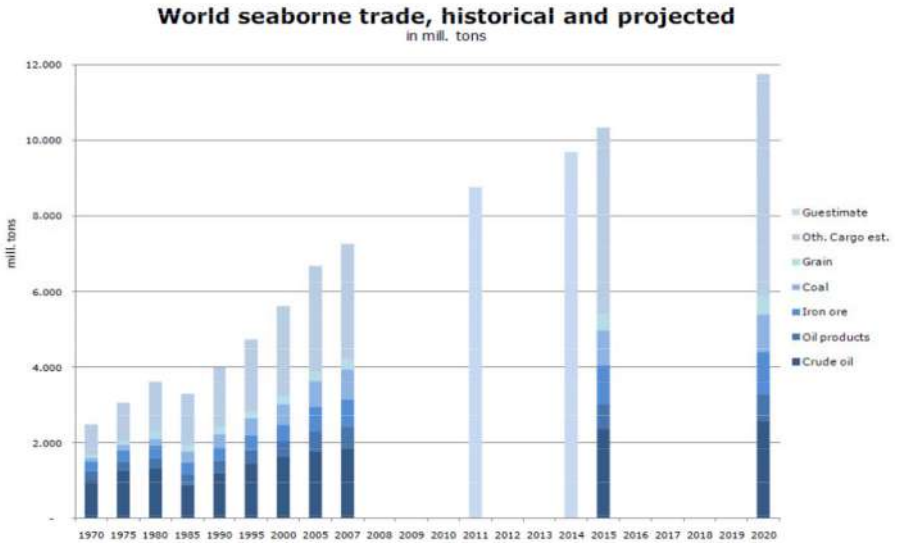


FIGURE 2.5. – Prévisions de croissance du trafic maritime. *Source :* CESA.

Figure 2.6. – Le réseau mondial de fibres optiques sous-marines (« Enjeux maritimes », *Le dessous des cartes*, Jean-Christophe Victor, Lépac, 2011).

L'économie maritime, sous ses différentes formes, pèse pour 1 500 milliards d'euros dans le PIB mondial, la moitié au titre de l'extraction d'hydrocarbures et de minerais, l'autre moitié au titre du transport et des activités halieutiques. En Europe, les industries et services liés à la mer, au sens large mais hors hydrocarbures et pêche, génèrent un chiffre d'affaires de 500 milliards d'euros et occupent 5,4 millions de personnes (rapport *Blue Growth* de la Commission européenne).

Plus de 3,2 milliards d'êtres humains vivent aujourd'hui en zone littorale. À l'horizon 2025, 75 % de la population mondiale se concentrera sur une bande côtière de moins de 80 km de large. Le besoin d'aménagement et d'exploitation d'installations offshore, pour la production d'énergie et de nourriture, pour la récupération et la transformation des matières premières issues des mers, pour la recherche biologique et pharmaceutique, pour les loisirs va donc croître de façon exponentielle.

Pour la France, qui possède le second plus grand domaine maritime au monde après les États-Unis avec 11 millions de km² de zone économique exclusive, le secteur maritime représente 300 000 emplois pour un chiffre d'affaires de 51 millions d'euros (Cluster maritime français).

L'importance croissante des activités maritimes pose de façon incontournable la question de leur régulation, de leur surveillance et de leur protection, dans un espace qui a été de tout temps considéré comme un espace de liberté échappant, pour l'essentiel, à toute souveraineté. Si la communauté internationale, à travers des organismes tels que l'OMI (Organisation Maritime Internationale) ou le Conseil de l'Arctique, établit progressivement les règles de vie commune, la défense des intérêts nationaux comme du droit international repose sur le déploiement de systèmes de surveillance et d'intervention armée. Le marché des navires militaires se monte à près de 40 milliards de dollars par an, dont environ une dizaine de milliards ouverts à la concurrence internationale. Ce marché de coopération militaire, incluant une forte proportion de transfert de technologie,

est aujourd'hui dominé par les constructeurs européens (essentiellement français, allemands, espagnols et italiens).

FIGURE 2.7. – Zone économique exclusive (ZEE) française (Cluster maritime français).

2.5.2. Tendances, enjeux et défis à l'horizon 2020

La croissance de l'industrie navale, si l'on s'en tient aux activités d'ingénierie, de construction et de maintenance d'engins maritimes et d'installations océaniques, accompagnera l'augmentation des besoins en matière de transport – fret et passagers –, de loisirs – le marché de la croisière a doublé entre 1999 et 2009 –, de production d'énergie et de matières premières. Elle continuera inévitablement à subir les aléas cycliques de l'économie mondiale et du prix des hydrocarbures, ainsi que, sur certains segments de marché, de la concurrence agressive de pays émergents à faibles coûts de revient. Le marché naval est un marché de demande où les produits sont réalisés à l'unité, ou en très petit nombre, sur les spécifications particulières de chaque client. Les effets de série sont très faibles et ne justifient donc pas les mouvements de concentration qui ont pu être observés ces dernières années dans d'autres secteurs, notamment l'aéronautique. Ainsi, l'Association européenne des industriels du naval (SEA Europe) compte-t-elle plus de 300 chantiers adhérents dont près d'une trentaine de chantiers majeurs.

C'est donc dans le domaine des produits complexes à hautes exigences de performances que se sont aujourd'hui spécialisés les principaux constructeurs navals européens et particulièrement français : navires militaires, navires à passagers, ingénierie offshore, grande plaisance. Dans ces domaines, la compétitivité repose principalement sur l'effort de R&D et la capacité d'innovation. Depuis quelques années, cette industrie mise également sur le développement de l'exploitation de l'énergie des mers (énergies marines renouvelables ou EMR). À plus long terme, l'exploitation et la transformation in situ, notamment à grande profondeur, des

autres immenses ressources marines pousseront inéluctablement l'industrie à concevoir et développer de nouvelles installations. Dans un environnement naturel agressif et dangereux, la tendance sera de plus en plus forte de confier à des engins télécommandés (*Remote Operated Vehicles* ou ROV) ou autonomes (drones) les tâches répétitives (surveillance par exemple), les plus risquées (interventions à grande profondeur, actions militaires) ou pénibles (station prolongée sous l'eau).

Créé en 2011, à la suite du Grenelle de la mer, le Conseil d'Orientation de la Recherche et de l'Innovation des Constructions et Activités Navales (CORICAN) a identifié les grands défis techniques d'avenir. Ces défis résultent de l'évolution règlementaire internationale autant que de nouvelles exigences sociétales, notamment en matière de développement durable. Quatre grands programmes ont ainsi été définis : la maîtrise de l'énergie, le respect de l'environnement, l'amélioration de la sécurité et l'automatisation.

Comme pour tous les modes de transport, les économies de carburant, associées à la réduction des émissions polluantes imposée par les règles OMI et les directives européennes, constituent un enjeu majeur. Ainsi, le plafond d'émissions de soufre sera réduit de 90 % à partir du 1er janvier 2015 en zones dites « d'émission contrôlée », et de moitié partout ailleurs dans les eaux européennes à partir de 2020. Les plafonds d'émission des oxydes d'azote sont également réduits. L'OMI recommande par ailleurs une réduction de 25 % des émissions de CO_2.

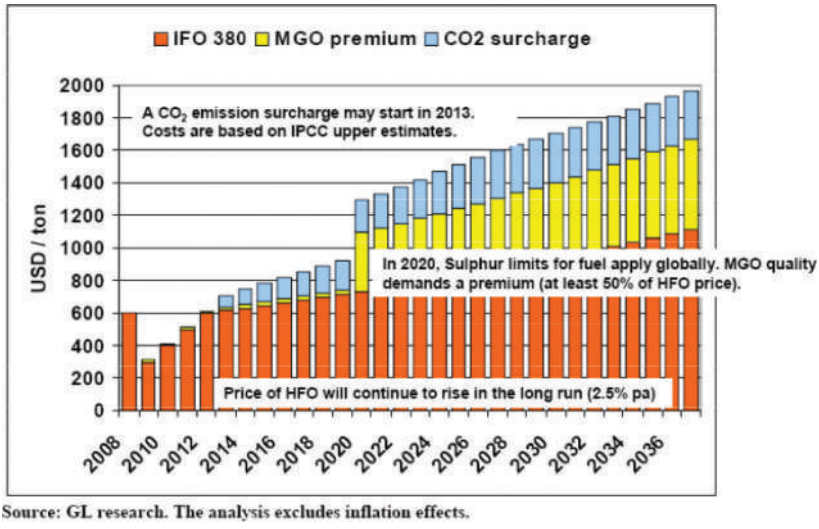


Figure 2.8. – Projection du coût du combustible en fonction des nouvelles règles environnementales. La moitié de l'augmentation du coût dans les vingt prochaines années est liée à la règlementation environnementale. *Source :* GL research. The analysis excludes inflation effects.

L'impact environnemental de l'activité maritime ne se limite pas aux émissions gazeuses. Sont également concernés les revêtements et peintures, essentiels pour protéger de la corrosion les structures métalliques ou réduire le frottement sur

les carènes, et qui sont soumis à la règlementation européenne REACH sur les produits chimiques. Quant à l'impact acoustique ou électromagnétique, étudié depuis plusieurs décennies pour les besoins militaires en raison de la formation de « signatures » indiscrètes, il est de plus en plus soumis à des limitations règlementaires pour réduire les perturbations causées à la biosphère marine.

L'océan est un milieu hostile et le travail en mer reste exposé aux dangers de cet environnement capricieux, isolé des moyens de secours rapides que l'on trouve généralement à terre (près de 2 600 pertes de vies humaines en mer en 2013). Suivant leur taille – les pêcheurs payent toujours un lourd tribut à leur activité – ou leurs caractéristiques – tous les ans, des naufrages de ferries, souvent surchargés, font des centaines de victimes –, les navires sont confrontés à différents types de risques : risques naturels ou « fortunes de mer », collision ou échouage, incendie, avarie résultant de l'état du navire ou de sa cargaison. En raison de l'intensité du trafic maritime en Manche/Mer du Nord, la France est un des pays les plus exposés aux catastrophes maritimes pour l'environnement.

La règlementation internationale, telle la convention SOLAS (*Safety of Life at Sea*), le renforcement de la surveillance du trafic maritime, notamment depuis la mise en service de l'AIS (*Automatic Identification System*), les normes de formation des gens de mer MLC (*Maritime Labour Convention*), l'amélioration des moyens de sauvetage en mer concourent à accroître la sécurité de l'activité maritime. Mais des progrès sont également attendus dans la conception des structures, en particulier en matière de stabilité et de tenue à la mer en conditions extrêmes ou exceptionnelles, de tenue à la fatigue, aux chocs, aux impacts, d'optimisation adaptative des conditions de navigation (cap, vitesse) aux conditions de mer, ce qui, dans tous les cas, exige une meilleure connaissance et, surtout, une capacité de prévision en temps réel de la houle de rencontre.

2.5.3. Attentes vis-à-vis des partenaires-fournisseurs équipementiers-ensembliers

Pour la première fois, sans doute, de façon aussi structurée, la démarche prospective engagée par le CORICAN est un travail de filière qui associe l'ensemble des acteurs. Les objectifs cités plus haut sont donc portés par les industriels intégrateurs, DCNS et STX France, aussi bien que par les équipementiers. Pour atteindre ces objectifs, de nombreuses démarches collaboratives se construisent dans le cadre, notamment, des pôles de compétitivité – pôles Mer et EMC2 –, du Programme d'investissements d'avenir – programme « Navire du futur », institut de recherche technologique Jules-Verne –, des programmes de recherche européens – exemple du programme AQUO sur l'impact acoustique du trafic maritime sur la faune marine.

L'amélioration de l'efficacité énergétique et la réduction des émissions polluantes passent, en grande partie, par l'amélioration des systèmes de production d'énergie et de propulsion. En particulier, le remplacement du gazole par le gaz naturel est un enjeu fort pour les motoristes comme pour les concepteurs de navires qui doivent imaginer les moyens sûrs de stockage à bord. Le recours, fût-il de façon auxiliaire, à d'autres sources d'énergie comme les piles à combustibles, l'énergie solaire ou éolienne, les batteries Li-Ion, est également visé.

L'automatisation de l'ensemble des fonctions à bord – navigation, conduite, commande des différentes installations, maintenance – est un enjeu de sécurité et de réduction des coûts d'exploitation. Elle passe par l'introduction massive de réseaux de capteurs et de technologies de l'information basées sur des algorithmes de traitement et d'aide à la décision de plus en plus élaborés. Le projet de « passerelle du futur » associe un nombre important d'équipementiers et de fournisseurs de la filière.

Le développement de technologies pour les engins autonomes telles que les communications sous-marines à haut débit, le stockage d'énergie, les algorithmes d'analyse en temps réel permettant de conférer aux drones une autonomie décisionnelle, les moyens mécaniques de lancement et récupération de ces engins, doit être poursuivi.

Enfin, les outils et procédés de production des structures, EMR, plates-formes ou navires doivent évoluer pour s'adapter aux objectifs de compétitivité : réduction des temps de fabrication et des taux de reprises, intégrations de nouveaux matériaux, notamment composites, réalisation de moyennes séries. L'amélioration de la sécurité en ateliers, sur les chantiers ou en mer doit aussi être prise en compte. Cela passera largement par la robotisation et l'informatisation des procédés dont l'étude est en cours dans le cadre du projet de « chantier du futur », l'un des volets du plan « usine du futur » de la nouvelle France industrielle.

Figure 2.9. – Engin sous marin autonome.

2.5.4. Domaines clés de recherche et d'innovation

Plus ancienne industrie au monde, la construction navale est aussi la première activité humaine à être passée, dans le courant du XVIII^{e} siècle, du stade d'artisanat empirique et héréditaire à celui d'industrie fondée sur des concepts et des outils scientifiques. Ces bases scientifiques, la mécanique des fluides et la résistance des matériaux principalement, connurent alors une révolution « copernicienne » grâce aux travaux théoriques des meilleurs esprits de l'époque. Les essais de maquettes, réalisés en 1775 par d'Alembert, Condorcet et l'abbé Bossut, préfigurent le développement de la similitude expérimentale, formalisée un siècle plus tard par Frédéric Reech et William Froude.

Longtemps, la conception des navires s'est fondée sur les essais de maquettes et des règles de dimensionnement largement issues de l'expérience. La nécessaire

réduction de la durée des phases de conception, l'optimisation des performances et la réduction des coûts qui passe par la réduction de marges de conception superflues contraignent aujourd'hui à développer de nouveaux outils de conception.

Les premiers progrès attendus concernent le domaine de l'hydrodynamique : résistance à l'avancement, prévision de houle et tenue à la mer, manœuvrabilité. Il est important, dans ce domaine, de développer les moyens de calcul numérique et d'en valider l'application de façon, à terme, à remplacer les expérimentations, ce que l'on appelle le « bassin numérique ». De plus, la simulation numérique, par l'efficacité des méthodes d'optimisation qu'elle autorise, permettra de tester et valider de nouveaux concepts de formes de carènes et d'appendices. Les codes de CFD actuels doivent être améliorés pour décrire encore plus finement les écoulements à dynamique rapide ou fortement turbulents. Ils doivent être étendus au couplage fluide/structure, notamment pour les simulations acoustiques ou l'optimisation des propulseurs. La recherche de revêtements réducteurs de frottements doit se poursuivre, ainsi que l'étude de propulseurs à hautes performances (rendement, bruit).

La simulation de la dynamique des structures, sollicitées par des chargements fortement variables dans l'espace et le temps, doit aussi progresser afin de mieux appréhender les comportements dangereux en instantané ou en fatigue. De plus en plus, ces simulations doivent être capables de représenter des structures complexes, multi-matériaux, métalliques et composites.

Dans le domaine des matériaux, la caractérisation en environnement de matériaux métalliques innovants (les applications du titane sont d'un intérêt particulier) doit se poursuivre dans le but d'alléger les structures, d'améliorer la tenue à la corrosion et à la fatigue, d'améliorer la productivité des procédés de formage (fonderie, métallurgie, formage à chaud, méthodes additives, technologie des poudres), d'usinage, d'assemblage (soudage, collage) et de contrôle (contrôle non destructif). La maîtrise de la qualité métallurgique des pièces finies passe également par un effort de simulation numérique des différents procédés mis en œuvre depuis la matière initiale.

Les modes d'initialisation de la corrosion, la simulation des endommagements et les dispositifs de protection – par revêtements ou par courant imposé – doivent continuer à être étudiés, notamment dans la perspective de limiter les coûts de maintenance de structures offshore fixes.

L'emploi de matériaux composites se développe dans la construction de superstructures et de structures internes (cloisons, planchers) dans les navires, et pour les pièces mobiles (pales) de propulseurs ou d'éoliennes et hydroliennes. La tenue de ces matériaux aux agressions – chocs, incendie – et au vieillissement doit être améliorée. Des systèmes de surveillance en continu de l'état de telles structures doivent également être envisagés, associés à des modèles de prédiction de durée de vie.

Les matériaux multifonctions, ou métamatériaux insèrent différents composants ou additifs, incluant des nanomatériaux, dans une matrice organique structurale pour remplir d'autres fonctions : émission/réception de signaux électromagnétiques, masquage acoustique, protection contre les incendies ou les rayonnements… Leur définition, leur caractérisation, les conditions et procédés de mise en œuvre restent largement à étudier.

Enfin, l'un des défis les plus complexes réside dans la transition rapide et sûre des innovations technologiques dans la conception et la construction des navires. Cela suppose un effort continu dans l'amélioration des outils de conception, basée sur la simulation numérique (le « navire virtuel », l'échange étendu de données et l'optimisation multiphysique et multiobjectifs).

Enfin, dans le domaine de la production, quantité de travaux sont initiés, mais sont loin d'avoir atteint le stade d'industrialisation, dans le domaine de la robotisation des procédés – la mécatronique – en environnement contraint, sur l'association Homme/robot – la cobotique –, dans l'utilisation industrielle de la réalité virtuelle avec simulation d'efforts – procédés haptiques – et de la réalité augmentée.

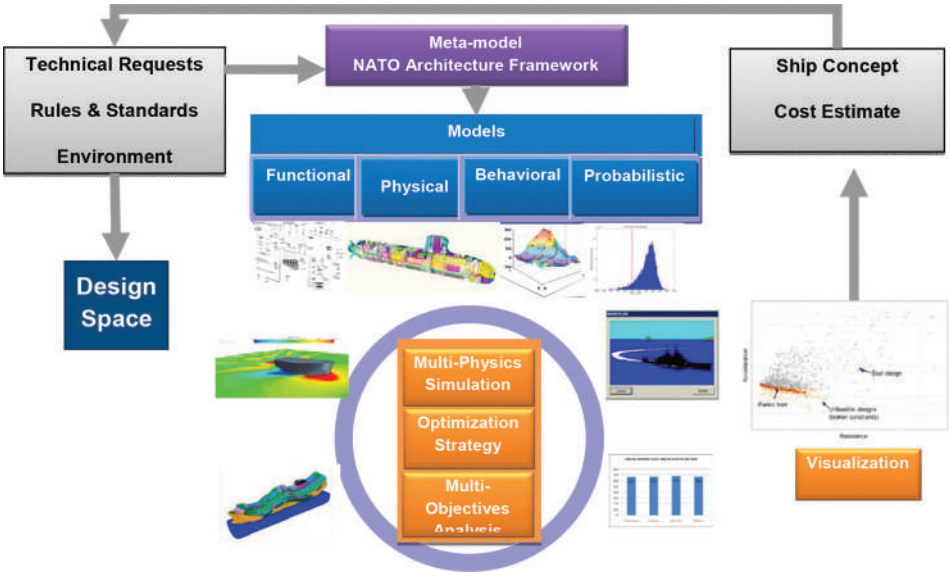


Figure 2.10. – Démarche de R&D en ingéniérie maritime.

2.6. L'industrie agroalimentaire

2.6.1. Importance macroéconomique du secteur

Le secteur des Industries Agro-Alimentaires (IAA) regroupe :

- en amont : les activités de transformation des matières premières agricoles en produits alimentaires intermédiaires ou finis, comestibles par les humains ou les animaux ;
- en aval : les activités de transformation ou d'assemblage de produits intermédiaires.

Le secteur, composé de huit grandes filières, est organisé en fonction des produits fabriqués ou transformés :

- industrie de la viande : abattage du bétail, de la volaille, charcuterie, conserverie ;
- industrie laitière : fabrication du lait, du beurre, des yaourts, des fromages, du lait en poudre ou concentré, des glaces, fractionnement du lait pour l'industrie alimentaire (caséine, lactose, protéines ultrafiltrées), etc. ;
- fabrication de produits alimentaires élaborés : fruits, légumes, poissons, plats cuisinés et confitures ;
- fabrication de produits à base de céréales : farine, pain et pâtisseries industriels, biscuits, biscottes, semoules et pâtes alimentaires, céréales pour le petit déjeuner, malt, amidon, fécules et produits dérivés, aliments pour animaux, etc. ;
- fabrication d'huiles, de corps gras et de margarines ;
- industrie sucrière ;
- fabrication de produits alimentaires divers : chocolat, confiseries, café et thé conditionnés, épices, vinaigres, sauces préparées, aliments pour bébés, produits de régime, desserts, bouillons, levures, etc. ;
- fabrication de boissons et alcools : vins, eaux de vie, distillation d'alcool, apéritifs, champagne, bière, jus de fruits et de légumes, eaux minérales, etc.

Le secteur des IAA est le premier secteur industriel mondial. Il représente près de 4 % du PIB de la planète et emploie au total 22 millions de personnes. Au niveau de l'UE, le secteur agroalimentaire est aussi le premier secteur manufacturier, avec un CA de 965 milliards d'euros (13 % du CA de l'industrie manufacturière européenne) et un effectif de 4,4 millions de salariés.

En France, le secteur des IAA est également le premier secteur industriel. Il contribue à environ 19 % du chiffre d'affaires et des effectifs salariés de l'ensemble du secteur manufacturier français, avec un CA de 159 milliards d'euros et 576 000 salariés (chiffres de 2010). À noter que les filières « viande » et « laitière » représentent 38 % du CA et 41 % des effectifs salariés. En outre, le secteur des IAA contribue à 16,5 % de la valeur ajoutée de l'ensemble du secteur manufacturier français, soit environ 35 milliards d'euros. À noter que les filières « boissons et alcools » et « produits alimentaires divers » représentent plus de 40 % de la valeur ajoutée.

En 2011, les exportations agricoles et agroalimentaires françaises ont totalisé 57 milliards d'euros (dont 41 milliards d'euros pour les produits des IAA), soit 13 % des exportations françaises, induisant un solde excédentaire de la balance commerciale de 11,7 milliards d'euros, en deuxième position derrière le secteur de l'aéronautique. À noter que la filière « boissons et alcools » représente environ 30 % des exportations. La part de marché des exportations agroalimentaires françaises au niveau mondial est de 5,4 %, ce qui place la France au quatrième rang derrière les États-Unis, les Pays-Bas et l'Allemagne. À noter que la France est en recul relatif par rapport à ses concurrents européens et aux BRICs qui progressent plus vite. Ainsi, sur les dix dernières années, la France est passée du premier au quatrième rang mondial.

Ces chiffres montrent à l'évidence que les IAA occupent au sein des industries manufacturières une place essentielle dans les économies européenne et française. En France, les États généraux de l'industrie (conclus en mars 2010) ont identifié le secteur agroalimentaire comme l'un des dix secteurs industriels stratégiques au niveau national. Le secteur contribue de manière très positive au commerce extérieur de la France et se caractérise par une certaine robustesse au sein du secteur industriel, avec une relative stabilité des effectifs salariés. Toutefois, les IAA françaises se développent et se structurent insuffisamment, ce qui entraîne une perte de compétitivité par rapport à leurs homologues dans le monde. Cette caractéristique structurelle explique en grande partie le recul relatif de la France au plan mondial.

2.6.2. Enjeux et défis des IAA à horizon 2020

Dans un marché mondial marqué par l'accélération des changements économiques (globalisation de l'économie, libéralisation du marché) et des développements technologiques, les IAA doivent faire face à une compétition accrue des pays émergents (BRICs notamment), aux contraintes réglementaires qui évoluent vite (qualité, hygiène, sécurité) et aux attentes plurielles des consommateurs en matière d'alimentation (qualité, diversité, santé, bien-être, accessibilité). Tous ces facteurs impactent fortement et directement les activités, l'organisation et l'emploi dans le secteur des IAA. Pour les IAA européennes et françaises, ils déterminent les enjeux et défis des IAA à horizon 2020 et au-delà.

Dans un contexte de plus en plus concurrentiel, les IAA européennes et françaises sont encore leaders dans de nombreuses filières. Mais, ce leadership pourrait se fragiliser à moyen/long terme si des mesures volontaristes n'étaient pas prises dès maintenant pour améliorer la capacité d'innovation multidisciplinaire des IAA. Ce constat se trouve renforcé par les éléments suivants :

- les IAA revendiquent une vraie valeur ajoutée dans la prévention des maladies liées au style de vie et de consommation. Mais, cette valeur ajoutée n'est réellement effective dans l'alimentation que si de nouveaux concepts produits-procédés sont développés et exploités, ce qui requiert des investissements R&D conséquents et ciblés ;
- la concurrence des pays développés et émergents (États-Unis, Japon, BRICs) qui considèrent l'innovation dans les IAA comme un axe stratégique pour leur développement économique et social. À ce titre, l'innovation dans les IAA est pleinement intégrée dans la politique industrielle de ces pays ;
- la concurrence des pays à bas coût (BRICs) s'accroît. Même si la maîtrise des coûts demeure un objectif permanent et incontournable pour les IAA européennes et françaises, leur avenir à moyen/long terme réside surtout dans le développement et la production de produits à haute valeur ajoutée, en s'appuyant sur un niveau d'innovation soutenu et une avance technologique différenciante ;
- les efforts de R&D des IAA européennes et françaises ont été jusqu'à présent fragmentés et relativement faibles. En général, les PME investissent peu en R&D. Et les grands groupes tendent à concentrer leurs efforts sur

le marketing. À noter que l'investissement R&D en Europe et en France est de l'ordre de 0,4 % du CA et de 1,5 % de la valeur ajoutée, respectivement ; ce qui est très faible comparé aux autres secteurs manufacturiers. Les IAA privilégient l'innovation incrémentale, qui repose sur la modification et l'amélioration de produits et de procédés. L'innovation de rupture qui consiste en la mise sur le marché d'un produit totalement nouveau est plus rare. Les IAA déposent peu de brevets (en moyenne 200 à 250 brevets par an en France). En Europe comme en France, il est nécessaire de définir et mettre en place des stratégies R&D long terme pour favoriser les ruptures en matière de produits et de procédés ; et ce, pour sécuriser et consolider le leadership européen et français sur le long terme.

En Europe comme en France, compte tenu des enjeux et des défis mentionnés ci-dessus, les pouvoirs publics et le secteur des IAA s'accordent sur la nécessité de cibler des axes prioritaires pour préparer l'excellence technologique (les ruptures technologiques notamment), et ainsi sécuriser une industrie performante et compétitive s'appuyant sur une économie en croissance, une richesse technologique partagée, une production alimentaire durable et la confiance des consommateurs.

Ces axes prioritaires sont les suivants :

- accroître l'investissement de R&D, ainsi que la vitesse et la qualité d'innovation ;
- activer la collaboration entre les différents intervenants des filières industrielles ;
- optimiser l'acquisition de connaissances et activer le transfert de connaissances vers les PME ;
- adapter/incorporer des concepts modernes de production, notamment en se ressourçant auprès d'autres secteurs manufacturiers performants.

La stratégie de développement à long terme du secteur des IAA européennes et françaises est donc clairement basée sur la recherche et l'innovation, qui ont pour ambition de préparer les ruptures technologiques dans ce secteur et d'associer les différents acteurs (IAA, partenaires-fournisseurs industriels, instituts de recherche).

2.6.3. Équipements, procédés, lignes de production dans les IAA : moteurs de l'innovation

Le leadership des IAA européennes et françaises constitue l'un des atouts majeurs pour les équipementiers-ensembliers européens et français. En effet, le secteur des IAA représente pour les équipementiers-ensembliers à la fois un marché considérable (marché intérieur et marché à l'export) et un formidable potentiel de différenciation technique et technologique grâce à la capacité d'anticipation des filières industrielles leaders.

Compte tenu d'une part du contexte très concurrentiel du marché agroalimentaire mondial, et d'autre part des axes prioritaires visant à préparer l'excellence technologique comme facteur de différenciation, les IAA ne préserveront et consolideront durablement leur leadership dans le monde que si elles collaborent efficacement avec leurs partenaires équipementiers-ensembliers. Il s'agit là de promouvoir

des alliances gagnant-gagnant sur le moyen/long terme entre IAA et équipementiers-ensembliers, ces derniers étant considérés non seulement comme des fournisseurs potentiels d'équipements, mais aussi comme des porteurs de valeur ajoutée technologique (grâce à leurs savoir et savoir-faire reconnus sur les équipements et procédés, voire sur les produits). À charge pour les équipementiers-ensembliers de mettre en place des stratégies d'alliance gagnant-gagnant avec les IAA et de s'organiser pour mettre leurs capacités de création, d'innovation et de réalisation au service du développement industriel agroalimentaire, au plan local comme mondial.

Afin d'éclairer les équipementiers-ensembliers en matière de R&D nécessaire pour accompagner efficacement le développement dans le secteur des IAA, il convient de décliner les orientations prioritaires de ce secteur en matière de R&D à long terme (dans l'UE et en France).

2.6.3.1. Le développement durable

À l'image des autres secteurs industriels, le secteur des IAA s'engage vers des stratégies de développement durable qui associent la prise en compte des dimensions économiques, écologiques, sociales et sociétales. Les défis environnementaux auxquels les IAA doivent faire face consistent notamment à :

- maîtriser la consommation d'énergie et assurer une meilleure efficacité énergétique des systèmes de production ;
- valoriser au maximum la ressource agricole et réduire les déchets ;
- anticiper les effets du changement climatique et réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) ;
- réduire et optimiser la consommation d'eau dans les processus de fabrication et veiller à la qualité des rejets des eaux usées ;
- limiter tous les transferts de polluants dans les milieux eau/sol/air ;
- contribuer à la valorisation des déchets, accroître la performance environnementale des emballages en lien avec la politique de gestion des déchets.

Avec le développement et l'industrialisation d'équipements et de procédés intensifiés écoconçus, les équipementiers-ensembliers sont capables d'apporter des réponses très concrètes et différenciantes, en lien avec les enjeux stratégiques du développement durable dans les IAA. Dans le prolongement de cette orientation, les équipementiers-ensembliers peuvent aussi contribuer au développement de systèmes de production intelligents (intégration des technologies de l'information et de la communication, ou TIC, dans les processus de transformation et de production) afin de rendre ces systèmes plus productifs et plus flexibles ; avec le double objectif de mettre ces avancées technologiques à la portée non seulement des grands groupes agroalimentaires, mais aussi des PME du secteur.

2.6.3.2. Qualité et hygiène alimentaires

L'alimentation est étroitement liée aux notions de plaisir, bien-être et santé. Associée aux allégations santé grâce à un contenu nutritionnel optimisé, l'attribut sensoriel lié à la saveur d'un aliment s'avère être très important pour le consommateur. En outre, les changements sociétaux et l'évolution des habitudes alimentaires

qui en découle (travail des femmes, vieillissement de la population, intégration croissante de groupes ethniques, etc.) dynamise la créativité et le développement des « aliments service ». Enfin, la notion de diversité alimentaire connaît une importance accrue dans le développement de nouveaux produits.

Face aux nombreuses crises qui ont touché la filière agroalimentaire (« vache folle », dioxine, etc.), l'Union Européenne a achevé l'harmonisation d'une réglementation, dite « paquet hygiène », pour assurer la sécurité sanitaire de l'alimentation humaine et animale. Il s'agit d'obtenir un niveau élevé de protection du consommateur tout en tenant compte des enjeux économiques (la libre circulation des produits) et culturels.

La R&D orientée produits (qui intègre la nutrition, les sciences des aliments, le génie de la formulation, les sciences de la consommation, etc.), aussi puissante soit-elle, ne peut pas à elle seule satisfaire complètement et durablement les exigences croissantes en matière de qualité et d'hygiène alimentaires. Une R&D orientée équipements et procédés est alors nécessaire pour atteindre les objectifs de compétitivité durable des IAA européennes et françaises. Là, les équipementiers-ensembliers ont évidemment un rôle important et complémentaire à jouer pour concevoir et développer les nouvelles technologies de transformation des produits alimentaires (équipements, procédés et lignes) adaptées aux exigences de qualité et d'hygiène alimentaire, qui évoluent, capables de servir à la fois le marché local (national, régional) et les marchés à l'international. À titre d'exemples, on peut citer les technologies douces de préservation et de séparation, les biotechnologies, les micro- et nanotechnologies appliquées à la texturation alimentaire, les traitements thermomécaniques de milieux complexes concentrés, etc.

2.6.4. Axes de recherche et d'innovation pour les équipementiers-ensembliers

Les paragraphes précédents mettent clairement en évidence un contexte ambitieux visant à renforcer et à consolider la compétitivité et le leadership du secteur IAA en Europe comme en France. Basée sur un effort sur le long terme de recherche et d'innovation, cette ambition vise non seulement l'innovation incrémentale, mais aussi et surtout l'innovation de rupture, afin de s'approprier les ruptures technologiques nécessaires du secteur des IAA, en lien avec les orientations prioritaires présentées ci-dessus.

Tout d'abord, il convient de rappeler que le développement technologique requiert des compétences pluridisciplinaires qui relèvent non seulement du génie des équipements, mais aussi du génie des procédés (sciences de l'ingénieur qui décrivent les fonctions procédés des équipements). Les deux domaines sont très complémentaires et, plus que jamais, il importe d'associer les expertises techniques et scientifiques des deux domaines pour contribuer à relever à un meilleur niveau les défis technologiques des IAA, et conférer une valeur ajoutée fonctionnelle aux matériels et équipements de procédés. Aussi est-il capital pour les équipementiers-ensembliers du secteur des IAA de s'appuyer, dans le développement de leurs équipements et matériels, sur des compétences avancées en génie des équipements et en génie des procédés. Sont listés ci-après quelques axes essentiels de recherche et d'innovation

qui devraient permettre aux industriels de la mécanique de répondre efficacement et concrètement aux besoins de développement technologique des IAA.

2.6.4.1. Génie des équipements

- Écoconception et conception hygiénique des matériels et équipements de procédés ;
- robotique et mécatronique ;
- rendements (énergie, matière) et flexibilité (agilité/rapidité pour les changements de lots, de recettes et de processus de fabrication) des matériels et équipements de procédés ;
- sécurité des matériels et équipements de procédés.

2.6.4.2. Intensification des procédés

C'est un concept récent portant sur l'amélioration de procédés existants ou le développement de procédés nouveaux, visant à réduire l'impact environnemental et l'intensité capitalistique des procédés et lignes de production. Le but ultime est d'évoluer vers des technologies durables, en cohérence avec la définition du développement durable proposée par la WCED, World Commission on Environment and Development (rapport Brundtland, 1987) : « Le développement qui satisfait les besoins de la génération présente sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire leurs propres besoins. »

Les bases de l'intensification des procédés ont été établies ces dernières années par la communauté scientifique de génie des procédés et l'industrie des procédés (l'industrie chimique notamment). Ces bases reposent sur trois grands principes :

- promouvoir les procédés continus ;
- développer des équipements de procédés multifonctionnels ;
- accélérer les phénomènes de transfert (transferts de masse, chaleur et quantité de mouvement) et les dynamiques de conversion de la matière (conversions physico-chimiques).

Appliquée aux procédés et lignes de production du secteur des IAA, l'intensification des procédés devrait permettre de réduire l'impact environnemental (réduction des consommables, énergie et eau ; minimisation des déchets), d'accroître la productivité (augmentation des rendements matière), d'améliorer la sobriété et la sécurité des unités, et de réduire les coûts (coûts opératoires et coûts d'investissement). L'industrie chimique est déjà bien avancée dans l'exploitation de l'intensification des procédés. Un transfert de connaissances et de savoir-faire méthodologique dans ce domaine, au profit des IAA, doit être vivement encouragé.

2.6.4.3. TIC et systèmes de production intelligents

- Intégration des TIC dans la gestion opérationnelle de la production (opérations unitaires, lignes de production, chaînes alimentaire et logistique,

traçabilité, suivi en temps réel de la qualité des produits, de l'empreinte carbone, de l'impact environnemental) ;
– TIC pour la modélisation/simulation des systèmes de production (notion d'usine virtuelle) pour développer des outils d'aide à la décision et à la formation (*e-learning*).

2.6.4.4. Thermorhéologie des milieux complexes concentrés

Les milieux rencontrés dans les IAA sont souvent très complexes et hétérogènes (systèmes diphasiques liquide/liquide, gaz/liquide, solide/liquide), eu égard aux formulations multicomposants mises en œuvre. Avec le développement d'équipements et de procédés intensifiants, on prévoit que ces milieux seront significativement plus concentrés (procédés de séchage, procédés de cuisson, etc.). Aussi convient-il de promouvoir les recherches visant à explorer et décrire les comportements thermorhéologiques de ces milieux. À cet effet, l'adaptation de méthodes existantes, voire le développement de nouvelles méthodes de mesure, doivent être envisagés.

2.6.4.5. Métrologie et contrôle des procédés

– capteurs en ligne (thermorhéologie) ;
– biocapteurs ;
– outils de diagnostic et imagerie (imagerie thermique, ultrasons, tomographie, systèmes acoustiques non invasifs) ;
– automation avancée des équipements, des procédés et lignes de production.

2.6.4.6. Nouveaux matériaux fonctionnels

– écoemballages ;
– emballages intelligents ;
– surfaces antimicrobiennes.

2.6.5. Bibliographie

Parmi les sources d'information consultées pour étayer cette analyse relative à l'industrie agroalimentaire, citons les deux documents :

– « Panorama des industries agroalimentaires », Ministère de l'Agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, Direction générale des politiques agricole, agroalimentaire et des territoires, Bureau des industries agroalimentaires, édition 2012, Paris, France, 64 pages.
– F. Gorga, M. Notarfonso, FoodManufuture, European Commission, KBBE-2011-5-289327, deliverable n° D2.1, 2012, 18 pages.

2.7. L'industrie des technologies de l'environnement

2.7.1. Importance macroéconomique du secteur

Aborder le thème de l'environnement selon l'axe des industries ou des technologies environnementales ne dispense pas de considérer leur impact, leur mise en œuvre et les conditions de réduction de ces impacts comme des sujets aujourd'hui très sensibles et sociétaux.

Un ministère ad hoc et un commissariat général en charge du développement durable ; les DREAL, des directives européennes, l'Echa sont bien là pour informer, mesurer et s'assurer de la bonne mise en place de dispositifs sévères, mais utiles et souvent nécessaires.

La diversité des milieux concernés – air, eau, sol et sous-sol, biodiversité, paysages, etc. –, les pressions et impacts sur l'environnement divers par leurs origines – agriculture, sylviculture, pêche, construction, industrie, ménages, tourisme, transports, etc. – ont façonné les mentalités et entraîné progressivement une prise de conscience qui se traduit en nouvelles exigences.

La perception des risques devient générale, jusqu'à l'abus du principe de précaution, et modifie les pratiques environnementales, tant les comportements individuels que ceux des ménages ou des acteurs économiques.

C'est dans ce contexte que s'est mise en place toute une économie de l'environnement ou écoactivités pour rejoindre et reprendre les terminologies du MEDDE, ses définitions et présentations :

« La protection de l'environnement vise à prévenir, diminuer les émissions de polluants et les autres dégradations causées à l'environnement […]. La gestion des ressources naturelles vise à diminuer les prélèvements sur les ressources naturelles : développement des énergies renouvelables, maîtrise de l'énergie, récupération, gestion durable de l'eau […]. »

Le marché international est évalué à 1 000 milliards d'euros et le marché global français à 50 milliards d'euros. La France occupe le cinquième rang mondial à l'exportation avec 80 % d'export vers les pays de l'OCDE et 8 milliards d'euros de productions.

À partir de 2015, Eurostat collectera annuellement les données de l'année N – 2 sur les écoactivités et la liste des produits comptabilisés dans la production ; le commerce extérieur et la valeur ajoutée seront enfin pris en compte.

Les écoactivités relèvent d'ores et déjà pour l'essentiel d'entreprises marchandes, et les productions et les emplois liés peuvent être extraits du dispositif ÉSANE de l'INSEE.

Nous proposons de simplement rappeler les chiffres en termes d'« emplois par domaine » générés sans les développer, en renvoyant le lecteur intéressé sur les sites dédiés du MEDDE (observations et statistiques), mais de flécher les différents domaines retenus tels qu'ils peuvent ressortir des planches (source « Production 2009–2011 » du SOeS, données 2013).

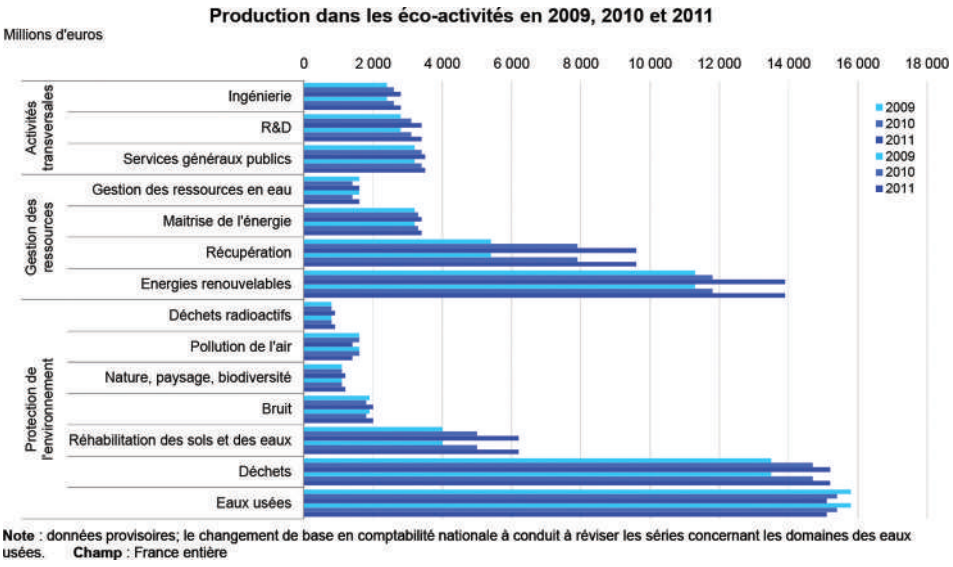


FIGURE 2.11. – Répartition des éco-activités. *Source :* SOeS, 2013.

2.7.2. Tendances, enjeux et défis du secteur à l'horizon 2020

La raréfaction générale des ressources traditionnelles, et des eaux de qualité en particulier, les prélèvements dans le milieu naturel qui restent excessifs, le prix d'accès aux énergies fossiles toujours en augmentation sont directement la conséquence des bouleversements climatiques et de l'augmentation des populations, qui restent des tendances lourdes sans inflexion.

Dans ces conditions, des risques sanitaires persistants, voire des risques sociaux, adviendront dans la mesure où l'accès aux ressources pour tous et la compétition dans les usages ou entre territoires n'est plus assurée.

Cette dynamique de fond aura un poids économique de plus en plus considérable et les marchés liés à l'environnement, qui représentent déjà un pourcentage conséquent du PIB mondial, voisin de 2 %, ne peuvent que croître rapidement.

Si le Livre Blanc de la Recherche en Mécanique n'est pas le cadre adapté pour développer ces hypothèses, il résulte de toutes ces contraintes de véritables opportunités de développement pour le secteur des services à l'industrie mécanique et à certaines spécialités des constructions mécaniques, car nous ne sommes qu'au début d'un processus de mutation de nos économies.

Le nombre d'écoentreprises est évalué entre 10 000 et 12 000, de toutes tailles, mais avec des caractéristiques de taille bien précises selon les secteurs ou spécialités.

À côté des grands opérateurs, majors ou leaders mondiaux historiques, qui réalisent environ 40 % du chiffre d'affaires global des écoactivités (source ADEME),

un nombre très élevé de PME et d'ETI, pas systématiquement des filiales de ces groupes, sont très actives dans ces filières et vont se développer grâce à leur capacité à innover et à exporter.

Le couplage taille/secteur fait ressortir :

- le secteur de l'eau, très concentré autour des grandes entreprises et de leurs filiales avec trois opérateurs détenant 75 % du marché privé de l'eau en France ;
- le secteur de la gestion des déchets, sur fond de faible croissance des marchés de la collecte due à la réduction des volumes et aux nouveaux enjeux de la valorisation, est majoritairement piloté par une douzaine de groupes de 500 à 2 000 salariés offrant une bonne couverture du territoire ;
- le secteur de la récupération, très largement le domaine des PME avec 60 % du CA, dont la moitié dans la récupération des fers et métaux ;
- le secteur des services qui compte des dizaines de bureaux d'études techniques et cabinets, voire d'experts indépendants ;
- les secteurs du génie écologique et des énergies renouvelables, les plus récents et les plus dynamiques, avec 100 000 emplois et 10 milliards d'euros de CA, représentés par des entreprises structurées et donc porteuses du tissu éco-industriel français du futur. À titre d'exemple, la croissance moyenne de ces sociétés a été de l'ordre de 20 % sur ces dix dernières années et devrait se poursuivre en dépit des politiques tarifaires et d'orientations changeantes.

Ainsi donc, si une partie des métiers de l'environnement est ancienne, tels les métiers de l'eau et des déchets, une nouvelle vague d'entreprises est très récente ; c'est en particulier le cas des entreprises spécialistes des pollutions, des GES (Gaz à Effet de Serre), du solaire et de l'éolien ; on peut signaler, pour ces derniers, la création en 2010 de la plate-forme Windustry, forte déjà de 300 acteurs.

2.7.3. Attentes vis-à-vis des partenaires-fournisseurs équipementiers-ensembliers

Les entreprises de la mécanique peuvent être considérées comme des entreprises connexes dont le cœur de métier n'est pas l'environnement, mais qui ont développé des compétences dans le secteur.

À côté des sociétés de services et d'ingénieries, les industriels de la mécanique, de la mécatronique et de l'automation associée peuvent considérer l'environnement comme une diversification.

- Secteur de l'eau et de l'assainissement :
  - entreprises du forage et du captage dont les besoins en outillages neufs et rénovés sont très importants (outils de coupe, trépans, carburiers, traitements thermiques…) ;
  - entreprises fabriquant des équipements pour la construction et le fonctionnement des stations, du transport de l'eau jusqu'aux technologies

intégrées dans les installations de traitement (filtre-presse, réducteurs, agitateurs, pompes, décanteurs, chaudronnerie…) ;
– entreprises de maintenance et services associés de travaux.

Une enquête du MEDDE de 2012 précise : 65 % de TPE, 30 % de PME, 5 % relevant des GE.

– Secteur des déchets, valorisation, recyclage et valorisation énergétique :
  – entreprises fabricantes d'équipements pour le tri et la sélection des matières (broyeurs, cribleurs, tamis et métal déployé, brûleurs…) ;
  – entreprises fabricantes de grands équipements pour l'incinération et la récupération d'énergie, biogaz (incinérateurs, chaudières biomasse, méthaniseurs, torches plasma…).

– Secteur des énergies renouvelables :
  – entreprises fabriquant des machines-outils à destination des chaînes de fabrication ;
  – entreprises fabriquant des modules, composants ou systèmes pour panneaux solaires, éoliennes, installations géothermiques ;
  – entreprises fabriquant de grandes turbines (> 5 MW) ;
  – entreprises « *smart grids* » ou intervenant dans les réseaux intelligents de consommation électrique (compteurs…) ;
  – entreprises de l'aéraulique…

  Le COSEI (Comité Stratégique de Filières Éco-Industries) créé en 2008 a vocation à réunir tous les acteurs concernés par le développement des éco-industries ; il est intégré dans un dispositif plus vaste, le Conseil National de l'Industrie, qui vise à relancer l'activité industrielle française.

2.7.4. Domaines clés de recherche et innovation

Dans le domaine de l'environnement et des industries liées, les niveaux de maturité sont très différents puisqu'à côté des métiers et technologies mûrs comme ceux de l'eau et de la collecte des déchets, d'autres métiers sont en pleine émergence, ce qui est particulièrement vérifié dans le solaire ou la valorisation des métaux stratégiques.

Il est désormais certain qu'un processus inéluctable de transformation de nos économies, de nos modes de production et de consommation est enclenché.

La transition écologique et énergétique n'en est qu'à ses débuts. Cela nécessite une forte adaptation des mentalités et des appareils productifs, avec un effort d'innovation et une envie de conquête des marchés mondiaux des éco-industries par la mécanique.

Le sujet de l'innovation fait partie justement des groupes de travail transversaux mis en place au COSEI pour améliorer la compétitivité des écoentreprises. Une illustration en est proposée dans un schéma extrait du Livre blanc du PEXE (association des écoentreprises de France, à l'origine Plan EXport des Écoentreprises) : « Financement public de l'innovation par filières et domaines 2011 ».

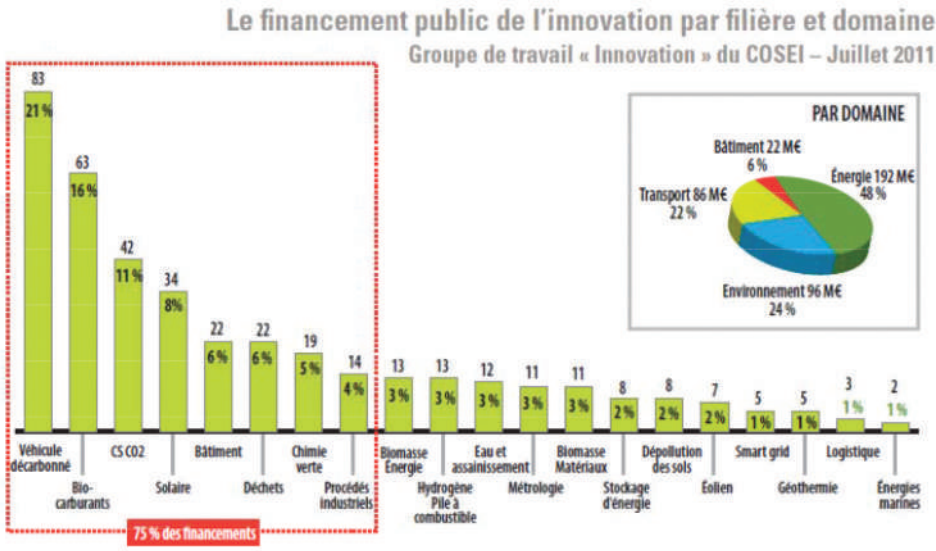


Figure 2.12. – Le financement public des innovations des éco-entreprises.

Parmi les pôles de compétitivité, 14 d'entre eux font de la thématique environnementale leur cœur de cible.

Le réseau Ecotech rassemble ces 14 pôles autour d'une charte commune afin, entre autres, de renforcer les écosystèmes d'innovation favorables à la croissance.

Au niveau de la trajectoire de développement des PME, deux types de développement se dessinent :

– l'hyperspécialisation pour devenir champion dans l'activité particulière ; le levier de croissance est prioritairement l'innovation, suivie de l'exportation ;
– la croissance externe ou l'adjonction de compétences connexes pour répondre à des besoins de plus en plus transverses.

Six domaines d'action stratégiques ont été définis comme prioritaires et nous privilégions en ce qui nous concerne :

– les impacts environnementaux : eau, air, sol, bruit, odeur et adaptation au changement climatique ;
– la métrologie et l'instrumentation des milieux de l'environnement ;
– les matières premières, secondaires et l'économie circulaire.

Parmi les initiatives à mettre en avant :

– la labellisation « cluster d'excellence » et le réseau écoentreprises E2IA en Auvergne ;
– les rencontres Ecotech des instituts Carnot et le PEXE ;

– les projets d'industrialisation en valorisation de métaux stratégiques dont l'Europe n'est pas productrice ;
– les technologies émergentes fruits de collaborations industrie/recherche académique et/ou centres techniques de ressources de la profession, principalement le CETIM : fluides en conditions supercritiques, torches à plasma…

Île-de-France, Rhône-Alpes, PACA et Languedoc-Roussillon sont les régions les plus dynamiques et denses en France. Cela s'explique par le fait qu'elles rassemblent l'expertise historique, les pôles de compétitivité, les entreprises innovantes et les instituts de recherche et universitaires, toujours selon le PEXE.

2.7.5. Bibliographie

[1] MEDDE, statistiques.developpement-durable.gouv.fr.
[2] PEXE, *Livre blanc*.
[3] INSEE, ÉSANE.
[4] ADEME, « Marchés et emplois des activités liées aux déchets ».
[5] CODESPAR, www.codespar.org.
[6] SYVED, Syndicat de la valorisation et de l'élimination de déchets.
[7] ECHA, European Chemicals Agency, echa.europa.eu.

3 Les défis scientifiques

Observer le mouvement de la matière, de l'objet mécanique, dans le temps, à différentes échelles, en considérant les phénomènes multiples qui peuvent se produire, afin d'en déduire des lois, d'établir des modèles pour simuler le comportement pour comprendre, prédire et découvrir. Telle est la démarche de la recherche en science mécanique.

Science du mouvement et de l'équilibre, des forces et énergies qu'elle mobilise, la science mécanique constitue l'un des piliers de la connaissance. Science millénaire, elle a néanmoins de nombreux défis à relever de nos jours, que les prochains chapitres vous invitent à découvrir.

Le monde de demain sera plus que jamais demandeur de solutions scientifiques en réponse aux besoins de notre civilisation ; ces solutions seront largement issues de la mécanique.

3.1. Mécanique théorique

3.1.1. Descriptif de la thématique

La mécanique théorique constitue un champ de connaissances multidisciplinaires et un domaine de recherche qui se situe principalement à la croisée de la mécanique, des mathématiques et de la thermodynamique des processus irréversibles. Son propos est de décrire et d'analyser les phénomènes physiques de la manière la plus rigoureuse possible, avec pour but de produire des modèles puissants et rigoureusement établis. Elle se distingue en cela des autres approches en mécanique par la création et l'emploi de modèles élaborés à partir d'outils conceptuels avancés provenant de différentes branches des mathématiques : analyse fonctionnelle, analyse asymptotique, groupes de symétrie… La communauté des « mécaniciens théoriciens » constitue ainsi un cercle de réflexion en amont sur la création et la mise en forme de concepts et outils nouveaux pour la modélisation en mécanique.

3.1.2. Principales avancées de la thématique pendant les trente dernières années

3.1.2.1. Les principales avancées en mécanique des solides et en mécanique des fluides

Avancées importantes sur les thèmes suivants : méthodes des échelles multiples, développements asymptotiques (y compris sur le plan numérique avec, par exemple, le développement de la méthode asymptotique numérique), homogénéisation, construction de modèles macroscopiques à partir de descriptions microscopiques, modèles ab initio…

Progrès en mécanique des fluides sur la modélisation de la turbulence, la transition laminaire/turbulent avec l'étude des instabilités hydrodynamiques, la modélisation des couches limites, la convection et l'apparition des tourbillons, l'instabilité des écoulements parallèles (jets, couches de mélanges…).

Les principaux progrès en mécanique des solides, sur le plan théorique, concernent les lois de comportement, l'utilisation systématique des concepts de la thermodynamique des processus irréversibles pour la formulation des comportements dissipatifs. Des groupes de travail (GRECO, Grandes déformations et endommagement notamment) ont propagé les idées novatrices dans le domaine de la formulation conceptuelle rigoureuse de lois de comportement non linéaires.

À noter aussi des progrès provenant de collaborations avec des mathématiciens appliqués sur les méthodes numériques dans les problèmes de mécanique (homogénéisation, turbulence…), sur l'étude mathématique des équations de transport, en particulier sur l'équation de Boltzmann.

Apparition de nouveaux domaines : méthodes de type Lattice Boltzmann (LBM), modélisation des milieux granulaires, comportement des fluides complexes, modélisation de l'éclatement des jets et atomisation…

3.1.2.2. Une avancée importante et prometteuse : les modèles ab initio et la dynamique moléculaire

D'un côté, se sont développés à l'échelle de la structure des modèles phénoménologiques comportant des lois de comportement qui traduisent dans le meilleur des cas l'existence de la microstructure sous-jacente, mais qui en général sont trop dégradés pour rendre compte fidèlement des physiques sous-jacentes.

À l'opposé, on trouve les travaux plus récents qui s'attachent à décrire de manière fine la microstructure et son évolution, en prenant soin de bien représenter toute la physique et tous les mécanismes mis en jeu. C'est le domaine des modèles « ab initio » et de la dynamique moléculaire. Bien que ces types de modèles, de par leur échelle d'étude et de description, décrivent de manière très fine le matériau, ils doivent se restreindre encore à des systèmes très (voire trop) petits en taille (disons de quelques microns) et en durée temporelle (disons quelques nanosecondes). Ces échelles sont sans doute adéquates pour faire ressortir les physiques mises en jeu, mais elles ne permettent pas encore de faire ressortir toutes

les propriétés émergentes, et surtout les domaines spatiaux et temporels d'intérêt dans le domaine des procédés.

Il existe toutefois une échelle intermédiaire, à mi-chemin entre les descriptions « trop » microscopiques et « trop » macroscopiques, qui permet d'introduire des physiques microscopiques de façon naturelle dans l'échelle des produits/structures : c'est le domaine des modèles issus de la théorie cinétique (mécanique statistique). Cette approche est à la base des équations de Boltzmann (pour la dynamique des systèmes composés de particules non chargées), des équations de Vlasov-Poisson-Boltzmann (pour les systèmes de particules chargées/plasmas) et de celles de Fokker-Planck (pour les suspensions : macromolécules, fibres, nanofibres, nanotubes…), etc.

3.1.2.3. Les progrès du numérique : une aide et un moteur pour le développement de la mécanique théorique

La principale évolution durant les trente dernières années est sans doute la place prise par la simulation numérique, tant comme outil pour l'ingénierie que comme moyen d'investigation pour la recherche fondamentale. C'est particulièrement vrai pour la recherche en turbulence, qui a beaucoup bénéficié des simulations numériques directes (résolution directe des équations de Navier-Stokes sur des maillages de très haute précision). Ces simulations fournissent des données sans équivalent, tant en quantité qu'en qualité.

La place grandissante de la simulation numérique nécessite un renouveau de la mécanique théorique, car elle se traduit par un besoin accru en termes de modélisation. L'analyse des propriétés des schémas numériques a beaucoup à prendre dans le corpus des outils de la mécanique théorique. Une question centrale, encore peu formalisée (sauf par quelques pionniers), est de proposer des méthodes numériques permettant à l'équation discrétisée (résolue sur ordinateur) de conserver les propriétés (symétries, invariants…) de l'équation continue.

La croissance exponentielle de la simulation numérique a toutefois un effet pervers : comme il est plus facile de faire tourner des simulations sans fin que de réfléchir, il y a aujourd'hui une tendance nette à multiplier les calculs et à accumuler les données, plutôt que de faire un effort de compréhension et de réflexion.

3.1.2.4. Les principales avancées en modélisation de l'interaction fluide/structure

Les avancées en modélisation ont été importantes : optimisation des méthodes numériques pour la résolution de systèmes couplés Navier-Stokes/élastodynamique non linéaire ; passage à l'échelle réelle des simulations haute fidélité en similitude géométrique, en aérodynamique, génie naval, thermohydraulique et combustion ; construction d'algorithmes de réduction de modèles à partir de simulations haute fidélité. Des modèles locaux multiphysiques couplés ont été progressivement élaborés, permettant de fournir des données d'entrée aux modèles globaux actuellement basés sur des concepts empiriques.

3.1.3. Orientations ou réorientations nécessaires en fonction des enjeux

En mécanique des fluides, les problèmes multi-physiques (combustion, changement de phase, écoulement multi-matériaux…) soulèvent la question de l'établissement de lois de comportement vérifiant les principes premiers (thermodynamique, symétries…) que beaucoup de modèles empiriques ne respectent pas. Cela est encore plus vrai lorsque des modèles de turbulence sont utilisés. Il est important de rappeler que la plupart des modèles ne respectent pas les symétries de base, comme l'invariance galiléenne. Par ailleurs, les outils de la mécanique théorique peuvent être employés pour analyser les méthodes numériques existantes sous un nouvel angle, voire proposer de nouvelles méthodes, donnant accès à une compréhension accrue des erreurs numériques et ouvrant de nouvelles pistes d'améliorations.

Dans les interactions fluide/structure, des approches de couplage de type « monolithique » doivent être préconisées afin de résoudre simultanément le système des équations du domaine fluide et celui du domaine solide, et de mieux prendre en compte les non-linéarités des transferts pariétaux. Des approches innovantes de la modélisation de la turbulence sont également nécessaires, afin de mieux modéliser les phénomènes hors équilibre. Les approches actuelles sont encore insuffisantes pour la capture des amplitudes de l'instabilité vibratoire et des bifurcations vers les régimes de flottement. Des réductions de modèles améliorées sont nécessaires afin d'accroître la capacité prédictive du mouvement et de la déformation de la structure solide.

Au cours des dernières décennies, les codes de calcul pour la mécanique ont énormément progressé, en particulier grâce à l'intégration des résultats de la mécanique théorique. Mais, paradoxalement, ces progrès importants n'ont pas contribué à donner plus de visibilité aux apports de la mécanique théorique, les codes étant le plus souvent utilisés comme de simples boîtes noires.

L'enjeu aujourd'hui consiste à redéfinir le domaine de la mécanique théorique et ses méthodologies propres. La mécanique est en attente de l'émergence de concepts nouveaux : les très nombreuses propositions de modélisation sont toujours, à l'heure actuelle, construites sur les principes de la thermodynamique des processus irréversibles, mais ces outils peuvent ne pas être adaptés à certaines notions ou certains phénomènes, comme les processus éloignés de l'équilibre. Il est nécessaire de préparer une rupture conceptuelle, davantage qu'une évolution des outils maintenant bien éprouvés. Cette absence de rupture se manifeste par la mise en place de solutions ad hoc, au détriment d'une réflexion plus fondamentale.

3.1.4. Les verrous scientifiques et technologiques à lever

Plus que des verrous scientifiques, les défis de la mécanique théorique dans les années à venir concernent deux « transitions d'échelle ». Il s'agit, d'une part, d'étayer le formalisme des lois de comportement par une intégration plus systématique des

phénomènes aux échelles fines et, d'autre part, de se préoccuper de la mise en œuvre numérique des outils de modélisation à l'échelle de la structure. Ce second point peut constituer à lui seul un axe de recherche.

3.1.4.1. Des verrous à lever dans le domaine de la mécanique des fluides

- Les méthodes de changement d'échelle (passage micro/macro) pour des cas multiphysiques ;
- le développement de modèles de turbulence vérifiant un ensemble de principes, pour les cas simples jusqu'aux cas à physiques couplées ;
- le développement de méthodes de Boltzmann sur réseau efficaces pour les écoulements à thermodynamique complexe ;
- l'extension des outils modernes d'analyse de la stabilité des écoulements (outils issus de la théorie du contrôle optimal, modes non normaux, analyse non linéaire) aux écoulements compressibles, multiphasiques… Un autre axe serait l'extension rigoureuse aux champs moyens d'écoulements turbulents ;
- la modélisation des microécoulements et la prise en compte des effets de surface : gouttes microscopiques, transferts à petites échelles, microfluidique… ;
- l'introduction de l'aléatoire dans les données initiales et/ou conditions aux limites ; l'incertitudes dans les erreurs…

3.1.4.2. Des verrous à lever en mécanique des solides et des structures

- Modélisations micropolaires, non locales et/ou à gradients ;
- modélisation des matériaux granulaires : lois de comportement, anisotropie ;
- élaboration de modèles de structures adaptés à l'étude du couplage fluide/structure ;
- introduction de l'aléatoire dans les modèles ;
- modèles globaux en temps pour les problèmes de contact avec frottements de Coulomb ;
- nanomécanique des matériaux ;
- méthodes multiéchelles lorsqu'il y a une bifurcation au niveau local ;
- stabilité des structures en présence de lois de comportement à seuil ;
- matériaux intelligents ;
- modélisation des biomatériaux, des matériaux mous…

3.1.4.3. Des verrous à lever en interaction fluide/structure, en particulier sous turbulence

- Modélisation correcte des transferts pariétaux sous turbulence lorsque la surface solide est déformable ;
- caractérisation des changements de régimes et des nombres critiques fluide-structure conduisant à l'apparition de flottements dangereux ;
- contrôle des instabilités d'aérostructures par l'utilisation de matériaux « intelligents » ;
- propagation d'ondes acoustiques dans des milieux hétérogènes.

3.1.4.4. Un verrou majeur en théorie cinétique

Les descriptions mésoscopiques issues de la théorie cinétique se heurtent à une difficulté majeure : les équations obtenues sont définies dans des espaces qui incluent les coordonnées physiques (espace et temps) et un bon nombre de coordonnées dites de conformation ou configuration décrivant précisément la microstructure. La « malédiction de la dimensionnalité » empêche souvent la résolution de tels modèles, obligeant à les dégrader afin de réduire leur dimensionnalité, souvent en faisant appel à des relations de fermeture parfois difficilement justifiées ou justifiables. Les progrès récents en mécanique numérique, fondés sur de nouvelles stratégies de résolution, comme par exemple la PGD (*Proper Generalized Decomposition*), devraient pouvoir ouvrir des voies de développement encore jamais explorées.

3.1.5. Les laboratoires concernés

Il n'existe plus en France de laboratoire totalement dédié à la mécanique théorique. Cette branche de la mécanique est aujourd'hui diffuse. Certes, la mécanique théorique est encore présente dans certains laboratoires, mais globalement, le nombre de chercheurs exerçant leur activité en mécanique théorique reste limité et tend à diminuer, ce qui est préjudiciable au développement de la mécanique en France.

3.1.6. Les enjeux industriels et sociétaux par domaines d'application

Le principal enjeu est la mise au point de modèles rigoureux et efficaces pour l'étude, théorique ou appliquée, des phénomènes physiques. Les approches empiriques piétinent dans de nombreux secteurs, et un ressourcement basé sur des outils conceptuels et théoriques devient un besoin pressant.

La formation constitue un des enjeux fondamentaux auquel doit faire face l'État et la communauté des mécaniciens théoriciens. Il est capital que les ingénieurs, les enseignants et les chercheurs disposent d'une formation solide sur les outils, les méthodes, mais également sur les principes.

Enjeux industriels : réaliser des progrès en vue d'une prise en compte améliorée de l'environnement (meilleure combustion dans les moteurs, amélioration des performances aérodynamiques des voitures et des avions, transports aériens de nanoparticules, compréhension de la pollution des sols et des rivières...). Modéliser l'endommagement des matériaux (propagation de fissures, croissance de cavités…) dans le domaine du génie civil et de l'environnement (sûreté nucléaire, risques naturels…). Intégration dans la pratique industrielle de nouveaux matériaux, comme les matériaux microstructurés et fonctionnalisés.

Enjeux sociétaux : rapprochement de la mécanique et de la médecine pour la compréhension scientifique de problèmes de santé. Par exemple, simuler par des modèles cinétiques la croissance de cellules cancéreuses, mieux connaître les lois de comportement des matériaux biocompatibles et/ou biodégradables, procéder à des analyses biologiques et transferts de substances via la microfluidique…

Améliorer la sûreté dans les domaines de l'aéronautique, de l'hydrodynamique et du nucléaire entre autres.

3.1.7. Les liens et concertations nécessaires avec les autres disciplines

La mécanique théorique intègre des modèles et résultats d'autres disciplines, comme les mathématiques, la physique, la chimie, la géologie, les sciences du vivant… La mécanique théorique se positionne naturellement au centre du champ scientifique, alors que la tendance observée est plutôt de la cantonner dans une position latérale de fournisseur de modèles macroscopiques « sur étagère ».

La multidisciplinarité est le maître mot de l'application des travaux de la mécanique théorique. Par exemple, les progrès fulgurants en mécanique expérimentale, et notamment dans le domaine de la mesure de champs, ouvre des perspectives d'adaptation des outils théoriques vers des échelles (fines) encore inexplorées. Le foisonnement des travaux en biomécanique doit également davantage interpeller les mécaniciens théoriciens, dans la mesure où ce champ disciplinaire offre des cas d'étude qui ne relèvent pas souvent des méthodes existantes. Naturellement, les interactions entre mécanique théorique et mathématiques appliquées sont une source d'enrichissement pour ces deux domaines disciplinaires.

3.1.8. La position française par rapport à l'international

La modélisation mécanique française, prise au sens large, occupe une position enviable dans le monde, comme en témoigne la présence de mécaniciens théoriciens français dans les comités scientifiques de nombreuses revues internationales et congrès, mais aussi les multiples invitations à l'étranger. Si la position de la mécanique française reste bonne dans son ensemble, il faut cependant regretter que celle de la mécanique théorique décline depuis plusieurs années, alors qu'elle était encore en pointe dans le monde il y a une trentaine d'années.

3.1.9. Recommandations et perspectives

Il est crucial et urgent de diffuser et pérenniser les outils, les concepts et les méthodes de la mécanique théorique. Le nombre de chercheurs actifs dans ce domaine va en décroissant, ce qui induit une perte de savoir et de compétence. Cela risque même de s'accélérer pour des raisons démographiques.

Quelques recommandations :

- encourager les collaborations entre mécaniciens théoriciens, numériciens et expérimentateurs ;
- maintenir un socle solide de connaissances fondamentales et théoriques dans les formations en mécanique ;
- contribuer au développement d'une recherche fondamentale de haut niveau, en la soutenant par des financements récurrents ;

- promouvoir la tenue en France de congrès internationaux dédiés à la mécanique théorique ;
- encourager la rédaction d'un ouvrage collectif de grande envergure, cohérent et unifié, qui en fasse le panorama ; cela contribuerait très positivement à maintenir sur le territoire des compétences dans le domaine de la mécanique théorique. Un exemple parfait est le livre de Dautray et Lions pour l'analyse numérique ;
- soutenir l'organisation d'écoles d'été de mécanique théorique et la publication d'ouvrages synthétisant leurs travaux ;
- créer des groupes de recherche en mécanique théorique, de type GDR (groupement de recherche du CNRS) ;
- multiplier les rencontres scientifiques entre mécaniciens théoriciens et chercheurs d'autres disciplines ;
- créer au sein de l'Association française de mécanique un groupe scientifique ayant pour thème la mécanique théorique.

3.2. Mécanique et physique

3.2.1. Descriptif de la thématique

Plus que le thème scientifique étudié, ce sont les méthodes et les outils qui définissent la communauté mécanique-physique. En effet, les thématiques concernées sont multiples :

- rupture, fragmentation ;
- instabilités de structures minces et élancées, et matériaux granulaires. Alors que la perte de stabilité d'un système mécanique est généralement associée à sa ruine, les instabilités sont maintenant vues comme des outils de création de formes ou de fonctionnalités (par exemple en microfabrication ou microstructuration) ;
- vibrations non linéaires et turbulence d'ondes ;
- approches « physique statistique » du comportement des matériaux hétérogènes (inclusions, cavités) et vitreux ;
- morphogenèse et croissance, notamment en biologie ;
- effets de surface : les micro- et nanotechnologies font intervenir des effets de surface (capillarité, adhésions, électrostatique, etc.), effets habituellement négligés à l'échelle macroscopique et qui appellent une nouvelle modélisation. Par exemple, le dimensionnement des accéléromètres utilisés dans les smartphones est déterminé par la résistance aux forces de van der Waals ;
- matériaux : modélisation de mécanismes méso-échelle pour passer de la structure microscopique et moléculaire aux propriétés émergentes du matériau.

On assiste parfois à une revisite de problèmes anciens, mais avec une approche différente ou un éclairage nouveau ; par exemple le recours à des expériences légères, l'introduction de concepts venus de l'analyse mathématique ou de la

physique théorique. Il s'agit en général de décortiquer le problème pour comprendre le mécanisme à l'œuvre, plutôt que d'en simuler exactement le comportement. Le domaine de la mécanique physique est donc naturellement lié à la mécanique théorique.

L'interaction mécanique-physique est doublement féconde. L'approche « *curiosity-driven research* » souvent suivie par les physiciens peut produire de nouveaux concepts, ou du moins de nouvelles idées ; et l'approche « applicative » couramment suivie par les mécaniciens apporte constamment de nouveaux sujets d'étude.

Il s'agit principalement de mécanique des solides car en mécanique des fluides, il y a déjà un spectre continu d'approches et les chercheurs ont l'habitude d'interagir et de participer aux mêmes conférences.

3.2.2. Principales avancées de la thématique depuis le rapport Germain

Il s'agit là d'un thème émergent qui vient de la physique de la matière molle et de la physique non linéaire. Ce thème est soutenu par le CNRS, par exemple via le financement d'un GDR par deux instituts : INSIS (essentiellement section 9) et INP (essentiellement section 5), mais aussi par les sociétés savantes AFM et SFP qui ont une volonté de rapprochement. En témoignent les rencontres mécanique-physique organisées depuis 2009 sous l'égide du GDR MePhy, du CFM, ainsi que des JMC.

À noter de plus la mise en place du parcours « mécanique/physique » à l'intérieur de la spécialité « systèmes complexes » du master « physique et applications », cohabilité par l'ESPCI, Paris 6, Paris 7, Paris 11 et l'ENS Cachan.

3.2.3. Orientations ou réorientations nécessaires en fonction des enjeux

Le thème est émergent et il est préférable d'acquérir une certaine maturité avant de réfléchir aux (ré)orientations à donner.

3.2.4. Les verrous scientifiques et technologiques à lever

Il y a évidemment des verrous scientifiques particuliers dans chacun des thèmes. Nous citerons par exemple la difficulté d'accéder à une vraie compréhension des mécanismes à l'œuvre en fragmentation, la description en termes de physique statistique hors équilibre des systèmes désordonnés, la complexité des bifurcations dans les systèmes non linéaires, la modélisation de la croissance en biologie.

Néanmoins, une difficulté majeure de la mécanique physique est liée à l'interdisciplinarité. Il est par exemple nécessaire de surmonter les différences culturelles (de vocabulaire, d'outils techniques, d'approches), de trouver un espace de rencontre (revues scientifiques, conférences), mais aussi et surtout d'être vigilant quant au devenir des étudiants formés à l'interface (dans quelle discipline candidater, qualification CNU, reconnaissance, etc.).

Principaux laboratoires concernés :

– Institut d'Alembert (UPMC), IUSTI, X-LMS, LadhyX, LIMSI, LMA, UME-ENSTA, laboratoire Navier ENPC, LM3 ;
– FAST, PMMH, LPS-ENS, IRPHE, LIPHY, LOMA, IPR, MSC, SPEC (CEA), LP ENS-Lyon, PPMD/SIM-ESPCI.

3.2.5. Les enjeux scientifiques, industriels et sociétaux

Réussir à ce que les deux communautés échangent et s'enrichissent des outils et de la culture de l'autre.

Mieux comprendre les phénomènes physiques, afin d'arriver à des modèles aussi profonds et simples que possible, car c'est à partir d'une compréhension de fond que peuvent naître des idées nouvelles.

L'approche mécanique physique touche aussi la problématique industrielle : stabilité de procédés de laminage de tôle, de formation d'une nappe visqueuse de verre fondu, problèmes des câbles de forage pétrolier (forage horizontal), répartition des tailles lors du broyage (de combustible, de granulats, etc.), rupture et déchirures de structures minces (pour l'ouverture facile d'emballage ou dans l'aéronautique), contrôle de la force d'adhésion par microstructuration du support, adaptation d'adhésif aux supports courbés, mais aussi étude des motifs de craquelure de peinture (utilisée en muséographie).

L'approche qu'ont les physiciens des problèmes industriels est souvent l'identification (avec les industriels) des questions fondamentales nécessaires pour lever des verrous technologiques. Le but est donc de rester dans la science fondamentale tout en étant guidé par l'actualité des évolutions industrielles.

3.2.6. Les liens et concertations nécessaires avec d'autres disciplines

D'autres communautés se trouvent concernées par les problèmes à l'interface mécanique/physique :

– biologie végétale et animale (croissance des plantes et régulation mécanique de leur forme) ;
– biologie des tissus : rôle de la mécanique en morphogenèse, embryogenèse et oncogenèse (la croissance génère des contraintes, les contraintes induisent une réponse génétique de différenciation cellulaire et un changement du rythme de croissance) ;
– biologie cellulaire ou moléculaire (réponse mécanique d'une cellule ou d'un filament biologique, protéine ou ADN) ;
– géophysique (formation de méandres, plissements géologiques, ou bien étude des risques naturels : tremblement de terre, avalanche, éruption de volcan à partir des outils de la physique statistique couplés à la mécanique) ;

– physico-chimie (pour la conception et la compréhension de matériaux à base de polymères).

3.2.7. La position française par rapport à l'international

L'interface entre mécanique et physique se développe aussi aux États-Unis et au Royaume-Uni.

Aux États-Unis, on remarque par exemple l'initiative de rapprochement thématique entre mécanique et physique par des sessions dévouées à la mécanique (« *extreme mechanics* »), organisées à la conférence annuelle de physique (APS March Meeting) par des équipes de Harvard et du MIT. Ces sessions, qui ont débuté il y a quatre ans, sont en pleine croissance.

La tradition anglo-saxonne des *Applied Mathematics* utilise souvent les outils d'analyse mathématique pour étudier des questions de physique et d'ingénierie, quelquefois allant même jusqu'à l'approche expérimentale modèle (DAMTP et Department of Engineering à Cambridge, Engineering Mathematics à Bristol, Department of Applied Mathematics au MIT, SEAS à Harvard).

Il y a néanmoins une particularité française due au rayonnement important des écoles de physique de la matière molle et de physique non linéaire. Ces deux écoles ont maintenu (une partie de) la physique sur des problèmes macroscopiques et des problèmes de matériaux (par opposition à la physique des particules, la physique quantique ou l'astrophysique). Cela explique en partie le fort attrait de la mécanique pour les physiciens français.

3.3. Modélisation des matériaux et des structures

3.3.1. Introduction

3.3.1.1. Volet procédés

Les procédés de mise en forme des matériaux métalliques font souvent appel à des grandes déformations inélastiques, en général accompagnées de grandes vitesses de déformation, hautes températures, frottement sévère, mécanismes de restauration, recristallisation, transformations de phases, texturations morphologiques et cristallographiques… Toute la richesse thermomécanique est réunie dans la plupart des procédés, où les propriétés induites par le procédé lui-même jouent un rôle essentiel dans le comportement ultérieur du composant, allant jusqu'à sa durée de vie.

La construction de modèles prédictifs nécessite une modélisation multiéchelle et multiphysique adéquate pour décrire le comportement thermomécanique qui est souvent couplé avec des mécanismes d'endommagement ou de rupture, des transformations métallurgiques, des conditions de frottement et de contact, et d'autres couplages quand il s'agit de prendre en compte l'interaction rayonnement-matière (laser, faisceau d'électrons, effet d'irradiation…) ou les effets électromagnétiques.

3.3.1.2. Volet matériaux

La mécanique a investi les différentes échelles de fonctionnement des matériaux. Elle a intégré de nombreuses observations physiques pour proposer des modélisations et des expérimentations multiéchelles allant des géosciences aux nanosciences. La France occupe depuis trente ans une position privilégiée pour réaliser la jonction entre les sciences mécaniques et les sciences des matériaux. Les propriétés mécaniques des matériaux représentent une préoccupation essentielle des physiciens et chimistes des matériaux, qui coopèrent étroitement avec les mécaniciens des matériaux. Il est important de conserver cette spécificité française de fertilisation entre ces deux communautés en évitant les tendances actuelles à un retour aux découpages disciplinaires. Une telle fertilisation est en cours en ce qui concerne la mécanique des matériaux du vivant, mais elle reste encore trop dispersée. Elle représente à coup sûr un enjeu pour l'avenir.

3.3.1.3. Volet structures

La mécanique traditionnelle des structures reste une discipline en plein développement. La théorie et l'architecture des corps élancés (plaques, coques...) est foisonnante et donne lieu à des travaux originaux. Le calcul de structures a pris une ampleur considérable, aussi bien dans la recherche que dans l'industrie. Il fait appel au calcul intensif et aux couplages multiphysiques (thermique, fluides, diffusion chimique, dynamique moléculaire, dynamique des dislocations, etc.). Il s'accompagne aujourd'hui d'un fort courant de développement de méthodes de simplification et de réductions de modèles très prometteur pour l'applicabilité des nouvelles méthodologies aux applications industrielles. Les structures considérées vont des objets du génie civil et des transports aux micro- et nanostructures de la microélectronique.

3.3.2. Un état de l'art s'appuyant sur des états de conjoncture ou avis récents

Bien que, par le passé, les modèles aient été dépouillés volontairement d'une partie de leur richesse intrinsèque du fait des difficultés pratiques d'identification expérimentale des paramètres associés ou de la réalisation, à des coûts acceptables, de leur simulation numérique, les avancées récentes dans le domaine des techniques expérimentales de caractérisation ainsi que celles associées à la performance des simulations numériques (auxquelles un chapitre a été consacré) ont permis, à nouveau, d'enrichir les modèles, et ce à toutes les échelles. Que ce soit à l'échelle de la dynamique moléculaire, de la mécanique des dislocations, de la plasticité cristalline ou des éléments discrets… Au niveau macroscopique, les modèles deviennent eux aussi de plus en plus riches, permettant un dialogue avec les échelles inférieures, via la notion de champs observés, mesurés, simulés ou modélisés. Ces dialogues et développements méthodologiques nourrissent, là encore, des approches complémentaires définies à partir de ces mêmes champs mécaniques et de la notion de volume élémentaire représentatif. Enfin, même quand leur nature est purement phénoménologique, les modèles s'inscrivent de plus en plus dans le

cadre de théories de milieux continus généralisés tenant compte naturellement de diverses longueurs internes représentatives des phénomènes dissipatifs et de leurs interactions avec les microstructures constitutives des matériaux.

Quand il s'agit de matériaux composites, le caractère multiéchelle, l'hétérogénéité à l'échelle microscopique, l'anisotropie et son évolution lors du procédé d'élaboration retenu, les forts endommagements que les renforts subissent lors des drapages sévères, le frottement entre les différents plis, etc., viennent encore enrichir une réalité déjà complexe, où le déterminisme doit laisser sa place à l'incertain et à la notion de modèles probabilistes à tous les niveaux, toutes les physiques et toutes les échelles.

La mécanique des solides s'appuie actuellement sur l'utilisation conjointe d'outils théoriques sophistiqués, de méthodes expérimentales complexes faisant appel largement aux mesures de champs et de calculs intensifs systématiques. Il est remarquable de constater, malgré la complexité de chaque discipline, que de nombreux jeunes chercheurs possèdent aujourd'hui l'expertise d'au moins deux de ces composantes, souvent les trois. Leurs travaux conduisent à un véritable renouveau de la mécanique des solides avec un pouvoir d'attraction fort pour les étudiants.

Pour plus de détails, il suffit de s'adresser au rapport de conjoncture de la section 09 du CNRS ou bien au rapport du Blue Ribbon (« Simulation-Based Engineering Science. Revolutionizing Engineering Science through simulation », T. Oden et al., NSF report, February 2006, Blue Ribbon Panel on Simulation Based Engineering Science).

3.3.3. *Les nécessaires orientations scientifiques en fonction des enjeux*

- Modélisation basée sur des modèles physiquement fondés et de plus en plus couplés ;
- développement de matériaux à architecture et microstructure contrôlées, où le matériau lui-même sera un produit de la conception dans l'optique d'une approche multifonctionnelle intégrée ;
- description fine de la mécanique de matériaux aux échelles pertinentes et définition de passerelles entre les différentes échelles d'espace et de temps (prise en compte des effets de vieillissement, d'environnement, de l'évolution des propriétés mécaniques du matériau au cours de sa durée de vie) ;
- calculs de structures industrielles intégrant les non-linéarités du comportement des matériaux, en particulier les aspects plasticité, amorçage et propagation de fissure, durée de vie sur des chargements complexes notamment cycliques ;
- intégration de ces différentes physiques et échelles dans les modèles, permettant ainsi de décrire avec la précision nécessaire la mécanique des matériaux, vitale pour la conception de produits, systèmes et procédés.

3.3.4. Les verrous scientifiques et technologiques à lever

- Robustesse des techniques de changement d'échelle en non-linéaire et en mécanique de la rupture, avec la transition endommagement/rupture ;
- vision unifiée essais/mesure de champs/calcul qui permettrait de révolutionner le pilotage des essais, mais également de contourner de nombreuses difficultés dans les lois de comportement en éliminant les artefacts expérimentaux. Meilleure maîtrise des conditions aux limites imposées à la cellule modélisée (conditions macroscopiques, homogénéisées, périodiques, fluctuations statistiques, etc.) ;
- couplages efficaces de modèles, d'échelles et de descriptions, notamment pour une description plus systématique du vieillissement des matériaux ;
- prévision du vieillissement des matériaux sous diverses sollicitations (chargement thermomécanique, environnemental, chimique, irradiation) qui reste un problème d'une actualité brûlante. Ainsi, même pour des matériaux fonctionnels, matériaux pour l'électronique par exemple, le choix final se fait souvent sur des critères de tenue dans le temps. Ce problème recouvre bien évidemment les problèmes de durée de vie, comme par exemple celle des centrales nucléaires ou l'étude du comportement à long terme des sites d'enfouissement, mais se retrouve avec une même acuité dans beaucoup d'autres domaines. Établir des protocoles expérimentaux, puis des critères et règles d'extrapolation constituent des défis importants ;
- tenue en fatigue des composites, ou plus généralement de matériaux multiphasés, problème multiéchelle s'il en est, qui va également se poser avec la généralisation des matériaux sur mesure (dont les composites).

L'activité sur les lois de comportement par changements d'échelle par simulation d'éléments de volume ne pourra être utilisée pour le dimensionnement que par recours à des méthodes de réduction de modèles. Comment utilise-t-on un calcul de dynamique moléculaire dans un calcul de structures, à part le calage de paramètres dans une loi présupposée ? La réduction de modèles, pratique relativement courante dans d'autres domaines (traitement d'images, statistique, mécanique des fluides) se développe en mécanique des structures mais mériterait d'être systématiquement explorée en mécanique des matériaux solides.

Avec le développement de la simulation numérique, une question importante est celle de la quantification des incertitudes dans la chaîne essais/modèles/calculs. Les sources d'incertitude sont nombreuses à tous les étages de cette chaîne et le degré de confiance que l'on peut avoir dans les résultats d'une simulation relève pour une large part de l'art de l'ingénieur. Les travaux sur la quantification des incertitudes qui se développent actuellement méritent d'être amplifiés, non seulement sur le plan théorique, mais également dans la boucle essais/calculs/recalage.

Enfin, les développements futurs des moyens expérimentaux ainsi que de l'architecture des calculateurs entraînera certainement des évolutions dans la forme même des lois de comportement (et donc dans leur formulation).

3.3.5. Les laboratoires concernés

Les équipes sont nombreuses, couvrant la quasi-totalité de la carte de la France, grandes écoles, universités et grands établissements de recherche. Il faut également souligner les grands pôles ainsi que les nombreux réseaux dans différents domaines de compétence.

Les laboratoires sont en forte interaction avec le tissu industriel local, national, voire international, mais aussi avec les groupes de recherche en physique, chimie et mathématiques appliquées.

3.3.6. Les enjeux industriels et sociétaux par domaines d'application

- Concevoir mieux les produits, les systèmes et les procédés de fabrication ;
- concevoir de nouvelles fonctionnalités à travers la conception des matériaux eux-mêmes ;
- prédire mieux l'évolution de leurs propriétés tout au long de leur durée de vie.

Les liens et concertations nécessaires avec les autres disciplines
- Mécanique des fluides,
- mathématiques appliquées,
- science des matériaux,
- physique,
- thermique,
- chimie.

3.3.7. La position française par rapport à l'international

La communauté française est particulièrement bien structurée et active dans le domaine de la mécanique des matériaux, des procédés et du calcul de structures.

Au niveau national, avec la mise en place d'une commission AFM sur le formage virtuel, sur le soudage, le FSW… À souligner aussi l'existence de plusieurs GDR CNRS autour de la mise en forme de composites, la mécanique des textiles, la mesure de champs, etc., ainsi que la création et les animations de la communauté par différentes associations : AMAC, CSMA, MECAMAT…

Les fortes collaborations industrielles témoignent de la qualité de la recherche française dans le domaine, qui se traduit aussi par un nombre important de projets de recherche dans la thématique matériaux et procédés de l'ANR.

Le rayonnement international de la mécanique des solides française se mesure grâce à divers facteurs :

- des travaux de référence dans le domaine de la formulation des lois de comportement, des changements d'échelle, de l'interaction fluide/structure, de la réduction de modèles, des mesures de champs, des essais multiaxiaux (la liste est loin d'être exhaustive) sont cités internationalement ;

– l'école française de mécanique des solides est caractérisée pour une approche parfois un peu plus théorique que celle d'autres pays, mais qui finit par être reconnue sur le long terme ;
– la présence de mécaniciens français dans les comités éditoriaux des grands journaux de la discipline (IJNME, CMAME, JMPS, IJSS...) et les différents comités des organisations internationales de la discipline (IUTAM, EUROMECH, ESAFORM entre autres) ;
– des invitations à donner des conférences plénières aux congrès des grandes conférences internationales, notamment ICTAM, EUROMECH Solid Mechanics Conference, ECMM, ECCOMMAS, WCCM, parmi tant d'autres ;
– une participation très active aux congrès internationaux.

Néanmoins, même si la mécanique des solides française peut faire valoir des spécificités et une vitalité propres, la recherche y est largement internationale et les échanges avec d'autres pays sont nombreux, qu'ils soient établis sur une base individuelle, ou par le biais de conventions d'échange ou de contrats à plusieurs partenaires. C'est certainement une tendance qui va s'amplifier.

3.3.8. Recommandations et perspectives

Privilégier l'innovation et les ruptures scientifiques par rapport aux recherches incrémentales ne visant que de légères améliorations de l'existant, proposer plutôt que suivre ! Cette innovation a besoin d'une transversalité qui doit être mise en avant entre les mécaniciens des solides, des fluides, les thermiciens, électromagnéticiens, physiciens, chimistes, etc., entre théories, simulations et essais, entre observations et mesures, etc., cherchant le bon équilibre entre fondamental et applicatif.

Être présent dans les comités internationaux pour représenter l'ensemble de la recherche française avec ses spécificités et ambitions, dans les instances de normalisation des nouveaux essais ou nouvelles méthodes de mesure, standardisation des mesures de champs cinématiques.

Insister sur le volet communication de la mécanique des solides en montrant des applications grand public. Des modélisations (réalisations) dans le domaine spatial ou encore aux nanoéchelles pourraient avoir un grand intérêt.

La mécanique des solides est une discipline établie d'assez longue date. Sa marge de développement la plus spectaculaire se situe donc à ses interfaces. Trois domaines méritent d'être cités explicitement, notamment en raison de leur intérêt sociétal (mais la liste des interfaces pourrait s'allonger) :

– la géophysique et les risques environnementaux : la sismique et la tectonique font un usage massif de la mécanique des solides (et y ont d'ailleurs contribué). D'autres progrès peuvent être attendus d'une interaction avec les géophysiciens sur les méthodes de simulation en dynamique, sur l'identification fine des lois de comportement et de frottement, sur les problèmes inverses et sur les instabilités ;
– la mécanique du vivant : initialement centrée sur la biomécanique des os et des articulations (pour les solides), on observe une descente dans les

échelles (tissus, cellules). Mais ce domaine ouvre également de nouveaux couplages et donc de nouvelles perspectives ;
– les nanomatériaux. Aux échelles les plus petites, les effets de surface/volume sont essentiels et les modèles avec longueur interne trouvent ici un terrain d'application idéal. Ils doivent être confrontés avec des essais in situ et une interaction avec les physiciens est indispensable.

Pour autant, le cœur de discipline ne doit pas être délaissé. Entre autres, les problèmes évoqués au paragraphe « verrous » doivent faire l'objet d'une attention particulière (vieillissement, réduction de modèles, incertitudes…) en raison de leur intérêt à court et moyen termes. Ils ne seront pas repris ici.

Il faut également veiller à faire avancer le corpus de connaissances théoriques de la discipline. C'est à ce prix qu'elle restera vivante et continuera d'irriguer les disciplines voisines. La France est en pointe dans ce domaine mais risque de ne pas le rester. Au cours des vingt dernières années, il est clair que des progrès pratiques significatifs ont été rendus possibles par des avancées initialement motivées par l'avancement de connaissances purement théoriques (on peut citer l'homogénéisation, mais aussi la morphologie mathématique, les théories non locales, les systèmes dynamiques en lien avec l'apparition de microstructures, etc.). Même s'il est plus difficile de justifier le maintien d'un effort dans ce domaine par des retombées immédiates, celui-ci est indispensable et doit être encouragé par des mécanismes de financement appropriés.

Un atout de la mécanique française est le fait qu'elle soit enseignée à haut niveau dans les écoles d'ingénieurs qui forment une part importante des décideurs de demain. Cette culture scientifique de nos cadres nous est enviée par nos collègues outre-Atlantique par exemple. Elle doit être encouragée. La recherche en mécanique se portera bien dans la mesure où l'enseignement de la discipline continuera d'être reconnu et intégrera les derniers développements de la discipline.

La recherche, en mécanique des solides comme ailleurs, se développera de plus en plus au travers de partenariats internationaux, notamment avec des pays dont l'activité industrielle est en fort développement, comme les pays d'Asie. Pour y figurer convenablement et y tenir notre place, nous devons affirmer et renforcer nos points forts (pour certains listés ci-dessus).

3.4. Mécanique et incertain

3.4.1. Une thématique aux origines anciennes

Face à la nécessité d'assumer les risques résultant de ses inventions, c'est d'abord vers les dieux que l'Homme s'est tourné. Hammourabi a promulgué en 1755 avant notre ère un code qui impliquait une sanction « œil pour œil dent pour dent » dans le cas où l'usager serait victime d'un défaut de construction. Les progrès du raisonnement, du calcul et de l'observation de la nature ont, petit à petit, substitué à la sanction l'idée d'une prévisibilité des événements modélisés par des algorithmes mathématiques. C'est ainsi que Kepler publia en 1609 ses célèbres lois

établissant la trajectoire elliptique des planètes autour du Soleil, puis que Galilée publia en 1638 ses discours sur deux sciences nouvelles qui constituent une introduction à la modélisation en mécanique. Le succès de ces théories laissa croire que la nature pouvait être mathématisée par des constructions de modèles de plus en plus perfectionnés et bien des chercheurs suivirent cette voie jusqu'à se persuader, à la fin du XIX^{e} siècle, que la science était achevée, à quelques détails près.

De son côté, Girolamo Cardano (1501–1576) fut à la fois mécanicien et mathématicien, mais aussi joueur. Il proposa la première ébauche de ce qui est devenu la théorie des probabilités sous le titre « Liber de ludo aleae ». Blaise Pascal (en 1654) discuta le hasard dans les jeux économiques en introduisant l'incertain. Or, quand on travaille pour demain et pour l'incertain, on agit avec raison, car on doit travailler pour l'incertain par la règle des partis qui est démontrée. Il inventa le très beau terme de géométrie du hasard qui signifie que le hasard existe, mais qu'il a une structure, terme devenu aujourd'hui théorie des probabilités, c'est-à-dire théorie de la preuve, alors qu'elle ne prouve rien. Dès 1776, Buffon fait le lien entre statistique et fiabilité pour s'assurer de la performance de poutres en bois.

Pour le mécanicien concepteur de produits, de structures et de systèmes, le premier héritage a conduit à ce qu'il est possible d'appeler l'erreur déterministe. Quant au second héritage, il a longtemps été ignoré, sauf de manière très ténue à travers l'élaboration des coefficients dits de sécurité. La théorie des probabilités, de son côté, introduit également une erreur d'interprétation : l'erreur ludique, car elle n'est parfaite que pour les jeux dont les règles sont parfaitement définies.

Henri Poincaré (*Science et Méthode*, 1903) brisa au début du XX^{e} siècle les certitudes déterministes de la modélisation du système solaire, pourtant si parfait car observé sur une période infiniment courte par rapport à son âge. L'erreur déterministe était mise en évidence par la sensibilité aux conditions initiales : une cause très petite, qui nous échappe, détermine un effet considérable que nous ne pouvons pas ne pas voir, et alors nous disons que cet effet est dû au hasard. Cette réflexion donna naissance au chaos déterministe mais laissa Poincaré disciple de Laplace : rien ne serait incertain à une intelligence qui connaîtrait toutes les forces de la nature. Il faudra attendre Von Neumann et Wiener pour le chaos stochastique. En ingénierie également, l'acception du hasard, même structuré, fut l'objet de fortes oppositions puisque Le Chatelier déclarait en 1924 que le hasard offre une échappatoire aux incompétents qui rechignent à entreprendre la démarche scientifique.

Pourtant, des ingénieurs s'interrogeant sur la prise de risque introduisent des notions statistiques (M. Mayer, en 1926, pour les constructions) dans l'expertise des variables de conception, une exigence sur le taux d'accidents d'un aéronef (A. Grenville Pugsley, vers 1930) ; des lois de probabilité (R. Levi, en 1949 ; A.R. Rjanitzyne, en 1949). A.M. Freudenthal (en 1949) appela à placer le concept de la sûreté des structures dans le royaume de la réalité physique, où il n'y a pas d'absolu et où la connaissance n'est pas parfaite. Constatant la répartition aléatoire des défauts d'amorçage, W. Weibull (en 1951) plaça la rupture dans un cadre probabiliste, ouvrant ainsi la voie à la fiabilité mécanique.

Ce contexte, mais aussi la puissance de calcul des ordinateurs, sont à l'origine des recherches de la seconde moitié du XX^{e} siècle, qui ont conduit aujourd'hui à un important développement de la mécanique probabiliste et de son application à la fiabilité et à l'analyse de risque. Il est aussi à la source de réflexions d'ingénieurs comme J.C. Ligeron et C. Marcovici (en 1974) ou A. Villemeur (en 1988) s'interrogeant sur la prévision de la sûreté de fonctionnement des composants électroniques puis mécaniques.

De son côté, la théorie des probabilités devenait, sous l'impulsion de A.N. Kolmogorov (1903–1987), un outil mathématique rigoureux dont s'emparèrent les économistes qui furent alors confrontés à l'erreur ludique : en économie, encore moins qu'en mécanique, la règle du jeu n'est pas connue.

Le document « Les sciences mécaniques et l'avenir industriel de la France », publié en 1980 par l'Académie des sciences, appelait à la constitution d'équipes scientifiques où se rencontrent à niveau égal des compétences en mécanique et en probabilités. Trente ans après, cet appel n'a été que partiellement entendu et, aujourd'hui, il est à renouveler en rappelant que mécanique et probabilités ne sont pas suffisantes. Les enjeux de la conception, mais aussi ceux de l'exploitation, de la maintenance et de la durabilité, se placent dans un incertain auquel les probabilités seules ne peuvent répondre pour satisfaire à la prise de risque tant dans les domaines techniques, économiques que sociétaux.

Mécanique et probabilité sont évidemment liées dans le modèle physique standard, mais il ne s'agit pas d'une échelle d'observation que revendique la mécanique concernée par ce document. Quant à savoir si le hasard existe, c'est un débat philosophique. Nous devons être ici Eulériens et non Lagrangiens. Placés au XXI^{e} siècle, nous observons le cours d'événements qui nous semblent hasardeux, car il est impossible de reconstruire leurs trajectoires. Une démarche scientifique de l'incertain en mécanique reste à construire.

3.4.2. Un état de la thématique et ses verrous scientifiques

Il faut tout d'abord rappeler toute l'importance de la compréhension des phénomènes physiques, de leur observation et de la qualité des mesures associées. Il en résulte tout le champ d'investigation des modèles de comportement et de leurs paramètres pour lesquels la communauté mécanicienne déploie beaucoup d'énergie, sans se préoccuper suffisamment des domaines de validité et des biais : le surapprentissage s'oppose à la généralisation. Le mécanicien de l'incertain est client des meilleurs modèles prévisionnels à condition que leur soient associés un domaine de définition et une mesure de l'incertitude sur les paramètres. Une question essentielle est celle de l'écart de modèle (souvent improprement appelé erreur de modèle). Le modèle opérationnel résulte de la solution numérique approchée de la mathématisation de la physique, également approchée et elle-même perçue et recalée par rapport à des mesures incertaines. Comment représenter cet écart sur tout le domaine de définition du modèle compte tenu de l'accumulation des différents écarts depuis la réalité physique inaccessible jusqu'à la

représentation virtuelle de cette physique alimentée par une paramétrisation, ou parfois même une résolution entachée d'incertitudes ?

3.4.2.1. Verrou 1 : connaissance incertaine des modèles de comportement et de leurs paramètres

Introduire l'incertain sur les paramètres des modèles de représentation de la physique en insistant sur l'impérieuse nécessité d'associer les essais aux modèles et en proposant un langage commun et unifié entre le mécanicien des essais et le mécanicien numérique pour qu'ils s'élèvent ensemble, le premier dans la simulation expérimentale et le second dans les essais virtuels.

La mécanique de l'incertain s'appuie sur des données ou paramètres. Le premier enjeu est de savoir traiter ces données en leur attribuant une représentation mathématique. L'information résulte de deux directions d'approfondissement : la première est motivée par des mesures de plus en plus fines et de plus en plus nombreuses, et la seconde par le processus de décision. Citons quelques modèles : valeur d'expertise, nombre flou, possibilité et nécessité, mesures d'évidence, boîte de probabilité et enfin variable aléatoire, champ aléatoire sur l'espace et processus stochastique sur le temps. La liaison entre information et modèle est effectuée dans une entité de connaissance évolutive. Le modèle probabiliste n'est alors qu'un niveau de connaissance parmi d'autres et s'appuie sur l'interprétation statistique des données, qui reste un puissant outil pour lequel les mécaniciens doivent imposer aux statisticiens une modélisation tenant compte du nombre des données, souvent faible, et des contraintes d'admissibilité physique.

3.4.2.2. Verrou 2 : modélisation des paramètres incertains

Explorer tous les modes de représentation de l'incertain (de la valeur d'expertise aux probabilités) en fonction de l'objectif visé, en s'attachant à représenter les dépendances entre données, dans l'espace et dans le temps, sans introduire d'information supplémentaire. Savoir associer aux modes de représentation un niveau de confiance : ne jamais fournir une valeur chiffrée sans une analyse de sa signification (calcul dit d'erreur, intervalle de confiance).

Le modèle de connaissance des variables et des paramètres est un enjeu essentiel qui appelle une coopération étroite entre les spécialistes de l'information (dont les statisticiens) et les mécaniciens en fonction des objectifs de décision sous-jacents. Il est associé aux modèles du comportement physique et de leurs représentations algorithmiques. Le couplage connaissance/comportement est l'entrée des deux modèles de propagation constituant l'analyse de sensibilité et celle de fiabilité, qui permettent le calcul de variables d'intérêt (valeurs de référence) résultant des variables de conception. L'analyse de sensibilité s'intéresse au caractère incertain des variables d'intérêt, qui prend tout son sens lors d'une optimisation robuste de la conception, alors que l'analyse de fiabilité étudie les scénarios conduisant à des valeurs inacceptables de variables d'intérêt. Ces deux analyses sont liées, mais des méthodes appropriées permettent une implémentation économique de l'une ou l'autre. Les mathématiciens des probabilités et des

techniques de classification ont permis, ces dernières années, de grands progrès méthodologiques lorsque la connaissance est probabilisée : chaos polynomiaux, séparateurs à vaste marge (*Support Vector Machine*), classification par krigeage, méthodes d'approximation et métamodélisation, approches non paramétriques. Si les principes existent, leur implémentation numérique reste extrêmement lourde au-delà des exemples académiques lorsque des applications industrielles en grande dimension stochastique sont visées. S'il existe aujourd'hui des avancées remarquables en propagation probabiliste, il n'est pas toujours possible, ni même utile, de disposer d'un tel outil selon la nature de la décision à prendre et les conditions de son acceptation relevant de la nécessaire réflexion pluridisciplinaire (ingénieur, économiste, sociologue, philosophe, juriste).

3.4.2.3. Verrou 3 : propagation de l'incertain dans les modèles en relation avec la décision

Construire les algorithmes de propagation dans les espaces de représentation de l'incertain probabilisés ou non, en tenant compte de la dimension et de la complexité nécessaires à des applications. Savoir analyser les résultats obtenus en fonction de la décision à prendre.

Les produits technologiques sont des systèmes complexes mettant en jeu des éléments observés à différentes échelles (micro, méso, macro) aux multiples interactions. La propagation de l'incertain d'une échelle à une autre, d'un composant à un autre, d'une technologie à une autre est un enjeu essentiel de la sûreté de fonctionnement et de l'ingénierie des systèmes afin d'anticiper les risques et de démontrer les performances recherchées durant tout le cycle de vie du produit. Ces performances concernent la disponibilité, la maintenabilité et la fiabilité, ainsi que la sécurité, c'est-à-dire l'aptitude d'un système à ne pas causer de dommages tant aux biens qu'aux personnes, et de plus en plus à l'environnement. À celles-ci s'ajoutent également des performances fonctionnelles (la consommation de carburant, le coût, une vitesse, etc., par exemple). Ces dernières sont alors appréhendées par la simulation (multiphysique, systèmes…). La réponse s'effectue par la démonstration de la performance d'une part, et par les plans de prévention des risques d'autre part. Cette approche globale performance/sécurité/sûreté reste aujourd'hui peu prise en compte par les mécaniciens. Sans aller jusqu'à revendiquer une recherche en cindynique (science des dangers), qui relève d'autres champs disciplinaires, une acculturation des mécaniciens est indispensable dès que des systèmes complexes sont mis en jeu.

3.4.2.4. Verrou 4 : approche globale de la performance

Construire la représentation multicomposants, multiéchelles et multiphysiques de la propagation de l'incertain intégrant toutes les dimensions de la chaîne de conception, de fabrication et du cycle de vie.

Cette section a rappelé les quatre principaux enjeux pour aller vers une science de l'incertain en mécanique. Les chercheurs mécaniciens sont appelés à mobiliser leurs talents en relation avec les autres acteurs des disciplines concernées.

Il reste à examiner un verrou essentiel. Il s'agit de celui de la formation des esprits dans un système éducatif où la quasi-totalité des disciplines ne parle que de certitudes. Les premiers textes en discussion sur les futurs programmes des classes préparatoires laissent espérer une ouverture sur un enseignement des probabilités en espace fini, moins dogmatique mais plus calculatoire, donc plus accessible à un grand nombre. Les probabilités ne sont pas tout, il faudrait ensuite que les concepts de systèmes mécaniques et de sûreté de fonctionnement, c'est-à-dire de la technologie, soient placés à un niveau égal à ceux relevant des comportements mécaniques.

3.4.2.5. Verrou 5 : enseignement

Revisiter l'enseignement des probabilités et introduire celui de la sûreté de fonctionnement des systèmes, en allant de l'objet et de ses enjeux aux mathématiques et non l'inverse... car alors l'objet n'apparaît plus.

3.4.3. Les laboratoires et centres concernés

Cette liste est restreinte à des laboratoires publics relevant de la mécanique qui ont une activité spécifique dans le domaine.

Centre des matériaux de l'École des Mines (UMR 7633), Evry ; Institut Clément Ader (EA 814), Toulouse ; Institut de Mécanique et d'Ingénierie (UMR 5295), Bordeaux ; Institut Pascal (UMR 6602), Clermont-Ferrand ; Institut de recherches en Génie civil et Mécanique (UMR 6183), Nantes ; Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique industrielles et Humaines (UMR 8201), Valenciennes ; Laboratoire de Conception, Fabrication Commande (EA 4495), Metz ; Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (UPR 7051), Marseille ; Laboratoire de Mécanique des Structures Industrielles Durables (UMR 8193), Clamart ; Laboratoire de Mécanique des Sols, Structures et Matériaux (UMR 8579), Chatenay-Malabry ; Laboratoire de Modélisation et Simulation Multi Échelle (UMR 8208), Marne-la-Vallée ; Laboratoire d'Optimisation et Fiabilité en Mécanique des Structures, Rouen ; Laboratoire Roberval (UMR 7337), Compiègne.

3.4.4. Les enjeux sociétaux et industriels

La société attend de l'industrie des produits performants, robustes et fiables, sans que ces deux derniers termes ne soient véritablement différenciés. La robustesse peut être rattachée à l'analyse de sensibilité et traduit le comportement du système mécanique autour de la position nominale de fonctionnement et sa capacité à s'adapter ou à être tolérante à de faibles écarts ou incertitudes avant sa réalisation. La fiabilité traduit la confiance que l'on a dans l'intégrité de la fonction du système mécanique, dans la continuité de service de la fonction. Les méthodes de traitement de l'incertain sont des outils essentiels pour satisfaire ou améliorer la robustesse et la fiabilité. Mieux encore, ils contribuent à une meilleure gestion de la maintenance, pour une économie de moyens tout au long du cycle de vie. La société attend aussi la sécurité vis-à-vis des systèmes industriels. Si la méthode

probabiliste ne peut pas garantir une sûreté absolue, elle contribue à mieux analyser les causes potentielles et elle est même invoquée par la loi du 30 juillet 2003 sur les risques industriels.

Les enjeux industriels concernent tous les métiers dans lesquels un produit est conçu pour assurer l'équilibre entre une ressource et un besoin, sachant que la ressource résulte souvent d'une fabrication avec certaines tolérances et le besoin d'un cahier des charges imposé par l'utilisateur ou la nature. Citons quelques exemples.

- Environ 80 % des ruptures mécaniques sont initiées par un phénomène de fatigue s'amorçant sur un état de surface aux défauts aléatoires.
- La stabilité des structures élancées dépend fortement des défauts géométriques.
- Les actions naturelles (séisme, houle, vent...) sont essentiellement aléatoires et les modèles les décrivant souvent rudimentaires ; de plus, la physique est susceptible d'évoluer en fonction du réchauffement climatique.
- Les matériaux comme le sol sont susceptibles de subir de fortes variations de leurs propriétés.
- Même pour des matériaux plus élaborés, les résistances des pièces dépendent de l'organisation aléatoire des phases cristallines et de l'existence de joints.
- Les tolérances de fabrication ne sont que des exigences dont la satisfaction est essentielle pour l'atteinte des objectifs de qualité d'un système.
- Les règlements de calcul définissent des coefficients partiels calibrés sur les méthodes probabilistes.
- Les marges induites par l'application des règlements impliquent un conservatisme parfois excessif, parfois insuffisant.
- La maintenance s'appuie sur une analyse des situations et une prévision des niveaux d'endommagement. Un modèle de traitement de l'incertain permet de prévoir une maintenance adaptée et non systématique.

Toutes les industries mécaniques sont concernées : industries de processus, construction mécanique (automobile, aéronautique, navale), construction civile, soit directement, soit à travers des procédures résultant d'analyses de l'incertain dans les codes de calcul ou des bases de données.

La maîtrise de l'incertain est un atout maître pour la détermination des marges résiduelles tout au long de la durée de vie et pour l'innovation. Si les évolutions lentes peuvent s'appuyer sur une faible extrapolation des conditions connues, il n'en est pas de même dans les stratégies de rupture pour lesquelles une analyse approfondie de la prise de risque est indispensable et autorise le concepteur à oser.

3.4.5. Les liens nécessaires et concertations avec les autres disciplines

L'exposé n'a pas manqué de souligner les liens avec les disciplines des mathématiques (statistiques, probabilités, traitement de l'information), mais aussi avec celles de la physique et de la mécanique pour la compréhension des comportements.

Une recherche « mécanique et incertain » s'inscrit dans le cadre multidisciplinaire des sciences de l'ingénieur, à condition que celle-ci ne soit pas la juxtaposition de sciences mais l'interaction entre elles.

3.4.6. La position française par rapport à l'international

Lors de la session de 1984 du congrès ICOSSAR (International Conference on Structural Safety & Reliability), l'un des majeurs de la discipline, il y avait trois Français parmi les quelque 400 participants. ICOSSAR 2013 verra une participation française significative avec des prises de responsabilité dans l'organisation de mini-symposiums. La conférence ICASP (International Conference on Applications of Statistics and Probability) a été organisée à Paris en 1995. Le nombre de Français dans les comités scientifiques des revues progresse. Cependant, la position française reste en dessous de ce qu'elle pourrait être en raison, sans doute, d'une organisation de la recherche trop souvent basée sur la hiérarchie disciplinaire héritière d'Auguste Comte, qui a oublié la technologie. Dans d'autres pays, la position est plus pragmatique.

Soulignons également la question de l'enseignement des probabilités et de leur liaison à la fréquence des événements (réflexions de J. A. Calgaro, expert européen des codes de dimensionnement, lors de la conférence JFMS'10 à Toulouse, 24–26 mars 2010). Dans bien des pays, en particulier de culture anglo-saxonne, l'enseignement des probabilités et de la statistique part de l'expérimentation numérique, et non pas des axiomes. Cette approche est suffisante pour la pratique nécessaire, sans empêcher un approfondissement pour ceux qui le souhaitent, et positionne la probabilité comme une mesure et non comme un retour fréquentiel.

La communauté mécanique doit rechercher les clés pour progresser dans la connaissance des quatre verrous scientifiques identifiés et vaincre l'inertie culturelle soulignée par le cinquième verrou. Elle construira alors une véritable science de l'ingénieur par ses avancées et celles des disciplines associées.

3.5. Mécanique expérimentale des matériaux et des structures

3.5.1. Descriptif de la thématique

De façon générale, la finalité de cette thématique est de fournir une information sur le comportement réel des structures et des matériaux soumis à des chargements mécaniques ou environnementaux variés (température, humidité notamment). Disposer des capteurs adaptés aux chargements appliqués en divers endroits des éprouvettes testées permet d'accéder à la réponse réelle de ces dernières. L'information ainsi recueillie peut potentiellement servir à atteindre divers objectifs :

– un premier objectif est d'observer et de modéliser le comportement de matériaux avec des lois bien fondées et d'identifier les paramètres qui gouvernent

ces dernières. On parle alors d'essai de caractérisation. L'exemple le plus typique est sans conteste celui des essais mécaniques conduits de façon quasi routinière sur des éprouvettes de géométrie simple, le but étant alors de caractériser le comportement des matériaux testés. Typiquement, les lois et les paramètres identifiés associés lors de ces essais servent ensuite à alimenter des codes de calculs permettant d'estimer les champs habituels de la mécanique : principalement contrainte, déformation, déplacement ;

– un autre objectif peut être de valider des calculs effectués au préalable en réalisant un ou plusieurs essais sur une structure ou un élément de structure donné(e). On parle alors d'essai de validation. Dans l'esprit, il s'agit très souvent d'examiner si le comportement observé expérimentalement correspond bien à celui qui était prédit par le calcul, cela dans une certaine limite. Ces essais mobilisent souvent des moyens plus conséquents que les précédents ;
– un autre type d'essai peut être entrepris simplement pour statuer sur la qualité d'un produit, que ce soit lors de sa fabrication ou de sa vie propre. On parle alors d'essai non destructif puisque l'intégrité de la pièce testée doit être préservée. Par exemple, on peut rechercher l'apparition d'une fissure ou encore vérifier l'absence d'hétérogénéités au sein des pièces après leur fabrication. Les ultrasons, les capteurs par courant de Foucault, la thermographie infrarouge ou le ressuage constituent pêle-mêle des exemples classiques de techniques employées.

Les laboratoires de recherche pratiquent essentiellement les deux premiers types d'essais, alors que l'on trouve les trois types dans l'industrie, avec une distribution et un degré de finesse dans les mesures ou dans leur exploitation qui dépend fortement de l'activité concernée.

3.5.2. *État de l'art*

Concernant les deux premiers types d'essais abordés ci-dessus, on peut dire que les moyens employés pour les réaliser ont assez peu évolué pendant relativement longtemps, faisant finalement passer la mécanique expérimentale pour le parent pauvre de la mécanique au sens large en comparaison à d'autres secteurs comme le calcul des structures. Cette dernière activité a en effet bénéficié de l'évolution fulgurante des moyens de calculs liée aux progrès de l'informatique. À ce titre, elle a naturellement attiré vers elle de nombreuses forces vives pour alimenter ses propres réflexions et pour résoudre ses propres problèmes.

Certains moyens d'investigation expérimentale sont toutefois progressivement apparus au cours de ces deux dernières décennies, faisant évoluer cette vision de la mécanique expérimentale qui était alors quelque peu figée. Par exemple, l'avènement, l'amélioration, puis la diffusion progressive de moyens de mesure de champs entiers de déplacements, de déformations ou de variations de températures (dans une certaine limite bien sûr) en surface d'éprouvettes testées, voire en leur sein dans quelques cas, a récemment contribué à changer cette situation. En effet, le mécanicien expérimentateur dispose désormais, avec ces outils récents, d'une perception globale des grandeurs qu'il obtenait alors uniquement de façon

ponctuelle avec les capteurs classiques. Avec ces nouveaux moyens, l'information est également délivrée d'une façon similaire aux résultats de calculs par éléments finis, qui fournissent eux aussi des champs des grandeurs du mécanicien (déplacements, déformations, contraintes). Pour ces raisons, ces moyens de mesure diffusent actuellement rapidement au sein de la communauté. Ils attirent à ce titre une partie croissante de chercheurs et d'ingénieurs qui, au-delà des capacités propres à ces moyens d'investigation, y voient un intérêt lié à la proximité forte avec le calcul de structures au vu de la forme des résultats obtenus. Cette communauté y trouve alors une extension presque naturelle à des préoccupations émanant du calcul des structures.

En conclusion, on peut donc affirmer qu'avec la diffusion de ces moyens de mesure, la mécanique expérimentale des matériaux et des structures vit actuellement plus une vraie révolution qu'une simple évolution.

3.5.3. Les orientations nécessaires en fonction des enjeux

Une orientation sans doute forte à donner concerne la formation initiale des ingénieurs et techniciens pour y intégrer ces nouveaux moyens de mesure et les nouvelles procédures de caractérisation qui leur sont associés. L'examen du cursus proposé par certaines écoles d'ingénieurs montre que le mouvement est en marche, mais il convient de l'amplifier pour adapter la formation des futurs cadres à cette nouvelle donne.

3.5.4. Les verrous scientifiques et technologiques à lever

L'industrie adopte naturellement assez vite tout moyen d'investigation qui répond à une demande forte bien identifiée. Concernant les moyens de mesure évoqués ci-dessus, un frein à une plus large utilisation reste cependant lié à la quasi-absence de normalisation. Pour des raisons évidentes de traçabilité, cette normalisation est en effet indispensable pour qu'un nouveau moyen puisse être intégré dans un processus d'élaboration et de contrôle de pièces industrielles. Un enjeu fort est donc lié à la mise en place de normes qui puissent permettre d'atteindre cet objectif pour les moyens de mesure de champs évoqués ci-dessus.

Un autre verrou demeure également le dialogue qui reste insuffisant entre disciplines connexes, voire parfois entre activités différentes de la mécanique.

3.5.5. Les laboratoires concernés

Il n'est pas fréquent de voir la mécanique expérimentale affichée comme thématique de recherche en tant que telle dans les laboratoires. La raison en est qu'avec la mécanique expérimentale, on pense habituellement plus à une palette d'outils éprouvés destinés à rendre possible la caractérisation des matériaux et des structures qu'à une activité de recherche bien reconnue en tant que telle. À ce titre,

elle apparaît plutôt en filigrane dans la plupart des laboratoires dédiés à la mécanique des matériaux et/ou des structures, même si certains portent une attention plus poussée sur ces aspects.

3.5.6. Les enjeux industriels et sociétaux par domaine

Comme remarque générale, on peut dire que la mécanique expérimentale constitue l'un des maillons d'une chaîne plus grande visant à optimiser la conception des structures. Elle contribue donc à ce titre à diminuer l'emploi de matériaux et la consommation d'énergique fossile.

La caractérisation mécanique ne se limite pas seulement aux matériaux de l'ingénierie mécanique : les matériaux biologiques ou les tissus vivants sont également concernés. La logique suivie et la finalité restent les mêmes pour ces matériaux, mais les moyens d'investigation diffèrent naturellement.

3.5.7. Les liens et concertations nécessaires avec les autres disciplines

Comme l'instrumentation est sous-jacente aux préoccupations liées à la mécanique expérimentales, les voies de progrès passent souvent par une amélioration, voire la création *ex nihilo* des équipements et des logiciels concernés. Cela dit, l'utilisateur doit souvent façonner lui-même les outils dont il a besoin car aucune autre communauté ne les lui fournit généralement. Cela nécessite des interactions fortes avec d'autres disciplines des sciences de l'ingénieur, comme le traitement du signal, l'informatique, la vision par ordinateur ou encore la thermique, ainsi que par une appropriation, par les mécaniciens, des outils qui en émanent.

Au sein même de la mécanique, il faut aussi signaler que les frontières tendent à s'estomper, au moins pour certains acteurs, entre d'une part les activités relevant plus spécifiquement de la mécanique expérimentale en tant que telle, et d'autre part celles qui relèvent du calcul des structures. On note ainsi le développement d'essais qualifiés souvent d'hybrides car ils associent étroitement résultats de calculs et résultats expérimentaux, par exemple pour caler des modèles, mais aussi pour identifier des paramètres de loi de comportement par méthode inverse.

3.5.8. La position française par rapport à l'international

Concernant les équipements, la France dispose de quelques moyens originaux destinés à répondre à la demande industrielle concernant les essais sur structures de grande taille. On peut citer par exemple le CEAT à Toulouse pour les structures aéronautiques ou les plateformes d'essais du LCPC. Il existe également des moyens plus spécifiques, comme le manège de fatigue des chaussées localisé à Nantes ou encore les installations du CETIM. Il faut aussi signaler que la France héberge l'ESRF à Grenoble, l'un des trois synchrotrons les plus puissants au monde. Les sources de lumière qu'elle met à disposition sont utilisées de plus en plus fréquemment par des chercheurs souhaitant réaliser des mesures à cœur d'éprouvettes testées.

Les moyens de taille plus modeste sont bien répartis sur le territoire, notamment grâce aux laboratoires universitaires impliqués dans la caractérisation des matériaux et des structures.

Concernant le développement de moyens d'investigation de type mesure de champs de déplacements, de déformations ou de variations de température, la position française paraît relativement bien affirmée, ce qui est confirmé par le volume et la qualité des publications qui émanent des laboratoires nationaux.

3.5.9. Recommandations et perspectives

La mécanique expérimentale est actuellement en plein renouveau. On peut penser que l'imbrication avec d'autres domaines de la mécanique comme le calcul de structures va devenir plus étroite, favorisant ainsi l'essor de nouveaux concepts et de nouvelles procédures, qui feront appel à des expertises de plus en plus variées. Il conviendra bien sûr d'accompagner ce mouvement avec une formation adaptée des acteurs et des soutiens institutionnels en adéquation aux besoins.

3.6. Mécanique des matériaux composites

3.6.1. Descriptif de la thématique

Le titre de cette thématique évoque naturellement l'existence de difficultés posées par le comportement mécanique des matériaux composites et suggère que la mécanique classique des milieux homogènes continus rencontre certaines limites lorsque l'on s'intéresse aux matériaux composites. La mécanique des composites couvre un domaine plus étroit que celui des matériaux composites, mais elle est cependant un élément important pour leur développement et leur application à l'échelle industrielle. Elle inclut les thèmes suivants :

- endommagement/rupture,
- fatigue, fluage,
- modélisation du comportement mécanique.

Les difficultés dont il était question plus haut proviennent notamment du fait que les composites constituent un milieu hétérogène et discontinu, dont la microstructure et la structure sont complexes et déterminent le comportement mécanique. Afin de mieux faire comprendre les enjeux de la mécanique des matériaux composites, il est important de présenter dans un premier temps les matériaux composites, de façon à faire apparaître la diversité et la complexité des structures en fonction de la matrice et des renforts choisis.

Du point de vue mécanique, on considère qu'un matériau composite est un matériau hétérogène dont les propriétés sont supérieures à celles des constituants pris séparément, la matrice et le renfort. Cette définition privilégie les composites à renfort continu. Un troisième élément considéré comme un constituant à part entière en raison de son influence sur le comportement mécanique est la liaison fibre/matrice qui peut faire intervenir une interphase.

Les matériaux composites se répartissent en deux groupes selon l'intervalle de températures qu'ils sont capables de supporter : les composites structuraux pour les basses températures (< 100 °C) ; et les composites thermostructuraux pour les hautes températures.

Le rôle du renfort est de pallier les insuffisances de la matrice et diffère selon les propriétés de la matrice :

- matrices organiques : augmenter la rigidité ;
- matrices fragiles (céramiques, béton, intermétalliques) : augmenter la ténacité et la fiabilité ;
- matrices carbone : augmenter la rigidité et la résistance ;
- matrices métalliques : allègement tout en conservant des propriétés mécaniques élevées.

Le mode de renfort peut revêtir diverses formes : particules, trichites, fibres courtes, fibres continues. Les fibres peuvent être distribuées de manière aléatoire (fibres courtes) ou ordonnée (fibres longues) en nappes unidirectionnelles ou tissées, ou en structure multidirectionnelle. Il y a donc en théorie un très grand nombre de combinaisons et d'arrangements des constituants (fibre, matrice, interphase), de sorte que, à condition de respecter certaines règles de compatibilité (de nature physique ou chimique), on peut imaginer une infinité de matériaux composites et concevoir ceux-ci en fonction des conditions d'emploi. On comprend donc l'importance des relations microstructure/structure/propriétés/comportement pour la conception des matériaux et des structures (le terme « structure » est employé pour désigner à la fois la structure du renfort et les pièces en matériau composite).

3.6.1.1. Les classes de matériaux composites

Matrice	**Renfort**	**Température d'emploi**
Céramique	Fibres céramiques : C, SiC, BN, Al_2O_3, TiC, etc. Particules : TiC, SiC, etc.	≤ 1 600 °C
Vitrocéramique	Fibres céramiques : Al_2O_3, SiC	≤ 1 100 °C
Carbone	Fibres céramiques : SiC Fibres de carbone	≤ 3 500 °C
Béton	Fibres métalliques Fibres de carbone Fibres végétales	Ambiante
Métal	Fibres céramiques : SiC (cermet)	≤ 700 °C
Polymère Résine Élastomère Bois, papier	Fibres de verre Fibre de carbone Fibres métalliques Fibres végétales Particules Nanoparticules Fibres métalliques	Ambiante

3.6.1.2. Les modes de renfort

Type	Distribution
Fibres continues	Unidirectionnelle Multidirectionnelle stratifiés tissés : satin, taffetas, serge...
Fibres courtes Trichites Nanotubes Particules Nanoparticules	Dispersée, aléatoire, isotrope

3.6.2. État de l'art

La mécanique des composites fait l'objet de sessions spécifiques lors des conférences internationales et les Journées nationales sur les composites organisées par l'AMAC, qui font régulièrement le point sur l'avancement des recherches dans le domaine des matériaux composites. Une approche macroscopique est majoritairement suivie sur le plan expérimental et pour la modélisation. Les travaux consacrés aux relations entre la structure et le comportement mécanique sont essentiellement empiriques. Les travaux de modélisation dans ce domaine sont menés pour les composites à matrice céramique ou carbone. Lors des entretiens de l'AMAC (19 mars 2013) consacrés à l'avenir des composites, les conférenciers ont dressé un tableau complet de l'introduction des composites dans plusieurs systèmes fonctionnant dans des conditions variées, discutant les réalisations réussies, les contraintes diverses d'emploi et d'industrialisation, les performances requises. Il apparaît que des propriétés excellentes ne sont pas un critère suffisant, mais qu'il faut considérer aussi les performances. Les outils numériques doivent être une aide au développement et la durabilité est un facteur de gains économiques.

Les spécificités des matériaux composites, notamment la complexité de la microstructure hétérogène, posent de nombreux problèmes à la mécanique des composites, remet en question certains concepts de mécanique établis pour les matériaux homogènes et complique l'emploi de la mécanique des milieux continus à des fins prédictives. En outre, le caractère anisotrope ou orthotrope est une difficulté supplémentaire.

Les composites renforcés par des fibres continues, arrangées selon une architecture tissée, possèdent d'excellentes propriétés mécaniques et un comportement spécifique, fortement influencé par la structure, c'est-à-dire l'architecture de renfort et la microstructure des constituants. Un effort de recherche important a porté sur les relations entre la microstructure/structure et les propriétés pour les composites à matrice céramique ou carbone. Cette approche est pertinente pour la prévision du comportement, de l'endommagement et de la rupture, en vue de la conception de matériaux composites et de pièces. Cependant, elle nécessite une bonne description de la microstructure et des phénomènes physiques qui dictent les modes d'endommagement et de dégradation. Dans le domaine des composites à matrice polymère, le même effort n'a pas été conduit. C'est plutôt l'approche

phénoménologique qui a primé. Cette approche est, a priori, plus adaptée pour les calculs de structure et les simulations. Un effort est nécessaire pour réduire l'empirisme qui prévaut dans la conception des matériaux composites et le calcul des structures. Les voies dans cette direction reposent sur les relations microstructure/structure/comportement, les modèles de comportement, les essais virtuels et les matériaux virtuels.

D'une manière générale, les complexités ci-dessus affectent d'autres aspects de la mécanique des composites, à savoir :

- les approches et la prévision de la durée de vie en fatigue dans des environnements agressifs pour le matériau, lorsque des phénomènes physico-chimiques activent l'endommagement ou la dégradation des certains constituants ou de leur assemblage. Il est intéressant de noter que sans contribution de l'environnement, ces matériaux sont généralement insensibles à la fatigue ;
- la variabilité des caractéristiques de rupture, qui dépend de la présence de défauts et des phénomènes aléatoires qu'ils génèrent. Elle doit être aussi associée à la reproductibilité et la périodicité de la microstructure. Elle peut être abordée soit par une approche macroscopique fiabiliste, soit par une approche probabiliste fondée sur la mécanique des défauts ;
- les essais non destructifs pour détecter les défauts et l'utilisation des résultats quantitatifs dans des modèles prédictifs ;
- l'étude expérimentale du comportement mécanique en relation avec la microstructure.

3.6.3. Les orientations en fonction des enjeux

Les matériaux composites à performances élevées sont en train de prendre une part considérable dans un certain nombre de domaines. Cependant, compte tenu de la structure complexe de ces matériaux, une quantité importante d'essais est nécessaire pour le développement des matériaux composites, le dimensionnement des structures et la certification (dans l'aéronautique).

Ainsi, dans l'aéronautique, en moins de dix ans, le pourcentage de matériaux composites est passé de 20 % à 50 %. Toutefois, les méthodes actuelles de dimensionnement étant basées sur des campagnes d'essais, les matériaux composites utilisés dans l'aéronautique et le spatial n'ont guère évolué jusqu'ici, le coût de la campagne d'essais indispensable à l'intégration d'un nouveau matériau étant dissuasif.

Il est donc nécessaire de réduire la pyramide des essais, c'est-à-dire le nombre d'essais aux échelles successives depuis l'éprouvette jusqu'à la structure complexe et de grandes dimensions. Pour cela, il est indispensable de développer des modèles et des outils de simulation robustes. Un effort est nécessaire pour réduire l'empirisme qui prévaut dans la conception des matériaux composites et le calcul des structures. Les voies dans cette direction reposent sur les relations microstructure/structure/comportement, les modèles de comportement, les essais virtuels et les matériaux virtuels.

Les aspects suivants de la mécanique des composites sont aussi à considérer :

- la prévision de la durée de vie en fatigue dans des environnements agressifs pour le matériau, lorsque des phénomènes physico-chimiques activent l'endommagement ou la dégradation de certains constituants ou de leur assemblage ;
- la variabilité des caractéristiques de rupture, qui dépend de la présence de défauts et des phénomènes aléatoires qu'ils génèrent ;
- l'utilisation de résultats quantitatifs des essais non destructifs dans des modèles de comportement ;
- l'étude expérimentale du comportement mécanique en relation avec la microstructure.

3.6.4. Les verrous scientifiques et technologiques à lever

Ils sont étroitement associés aux spécificités des composites, qui se traduisent par les formes suivantes évoquées précédemment, à savoir :

- la variabilité des propriétés et des comportements ;
- la complexité et la modularité de la structure des matériaux composites ;
- la connaissance des relations élaboration/structure/propriétés ;
- la non-linéarité des comportements ;
- la robustesse des modèles qui doivent intégrer toutes les spécificités des composites.

3.6.5. Les laboratoires concernés

Les matériaux composites occupent les chercheurs depuis plusieurs décennies, mais l'activité a fluctué en fonction de divers facteurs, notamment économiques.

L'Association pour les matériaux composites (AMAC) favorise les échanges entre les différents acteurs. Son organisation et son action sont enviées et parfois copiées à l'étranger.

L'activité de recherche sur le comportement des matériaux composites est menée dans divers laboratoires de matériaux ou de mécanique : Centre des matériaux de l'ENSMP (composites à matrice organique (CMO), fibres), LMT/ENS de Cachan (CMO, composites à matrice céramique (CMC), composites carbone/carbone (C/C)), Laboratoire des composites thermostructuraux (CMC, C/C), IFREMER (CMO), ONERA (CMO), CETIM (CMO), institut Clément-Ader de Toulouse (CMO), CEA (CMO), Arts et Métiers ParisTech (CMO), INSA de Lyon (MATEIS (CMC, C/C), LAMCOS (CMO)), Laboratoire de mécanique et d'acoustique de Marseille (CMO), Institut P' de Poitiers (CMO), GeM/École centrale de Nantes (CMO), laboratoire Navier de l'ENPC (CMO).

3.6.6. Les enjeux industriels et sociétaux

En raison de leur faible masse, les composites permettent des gains de poids importants et donc la réduction de la consommation d'énergie. En outre, les composites thermostructuraux permettent le fonctionnement des systèmes à des températures plus élevées que celles autorisées par les métaux, ce qui permet de réduire les émissions polluantes des moteurs thermiques ou des moteurs à turbines.

Les composites sont en train de prendre une place croissante.

On utilise des composites dans de multiples secteurs : produits de grande consommation (le matériel de sport par exemple), mais aussi dans des systèmes industriels, le génie civil, et dans l'aéronautique et le spatial (structures aéronautiques en composite à matrice organique, freins en composite carbone/carbone, divergents pour la propulsion en composite carbone/carbone).

L'emploi des matériaux composites est envisagé dans de nombreux domaines : les composites à matrice céramique dans les moteurs aéronautiques, dans le spatial, dans le nucléaire.

L'expansion de l'utilisation des matériaux composites est freinée soit par les méthodes de fabrication (composites à matrice organique), soit par le coût (composites à matrice céramique), soit par les méthodes de conception/dimensionnement actuelles basées quasi exclusivement sur des essais longs et coûteux.

3.6.7. Les liens nécessaires avec d'autres disciplines

La mécanique des composites a des liens avec les disciplines piliers de la science des matériaux (physico-chimie, analyse structurale, microscopie, physique), la mécanique expérimentale, les mathématiques appliquées, la simulation numérique.

3.6.8. La position française par rapport à l'international

La France occupe un rang élevé à l'échelle internationale dans le domaine de la mécanique des composites et de la modélisation, que ce soit pour les CMO, les CMC ou les C/C. Cette place résulte en partie de la présence de grands groupes industriels actifs dans le développement et l'emploi de ces matériaux (aéronautique, spatial, énergie, transport), qui a favorisé les travaux de recherche dans le milieu académique. L'avance dans des domaines tels que la modélisation du comportement et des procédés, et les relations microstructure/comportement dans les composites à matrice céramique est indéniable.

3.6.9. Recommandations et perspectives

Il est donc recommandé d'adapter la mécanique aux spécificités des composites suivant les orientations indiquées plus haut, à savoir prendre en compte les relations microstructure/propriétés. La construction de modèles robustes permettra la réduction de la pyramide des essais, la conception de matériaux composites par le calcul en fonction des conditions de service, le dimensionnement de pièces ou de structures fiables.

3.7. Tribologie

3.7.1. Descriptif de la thématique

Le nom tribologie a été créé en Grande-Bretagne. Il a été utilisé pour la première fois dans le rapport [1] présenté le 23 novembre 1965 au Minister of State for Education and Science et publié en février 1966. Ce nom vient du grec τριβειν, « *tribein* » : frotter, et de λογος, « *logos* » : parole, étude ou science. Ainsi la tribologie est l'étude ou la science du frottement. Plus généralement, la tribologie concerne l'étude des surfaces en contact et en mouvement relatif ; elle regroupe ainsi la lubrification, le frottement et l'usure des éléments de machine. Le frottement fait intervenir de nombreux phénomènes, mais de façon simple, on peut le définir comme étant l'action qui tend à s'opposer au déplacement relatif de deux solides en contact. De même l'usure, qui peut prendre de très nombreuses formes, correspond à la détérioration des surfaces au cours de leur utilisation.

La tribologie est présente dans la plupart des activités industrielles et humaines. On peut citer, entre autres, la marche humaine avec l'adhérence au sol, le comportement des articulations et le développement des prothèses, la tenue d'objets à la main, ou encore la tenue du fœtus dans le placenta, la tenue sur route des roues de voitures qui se trouvent paralysées les jours de verglas ou de neige, le ski sur piste, le patinage artistique, la production de sons musicaux par frottement d'un archet contre les fils tendus d'un violon, les têtes de lecture des disques magnétiques des ordinateurs, le vernis anti-rayures des verres de lunettes, la mise en forme des matériaux… et même la recherche sur les activités de l'Homme pendant la Préhistoire. Ces citations ne sont bien évidemment pas exhaustives.

3.7.2. Un état de l'art s'appuyant sur des états de conjoncture ou avis récents

Dans tous les domaines de la tribologie, des progrès considérables ont été réalisés ces cinquante dernières années grâce d'une part aux développements considérables des moyens d'observation et d'analyse aux échelles micro- et nanoscopiques, et d'autre part à l'utilisation des moyens de calcul et du développement de méthodes numériques dédiées aux problèmes spécifiques de la tribologie.

Classiquement, mais de façon un peu arbitraire, la tribologie a été subdivisée en deux grands domaines : les contacts lubrifiés par des fluides et les contacts dits secs pour lesquels le lubrifiant est soit un lubrifiant solide, soit un revêtement ou un traitement de surface, soit même encore des débris d'usure.

Un contact en frottement est formé de deux corps solides qui doivent transmettre les efforts et assurer la cinématique et la dynamique du mécanisme. Ces deux corps sont très généralement séparés par un troisième corps particulièrement complexe qui peut être un revêtement, un lubrifiant solide, liquide ou gazeux, un traitement de surface, ou même être constitué de débris d'usure.

3.7.2.1. Les contacts lubrifiés

Généralement, les contacts lubrifiés par des fluides sont subdivisés en contacts surfaciques pour lesquels la pression dans le film est relativement faible et les contacts hertziens dans lesquels la pression est suffisamment élevée pour déformer élastiquement les surfaces.

Les paliers, les butées hydrostatiques et hydrodynamiques, et les garnitures mécaniques, appelées aussi joints d'étanchéité à faces radiales, relèvent typiquement des contacts surfaciques. Dans ces contacts, la pression dans le film fluide est relativement faible, sa valeur est de l'ordre de 1 à 20 mégapascals (200 bars), mais la charge (force normale) supportée par le contact peut être très élevée. Ainsi les butées hydrodynamiques des grandes centrales hydroélectriques peuvent supporter plus de 10 méganewtons.

Les contacts hertziens concernent les roulements à billes et à rouleaux, les engrenages, les systèmes came-poussoir… Dans ce type de contact, la charge n'est pas nécessairement très élevée, mais compte tenu des faibles dimensions de la surface de contact, la pression dans le film peut atteindre et même dépasser 3 gigapascals (30 000 bars). Par conséquent, les surfaces de contact sont largement déformées et le comportement du lubrifiant (huile ou graisse) n'est plus newtonien.

La distinction entre contacts surfaciques et contacts hertziens n'est que formelle. Ainsi les déformations élastiques dans les paliers de bielles et de vilebrequins de moteurs thermiques doivent impérativement être prises en compte pour prévoir le comportement de ces paliers. De même, l'étanchéité des joints à lèvres en élastomère dépend de la déformation élastique des surfaces, qui est du même ordre de grandeur que l'épaisseur du film.

3.7.2.2. Les contacts en frottement sec

Le frottement sec entre deux matériaux a accompagné l'évolution de la civilisation humaine. Par exemple, pendant tout la période dite « âge de la pierre polie », l'Homme a réalisé de nombreux outils en utilisant le frottement et l'usure.

Dans l'industrie, le frottement et l'usure sont à prendre en compte depuis le stade de la conception et de la fabrication des produits jusqu'au stade de la mise hors service des mécanismes par usure, en passant par le couple de serrage des vis, le *fretting* des articulations assemblées par rivetage ou par vissage, le freinage, le contact de la roue sur le rail, le captage du courant électrique dans les moteurs électriques ou dans la caténaire…

Le cas des outils d'usinage – perçage, taraudage, tournage, fraisage, etc. – est intermédiaire entre la lubrification par film complet et le frottement sec. Il s'agit de contacts le plus souvent lubrifiés par des huiles ou des émulsions contenant des additifs afin de faciliter l'évacuation de copeaux et de réduire l'usure ; cependant, le contact métal/métal est très souvent présent dans ce type de mécanismes.

L'étude du frottement et de l'usure des matériaux solides en contact glissant sec est un domaine d'étude et de recherche très complexe et interdisciplinaire.

Des analyses microscopiques, par des sondes de haute résolution (microscope électronique à balayage (MEB), microscope à force atomique ou à effet tunnel, rayons X, émission infrarouge…), des surfaces dégradées permettent de

comprendre l'influence des éléments d'alliage à l'interface du couple tribologique de matériaux formant le contact, et ainsi de proposer des couples d'une grande durabilité.

Par ailleurs, plusieurs contacts glissants industriels à sec dans les moteurs électriques, les alternateurs ou générateurs, les réseaux électrifiés des chemins de fer, le freinage, l'usinage ou des liaisons mécaniques peuvent baigner dans un champ magnétique et/ou électrique avec ou sans passage du courant électrique à travers le contact. Ces champs électriques et électromagnétiques modifient les caractéristiques physico-chimiques des surfaces et affectent ainsi leur comportement tribologique. Il est donc important d'identifier le caractère électrique – conducteur, semi-conducteur, diélectrique ou isolant – et le caractère magnétique – ferromagnétique, paramagnétique ou diamagnétique – des surfaces du contact.

Le troisième corps joue un rôle prépondérant dans le contact sec. Dans certains cas, son comportement est semblable à celui des billes dans un roulement. Ce troisième corps doit être de débit suffisant pour alimenter le contact, passivé chimiquement ou à liaisons chimiques covalentes saturées pour éviter l'adhésion des surfaces en contact et avoir une granulométrie à tendance sphérique. Il faut cependant noter que ce comportement favorable n'est pas général, certains troisièmes corps de forme lamellaire peuvent être de très bons lubrifiants. Par ailleurs, des particules d'usure comportant des arêtes vives ou présentant une grande dureté peuvent rayer les surfaces et entraîner des usures sévères.

Simplement, malgré la multitude de paramètres donnant naissance à la force de frottement, l'expérience permet d'établir certaines lois phénoménologiques macroscopiques. Ce sont les lois de Léonard de Vinci (1452–1519), de Guillaume Amontons (1663–1705) et de Charles Coulomb (1736–1806).

1- Loi de Vinci : la force de frottement est proportionnelle à la force normale N qui presse les deux surfaces l'une contre l'autre.

2- Loi d'Amontons : la force de frottement est indépendante de l'aire apparente de contact.

3- Loi de Coulomb : la force de frottement dynamique est indépendante de la vitesse relative de glissement des deux surfaces. Cette force a une valeur constante : $F = f N$. La constante de proportionnalité f, sans dimension, est appelée coefficient de frottement dynamique ou tout simplement coefficient de frottement du couple tribologique, et ne dépend généralement que de la nature des matériaux en contact et de leur environnement. Pour un couple de matériaux tribologique dont les deux coefficients de frottement statique et dynamique sont différents, un déplacement relatif entre les deux corps à très faible vitesse relative de glissement est accompagné d'un mouvement en cascade glissement/adhérence/glissement/adhérence et ainsi de suite. Ce phénomène appelé *stick-slip* est de plus amplifié si les matériaux tribologiques ou le moyen d'action de la force de déplacement présente une faible raideur élastique, qui permet à la force de traction ou à celle de frottement de varier entre la force de frottement statique et la force de frottement dynamique. Ce phénomène engendre un spectre vibratoire spécifique au frottement sec et peut conduire à l'endommagement du mécanisme dynamique.

L'analyse optique ou microscopique des surfaces de contact met en évidence différents types d'usure. On distingue l'usure abrasive, l'usure adhésive, l'usure

par fatigue, l'usure par oxydation, l'usure par cavitation, les piqûres électriques, l'usure par *fretting* ou *fretting corrosion*, l'endommagement par rayage… La protection contre l'usure abrasive des surfaces de contact peut être assurée par l'incrustation de pierres dures, de particules de diamant ou de borazon BN dans le substrat. Elle peut être assurée par un traitement de surface de type nitruration, cémentation, grenaillage, etc., ou par la déposition de films fins durs et lubrifiants. Le revêtement doit avoir un faible coefficient de frottement, largement inférieur à 0,27 pour éviter de localiser le point de cisaillement de Hertz en surface et empêcher ainsi l'usure abrasive. La tribologie du contact sec est très complexe et reste difficile à modéliser, car le contact a lieu essentiellement aux sommets des aspérités de contact. Dans ces zones ont lieu des échauffements excessifs, de l'arrachement de matière, des déformations plastiques et de l'endommagement. Chaque contact tribologique constitue un cas d'étude particulier qui est lié à sa conception, aux choix des matériaux et à l'environnement du tribocontact. La simulation du champ des contraintes et du champ des températures au contact et dans les matériaux, ainsi que les données issues de l'expérience permettent cependant dans de nombreux cas de prévoir le bon fonctionnement du mécanisme formant le contact.

Cependant, de façon générale, on ne sait pas encore aujourd'hui, lors de la conception d'un mécanisme donné, définir le couple de matériaux le plus performant et prévoir la valeur du frottement et de l'usure du contact.

3.7.3. Les orientations nécessaires en fonction des enjeux

Malgré le fait que la modélisation a beaucoup progressé, surtout dans le cas des contacts lubrifiés, il n'en demeure pas moins que la recherche fondamentale en tribologie constitue une nécessité. Une théorie générale de cette science reste à construire, sans doute en partant de la théorie du troisième corps et en tenant compte de la pluridisciplinarité des phénomènes observés, ce qui éviterait de nombreux essais sur des installations spécifiques à chaque cas. Le contact en frottement sec et la lubrification mixte étant particulièrement à étudier.

Parallèlement, la recherche sur les traitements de surface constitue une voie qui ouvre des perspectives intéressantes pour la réduction du frottement et de l'usure. On sait bien que les matériaux qui ne permettent pas la production de troisième corps, tels que le titane, l'aluminium ou le nickel, ont de mauvais comportements en frottement. Cependant, le développement des revêtements a permis l'utilisation de ces matériaux dans des conditions spécifiques.

Les dépôts des couches minces de quelques nanomètres ou micromètres peuvent en effet changer complètement l'apparence brute d'un état de surface ou encore modifier ses fonctionnalités. Par exemple, les revêtements durs et fins, de quelques micromètres, de « *diamond like carbon* » DLC, SiC, TiC ou TiN sur des outils de coupe les protègent de l'usure et augmentent significativement leur durée de vie. Des dépôts de films minces de quelques nano- ou micromètres ont la particularité de modifier les propriétés tribologiques des surfaces en contact, même sous de forts chargements. Cependant, les revêtements ne peuvent jouer

pleinement leur rôle dans le contact que s'ils adhèrent parfaitement au substrat qui constitue leur support de déposition.

La force ou le coefficient de frottement dans un contact en frottement sec ne peut pas se calculer a priori. Cette force, de frottement, est due à plusieurs phénomènes interactifs entre les matériaux en contact. Son existence est prouvée empiriquement et aucune théorie physique n'a encore pu formuler la relation générale entre la force de frottement et les paramètres thermomécaniques des matériaux en contact. La rugosité du contact contribue pour environ 10 % à la force de frottement. Les quelque 90 % restants résultent de l'adhésion et des interactions physico-chimiques et électromagnétiques entre les deux surfaces. Plus on diminue la rugosité, plus on augmente l'adhésion entre les pièces en contact. Il faut donc veiller à une rugosité optimale du contact dynamique.

3.7.4. Les verrous scientifiques et technologiques à lever

3.7.4.1. Les contacts lubrifiés

La plupart des verrous technologiques concernant l'analyse des mécanismes relevant des contacts lubrifiés ont été progressivement levés par la prise en compte, de façon de plus en plus exhaustive, des effets élastiques et élastoplastiques, thermiques et dynamiques.

Certains points de blocage demeurent et concernent essentiellement les domaines suivants :

- la recherche d'additifs plus efficaces et moins polluants concerne les spécialistes de physico-chimie des surfaces et des lubrifiants. Cela reste un problème ouvert d'autant plus urgent que l'application de la réglementation REACH, mise en place par la Communauté européenne en décembre 2006, impose l'emploi d'additifs nouveaux, notamment en lubrification limite et extrême pression ;
- la prise en compte de la forme réelle des surfaces du contact en lubrification hydrodynamique et élastohydrodynamique. Ainsi les surfaces texturées et les rugosités de surface sont encore mal décrites en lubrification ;
- la caractérisation précise du comportement rhéologique des lubrifiants en films minces et sous des contraintes de pression et de cisaillement très élevées ;
- un cas particulier important est la lubrification mixte, qui peut être considérée comme une transition entre la lubrification limite et/ou extrême pression et la lubrification hydrodynamique et/ou élastohydrodynamique. En réalité, à cause de la forme et de la rugosité des surfaces, il existe des zones convergentes dans le film fluide qui permettent la génération de pression hydrodynamique. Ainsi une partie de la charge est supportée par des zones fluides et l'autre partie par des zones où le contact est en lubrification limite et/ou extrême pression. Ce type de lubrification existe jusqu'à ce que la vitesse des surfaces soit suffisante pour que, par effet hydrodynamique, le film lubrifiant sépare totalement les surfaces. La modélisation de la lubrification mixte est en cours de développement et nécessite encore de nombreuses

recherches. En effet, il s'agit d'associer l'analyse de phénomènes physico-chimiques à celle des phénomènes mécaniques afin de développer des modèles qui prennent en compte ces différents comportements ;
– la modélisation des contacts lubrifiés avec des fluides très peu visqueux et fonctionnant en régime turbulent à des nombres de Reynolds très élevés.

3.7.4.2. Les contacts en frottement sec

Malgré les efforts considérables déployés en recherche tribologique et technologique, les phénomènes de frottement et d'usure qui existent dans les contacts demeurent l'une des préoccupations de premier plan. L'évolution des surfaces en contact dynamiques est irréversible et l'usure induite, même parfois micrométrique, peut mettre hors service le mécanisme.

Le dimensionnement des contacts tribologiques doit nécessairement prendre en compte les paramètres suivants :

– la charge dynamique du contact (N.V) concernant la charge normale N appliquée au contact multipliée par la vitesse relative de glissement V qui détermine l'énergie mécanique dégradée par le frottement ;
– l'état de surface initiale et en fonctionnement ;
– la température maximale de fonctionnement ;
– l'environnement du contact, et le choix du couple de matériaux adéquat ;
– le degré de sécurité de fonctionnement.

3.7.5. Les laboratoires concernés

En France, une vingtaine de laboratoires académiques développent des recherches de haut niveau en tribologie. Ils sont répartis sur l'ensemble du territoire. On peut citer les plus importants en termes de taille et d'activités :

– le Laboratoire de tribologie et dynamique des systèmes (LTDS) de l'École centrale de Lyon ;
– le Laboratoire de mécanique des contacts et des structures (LaMCoS) de l'Institut national des sciences appliquées de Lyon ;
– le groupe Tribologie du département Génie mécanique et systèmes complexes de l'Institut Pprime de l'université de Poitiers, du CNRS et de l'ENSMA ;
– le groupe Surfaces et tribologie (SET) du Centre de mise en forme des matériaux (CEMEF) de l'École des mines de Paris à Sophia Antipolis ;
– l'équipe Tribologie du Laboratoire d'ingénierie des systèmes et des matériaux (LISMMA) de Supméca à Saint-Ouen.

Enfin, à ces laboratoires académiques s'ajoutent différents laboratoires industriels dont les activités sont directement tournées vers les applications développées au sein de l'entreprise. Nous citerons le CETIM à Senlis et Hydromécanique et frottement (HEF) à Andrézieux-Bouthéon.

3.7.6. Les enjeux industriels et sociétaux par domaines d'application

Tous les équipements mécaniques sont concernés. Ils incluent en effet des composants dans lesquels on trouve des matériaux en contact avec un déplacement relatif en translation ou rotation.

Il s'agit principalement des équipements mécaniques des systèmes de transport (automobile, aéronautique, ferroviaire, naval…), des ateliers de fabrication (machines-outils, matériels pour l'agroalimentaire, la sidérurgie, la chimie, la pharmacie, les plastiques…) des engins de chantier (matériels de manutention, de levage, de travaux publics, pour les mines, l'extraction du pétrole…).

Par ailleurs, comme mentionné au début de cet article, la tribologie est nécessaire dans d'autres domaines très variés tels que la santé, le sport, les instruments de musique…

Sans être exhaustif, on peut citer quelques composants tels que les paliers, les butées, les garnitures mécaniques, les cames-poussoirs, les roulements à billes et à rouleaux, les engrenages, les articulations assemblées par rivetage ou par vissage, les freins, les caténaires, les outils d'usinage, les prothèses de hanche…

Pour souligner l'importance de la tribologie, il faut noter que dans les pays développés les pertes par frottement et usure représentent entre 3,5 et 4 % du PIB et que dans une automobile moderne, plus de 25 % de la puissance affichée du moteur est perdue en frottement. Selon une étude récente du CETIM, 80 % des avaries des pièces mécaniques commencent en surface ; ainsi la surface est actuellement une réelle butée technologique.

L'augmentation du rendement et de la dure de vie des éléments mécaniques par la réduction du frottement et la diminution des phénomènes d'avaries par la connaissance des phénomènes tribologiques constituent en conséquence des enjeux économiques de premier plan.

Les enjeux environnementaux sont également importants si l'on considère la diminution de la consommation d'énergie et l'utilisation de matériaux en contact qui répondent aux exigences de la directive européenne REACH.

3.7.7. Les liens et concertations nécessaires avec les autres disciplines

L'étude du frottement et de l'usure des matériaux solides en contact glissant est un domaine d'étude interdisciplinaire, touchant de nombreux domaines et en particulier la mécanique, la physique du solide et la science des matériaux, la chimie, plus particulièrement l'oxydoréduction, la thermique et la thermodynamique des phénomènes irréversibles, l'électromagnétisme, etc. Par ailleurs, les paramètres du contact, tels que la surface apparente de contact, la surface réelle de contact, la température de contact, la rugosité du contact, sont liés, par des relations mathématiques complexes, aux paramètres dynamiques imposés au contact tels que la charge normale appliquée au contact et la vitesse relative de glissement, et aux propriétés mécaniques, physico-chimiques et thermiques des matériaux. Les conditions aux limites du tribocontact nécessaires à la résolution des équations

différentielles du champ des températures et au champ des contraintes de contact font que chaque géométrie de contact constitue en soi un système tribologique à part qui ne peut être séparé de son environnement. En effet, un contact acier/acier à l'air ambiant est plutôt un contact oxyde du métal/oxyde du métal qui a un coefficient de frottement de l'ordre de 0,3. Ce même contact sous vide ou en très haute altitude, où il n'y a pas d'oxydation, grippera et se soudera à froid. Ainsi le choix d'un couple tribologique dépend non seulement des conditions fonctionnelles de charges et de vitesses, mais aussi de son environnement et de ses conditions d'utilisation.

3.7.8. La position française par rapport à l'international

En France, les laboratoires académiques qui développent des recherches en tribologie sont répartis sur l'ensemble du territoire. Ils travaillent généralement en liaison étroite avec des entreprises industrielles et sont en partie financés dans le cadre de contrats de recherche. Leurs activités couvrent la plupart des domaines de recherche actuels sans qu'il existe de concurrence thématique néfaste entre ces différentes unités. Dans des domaines essentiels, plusieurs laboratoires occupent dans leur domaine d'activité une position de leader international et la compétition a lieu plutôt avec les laboratoires des États-Unis, du Japon, de Chine, de Russie et de Grande-Bretagne.

3.7.9. Recommandations et perspectives

Les formations en tribologie se sont pour la plupart mises en place en France dans les écoles d'ingénieurs et dans les universités à partir de 1965, et la situation concernant la formation a été satisfaisante jusqu'au début des années 2000. On constate aujourd'hui que le nombre de cours et leur volume a diminué de façon importante ces dernières années. Cela est en partie lié à la mise en place du LMD et à l'augmentation du nombre de thématiques enseignées. Actuellement, le volume des enseignements en tribologie en France est insuffisant et il devient urgent de renforcer ces enseignements.

3.8. Rhéologie

3.8.1. Descriptif de la thématique

La création du mot « rhéologie » est attribuée à Bingham en 1922, qui définit la rhéologie comme la science des déformations et des écoulements de la matière. À l'origine, la rhéologie se définit donc comme une science pratiquement identique à la mécanique des milieux continus dont le but est d'observer, décrire et modéliser les déformations de la matière sous l'action de différentes forces. De nos jours, la rhéologie se distingue de la mécanique des milieux continus par son caractère essentiellement pluridisciplinaire, par le fait qu'elle s'intéresse plus particulièrement aux comportements non linéaires des matériaux à l'état solide, à l'état fluide

et lors des transitions entre ces deux états, et qu'elle s'efforce de relier les propriétés macroscopiques des matériaux étudiés à leurs propriétés à l'échelle microscopique, voire nanoscopique (composition, interactions entre constituants, structuration…). Les matériaux étudiés par les rhéologues sont extrêmement divers : suspensions (peintures, boues de forage, bétons et plâtres à l'état frais, magmas et laves, sang, minerais…), émulsions (sauces alimentaires, cosmétiques, médicaments…), fluides complexes (polymères, adhésifs, fluides biologiques, plastiques, adjuvants…), mousses, matériaux granulaires, poudres, etc. On trouve donc la rhéologie dans pratiquement tous les domaines d'activité humaine et ses applications vont de la mise en forme des matériaux aux comportements de la matière vivante, en passant par la tenue des pneumatiques, la qualité des produits cosmétiques, le génie pétrolier, l'industrie alimentaire, l'industrie papetière, l'industrie textile, le traitement des eaux ou l'industrie des matériaux de construction. Son impact économique est donc considérable. La rhéologie n'est cependant pas uniquement une science aux visées applicatives puisque de nombreuses équipes de recherche développent des travaux de nature plus fondamentale sur le comportement des fluides complexes.

3.8.2. Un état de l'art s'appuyant sur des états de conjoncture ou avis récents

De nombreuses équipes de recherche développent aujourd'hui des approches expérimentales combinant des moyens d'observation ou de caractérisation de la matière à des dispositifs de sollicitations, mécaniques ou autres. Les techniques d'observation sont extrêmement diverses : microscopie classique, microscopie confocale, RMN, rayonnement X ou gamma, diffusion ou diffraction de la lumière, vélocimétrie par imagerie de particules, émission sonore, etc. En parallèle, les dispositifs de sollicitation mécanique permettent d'appliquer des chargements complexes réellement tridimensionnels avec des gammes de sollicitations très larges. Ces outils, en permettant d'une part d'observer les liens existants entre composition, microstructure et comportement des matériaux, et d'autre part de caractériser les matériaux à différentes échelles d'espace et de temps, ouvrent des perspectives importantes pour une approche réellement multiéchelle et multiphysique du comportement des fluides complexes.

De façon concomitante, les progrès réalisés en chimie permettent aujourd'hui la synthèse d'objets de tailles très variées (typiquement du nanomètre au millimètre) dont les propriétés de surface (hydrophobicité, charge électrique, interaction répulsive ou attractive, etc.) et de volume (porosité, densité, sphéricité, etc.) sont finement contrôlées. Il est donc possible d'étudier expérimentalement le comportement rhéologique de matériaux modèles aux propriétés microstructurales bien définies en observant simultanément leur structuration à l'échelle des constituants. Ces approches permettent de mieux connaître et comprendre les liens entre composition et propriétés globales des matériaux.

Une autre tendance observée est la diminution régulière de la taille des dispositifs utilisés par les rhéologues (microrhéologie et/ou microfluidique), permise par l'utilisation des techniques de l'industrie électronique. Le développement de

la rhéologie à cette échelle ouvre de très nombreuses perspectives (observation de comportements particuliers en situation confinée, élaboration de matériaux aux propriétés finement contrôlées, notamment dans le domaine médical, rhéométrie « *on a chip* », etc.).

La possibilité de mesurer à différentes échelles la réponse de matériaux soumis à des chargements multiphysiques complexes permet de proposer et valider des lois de comportement de plus en plus élaborées, prenant en compte couplages multiphysiques et non-linéarités matérielles ou géométriques. Ces lois sont utilisées pour construire des outils de simulation numérique du type éléments finis ou volumes finis qui, tirant profit de l'accroissement continus de la puissance de calculs des ordinateurs, permettent de traiter des problèmes de plus en plus réalistes. Ces outils trouvent de nombreuses applications dans l'industrie comme la plasturgie (simulation du moulage de pièces), le génie des procédés, le génie civil, l'industrie pétrolière, etc.

Les outils de simulation numérique sont également utilisés pour modéliser la réponse des matériaux à diverses sollicitations à partir d'une description de leurs constituants et de leurs interactions, en utilisant des approches discrètes du type dynamique moléculaire ou éléments distincts. Ces outils permettent de progresser dans la compréhension fondamentale du lien entre constituants d'un matériau et comportement global. Comme pour les simulations numériques continues, la puissance des ordinateurs utilisés conditionne la qualité des prédictions de ces outils. Ces derniers sont notamment appliqués pour étudier le comportement des matériaux granulaires, des suspensions colloïdales ou non, des verres métalliques, etc.

3.8.3. Les orientations nécessaires en fonction des enjeux

Alors que les moyens d'observer, de comprendre et de simuler le comportement des fluides complexes ouvrent des perspectives très larges, de nombreux défis restent à relever.

Tout d'abord, comme dans beaucoup d'autres domaines, il convient « d'apprendre » à gérer les quantités importantes d'informations générées par les dispositifs expérimentaux couplés aux moyens d'observation et les outils de simulations numériques. Les résultats obtenus doivent être traités, analysés puis synthétisés afin d'en dégager une compréhension globale des systèmes étudiés.

Si l'on se place du point de vue fondamental, la mise en évidence d'un lien entre des propriétés microscopiques et une propriété globale ou la mise en évidence d'un comportement particulier constitue déjà un résultat remarquable qui peut éventuellement être valorisé pour des applications (élaboration de nouveaux matériaux ou dispositifs, identification des origines microstructurales d'un comportement, compréhension d'un phénomène, etc.). L'acquisition de nouvelles connaissances passe par le développement d'outils expérimentaux permettant d'appliquer des gammes de sollicitations toujours plus larges (fortes vitesses de cisaillement ou d'élongation, hautes pressions, températures élevées...) sur des

matériaux modèles aux propriétés toujours mieux contrôlées, en couplant observations et rhéométrie.

En revanche, si l'on souhaite utiliser les résultats obtenus pour développer un outil prédictif du comportement d'un matériau en situation (passage classique de l'échelle du matériau à l'échelle de la structure ou du procédé), il convient de développer des modèles « manipulables ». Si l'on cherche à développer un modèle « classique » reposant par exemple sur les outils de la mécanique des milieux continus, il est nécessaire d'identifier un nombre limité de variables d'état pertinentes pour décrire le système, puis de proposer des lois d'évolution pour ces variables en fonction des sollicitations appliquées au système matériel étudié et, enfin, de valider le modèle par comparaison avec les résultats expérimentaux et/ou numériques. Si cette problématique n'est pas nouvelle, l'abondance des informations disponibles à l'échelle microscopique ou nanoscopique combinée à la volonté de disposer d'outils de modélisation qui restent simples à mettre en œuvre, tout en étant capables de rendre compte de la richesse des comportements observés, complique sérieusement cette étape. Des solutions alternatives cherchant à mieux prendre en compte les différents phénomènes pertinents pour décrire le comportement d'un matériau en couplant plusieurs modèles agissant à différentes échelles d'espace ou de temps dans un même outil de simulation sont actuellement en cours de développement. Ces approches permettent évidemment de mieux rendre compte des différents phénomènes agissant au sein du matériau, mais nécessitent des moyens de calculs assez, voire très, lourds et restent complexes à mettre en œuvre. L'accroissement de la puissance des moyens de calcul numérique (calcul parallèle en particulier) est évidemment une condition au développement de ces approches. Cette remarque est bien entendu valable pour les approches continues plus classiques, puisque la mise en œuvre de modèles multi-physiques tridimensionnels capables de reproduire de façon réaliste des systèmes réels nécessite des puissances de calcul qui ne sont pas encore couramment disponibles.

3.8.4. Les verrous scientifiques et technologiques à lever

Le dialogue entre approches expérimentales et modélisations et entre les différents champs disciplinaires est évidemment une condition nécessaire pour la réussite de ces travaux. Dans un contexte de spécialisation toujours plus poussée des chercheurs et ingénieurs, l'existence d'un dialogue fructueux entre des chercheurs appartenant à des disciplines différentes (grossièrement de la physique de la matière condensée aux mathématiques appliquées en passant par la chimie, le génie des procédés ou le génie civil) est une condition nécessaire pour progresser dans la connaissance des propriétés rhéologiques des fluides complexes, puis pour transférer ces connaissances d'un champ disciplinaire à un autre ou du monde de la recherche académique vers les applications et les entreprises. Ce dialogue ne peut évidemment avoir lieu que s'il existe au sein de la communauté scientifique des chercheurs ou ingénieurs capables d'établir les liens entre les disciplines. Parce qu'elle est une science de modélisation visant à prédire le comportement de systèmes à l'échelle intéressant l'ingénieur ayant développé depuis bientôt un

siècle des outils d'approche multiéchelle du comportement des matériaux, la mécanique des milieux continus apparaît comme le champ disciplinaire approprié pour porter ces échanges.

Par ailleurs, la tendance à la complexification des approches et des modèles ne facilite évidemment pas le transfert des connaissances acquises vers les entreprises. Si les grandes entreprises ont en général les moyens de développer des collaborations à long terme avec les laboratoires de recherche ou les universités (laboratoires communs, chaires d'enseignement et de recherche, contrats cadres, thèses CIFRE, etc.) qui facilitent ce transfert, la situation est plus délicate pour les petites et moyennes entreprises. La réduction/simplification des modèles élaborés dans un contexte académique, qu'ils soient « classiques » ou « multiéchelles », pour une utilisation en recherche-développement ou en contrôle de la production est une condition nécessaire pour la valorisation des approches de modélisation.

3.8.5. Les laboratoires concernés

Sous la dénomination « rhéologie » sont rassemblés des travaux expérimentaux, théoriques et numériques se plaçant à des échelles d'espace et de temps très diverses, pouvant appartenir à des champs disciplinaires différents et dont les finalités vont du fondamental à l'application. Le positionnement des laboratoires travaillant dans le domaine de la rhéologie est un bon indicateur de cette diversité : certains affichent clairement leur appartenance au domaine de la rhéologie, d'autres se proclament plutôt de la mécanique, de la physique ou de la chimie ; des laboratoires revendiquent explicitement leur interdisciplinarité, alors que d'autres se définissent par leurs domaines d'application. À cette liste, il eut été évidemment possible d'ajouter d'autres laboratoires utilisant les outils de la rhéologie, mais le choix a été fait ici de se limiter aux laboratoires actifs dans la communauté des scientifiques se proclamant explicitement de la rhéologie.

Les laboratoires de recherche travaillant dans le domaine de la rhéologie ont traditionnellement de nombreuses relations avec les entreprises. Cette situation s'explique d'une part par les nombreuses applications de la rhéologie (contrôle des propriétés des matériaux, identification et optimisation de leurs propriétés d'usage, simulation des procédés d'élaboration, des procédés de mise en œuvre, de l'utilisation et de la fin de vie des matériaux, etc.), mais également par les défis sociétaux actuels qui obligent à optimiser les techniques et à rechercher des solutions alternatives compatibles avec les impératifs du développement durable.

3.8.6. Les enjeux industriels et sociétaux par domaines d'application

Comme science des procédés, la rhéologie a évidemment un rôle très important à jouer dans l'élaboration des réponses aux défis du développement durable. Dans le domaine du génie civil et de la construction, l'amélioration du bilan carbone de la filière passe par une meilleure ouvrabilité des matériaux de construction (bétons autoplaçants et autonivelants, enduits de rénovation, etc.), par l'élaboration de matériaux plus isolants (bétons et plâtres moussés, matériaux nanoporeux,

etc.), par une meilleure prise en compte des risques naturels (écoulements géophysiques, laves torrentielles) ou par une meilleure maîtrise des matériaux en fin de vie (déconstruction, évacuation, etc.). Pour tous ces sujets, la maîtrise des propriétés des matériaux à l'état pâteux ou sous forme granulaire en lien avec leur composition est évidemment essentielle.

Le même constat s'applique en génie industriel pour tous les procédés de mise en œuvre, d'élaboration ou d'utilisation des matériaux sous forme de poudre, de pâte, à l'état fluide, ou sollicitant les matériaux dans le domaine des grandes déformations.(mise en forme plastique, coulage, frittage, injection, emboutissage, forge…) ou dans le domaine de l'énergie pour les procédés de mise en œuvre et de valorisation de la biomasse, le transport et la transformation des matériaux pour leur valorisation et/ou leur stockage ou l'optimisation des procédés d'extraction et de récupération des énergies fossiles ou des minerais.

Les applications sont également très importantes dans le domaine agroalimentaire, toujours pour les procédés de fabrication mais également pour l'optimisation des propriétés gustatives ou sensorielles (relation texture/rhéologie en particulier).

Le domaine des biotechnologies est également un secteur d'applications des résultats de la rhéologie très important. La compréhension et la maîtrise du comportement des fluides complexes est essentielle pour le domaine médical pour des problèmes classiques comme l'écoulement du sang ou la diffusion de médicaments dans les fluides corporels, mais également pour la mise en œuvre de procédés plus innovants comme l'encapsulation de médicaments ou le tri d'organismes vivants par des procédés microfluidiques. Ces techniques, dont l'application dépasse largement le domaine de la médecine, ne pourront atteindre un stade de développement satisfaisant sans une maîtrise complète des écoulements des fluides complexes utilisés.

3.8.7. Les liens et concertations nécessaires avec les autres disciplines

Cette position « centrale » de la mécanique des milieux continus ne doit pas occulter les liens nécessaires de la rhéologie avec d'autres disciplines. Comme il a été dit plus haut, il est de fait très difficile de délimiter une frontière indiscutable entre rhéologie, physique de la matière molle, mécanique, physico-chimie ou génie des procédés. En pratique, les différents acteurs de la communauté se classent dans l'une ou l'autre des disciplines en fonction de leur formation initiale, du positionnement de leur structure de rattachement ou de leur goût. La rhéologie ne peut évidemment se développer et répondre aux questions qui lui sont adressées qu'en conservant ce caractère pluridisciplinaire.

La nécessité de sonder de plus en plus finement la structure de matériaux étudiés nécessite un renforcement des liens avec la physique instrumentale pour permettre un accroissement des résolutions spatio-temporelles de caractérisation des matériaux s'écoulant, se déformant ou vieillissant. Ces progrès peuvent passer par un accès plus important à des grands instruments permettant d'observer la matière à une échelle fine, du type ESRF à Grenoble ou SOLEIL à Gif-sur-Yvette, ou

par le développement et/ou l'amélioration de dispositifs dédiés utilisant la RMN, le rayonnement X, la microscopie optique, la microscopie confocale, la diffraction ou diffusion de lumière, etc.

Le développement de modèles numériques de plus en plus complexes et les difficultés rencontrées pour traiter les données générées par les expériences invitent à un rapprochement avec les mathématiciens appliqués et les informaticiens. La mise au point d'algorithmes efficaces, permettant d'une part de résoudre les problèmes numériques issus des modèles continus ou discrets, et d'autre part de manipuler puis d'analyser les données (images, champs de grandeurs physiques, etc.) issues des expériences, permettra de continuer à progresser dans ces directions. La mise en œuvre ou le développement de méthodes inverses pour permettre l'identification de modèles à grand nombre de paramètres à partir des résultats expérimentaux est une condition à la fiabilité des outils de simulation. Enfin, la mise au point d'outils de modélisation ou d'analyse simplifiés, aisément manipulables dans un contexte applicatif à partir des outils plus complexes, développés dans les laboratoires, peut bénéficier des méthodes de réduction de modèles développés par les mathématiciens appliqués.

3.8.8. La position française par rapport à l'international

En France, les liens entre rhéologie et mécanique sont réels et originaux, la rhéologie s'étant développée initialement à partir de la mécanique académique indépendamment de toute filière d'applications. Aujourd'hui, le Groupe français de rhéologie reste lié à l'Association française de mécanique en tant que groupe scientifique et technique.

La situation est différente dans le monde anglo-saxon et plus particulièrement aux États-Unis puisque la Society of Rheology, membre de l'American Institute of Physics, se définit comme une branche de la physique. En comparaison avec la France, les travaux menés par les rhéologues anglo-saxons paraissent par certains côtés plus fondamentaux, mais les liens avec les entreprises semblent plus forts. Ce constat s'applique à la plupart des pays où la rhéologie est bien développée (Grande-Bretagne, Australie, Allemagne, Suisse, Pays-Bas, Japon, Canada, etc.).

Le Groupe français de rhéologie est l'un des groupes européens les plus importants. La discipline est bien reconnue au niveau international (bonne présence dans les organisations et manifestations internationales) et les liens avec les chercheurs des autres pays sont nombreux et dynamiques.

3.8.9. Recommandations et perspectives

Science fédérative de divers champs disciplinaires, orientée vers les applications, la rhéologie a vocation à participer aux réponses apportées aux défis lancés à nos sociétés. Les conditions pour son développement découlent directement de l'exposé donné dans ce chapitre. Du côté de la formation, il convient de favoriser une pluridisciplinarité efficace. Comme il a été dit, les formations en mécanique des milieux continus offrent un cadre idéal pour développer ces formations. Pour ce qui concerne la recherche, les deux principaux obstacles à lever sont d'une part le

cloisonnement disciplinaire, et d'autre part la faible perméabilité entre le monde académique et les entreprises. Des outils permettant d'une part une meilleure reconnaissance des travaux aux frontières des champs disciplinaires classiques, et d'autre part une incitation au développement de ces recherches, peuvent contribuer de façon positive au développement de la rhéologie. Pour être efficaces, ces outils devront également contribuer à simplifier la gestion administrative de la recherche française.

3.9. Mécanique pour le vivant

3.9.1. Descriptif de la thématique

La mécanique et le vivant sont souvent opposés : la première est structurée donc rigide et répétitive, alors que le second est souple et capable d'improvisation. De plus, les tissus vivants se comportent comme des systèmes en soi dont la réponse n'est pas la simple juxtaposition de celle de leurs constituants. On rappellera que le vivant n'est pas réductible à un simple objet scientifique. Il semble donc paradoxal de vouloir expliquer mécaniquement les phénomènes biologiques et de réduire ainsi le vivant à une simple production humaine, comme le veut le projet de la biologie et du mécanisme. Le modèle mécanique fut néanmoins considéré comme suffisant pour décrire le vivant par Descartes (il comparait déjà le corps humain à une machine (automate) pour faire de la médecine une science au niveau macroscopique) ; au niveau microscopique, la biologie parle de « mécanismes physico-chimiques ». L'analogie se renforce par l'étymologie du mot « organe », qui est un « outil » et les organes sont alors en effet des outils naturels. Même si cela n'est qu'une analogie, le vivant peut ainsi être considéré comme un objet technique ; nous sommes techniquement capables de traiter les êtres vivants comme des machines, produisant des tissus ou des organes de substitution.

La mécanique pour le vivant a pour objectif général l'exploration des propriétés mécaniques des organismes vivants, ainsi que l'analyse des principes d'ingénierie faisant fonctionner les systèmes biologiques. Elle traite des relations existantes entre les structures et les fonctions à tous les niveaux d'organisation du vivant, du niveau moléculaire (collagène, élastine) jusqu'aux tissus et organes. Elle peut se décliner en plusieurs sous-disciplines ayant chacune un champ d'investigation qui lui est propre : la biomécanique caractérise ainsi les réponses spatio-temporelles des matériaux biologiques – solides, fluides ou viscoélastiques – à des contraintes internes et externes. Le terme « mécanobiologie » a d'ailleurs été forgé pour bien mettre en évidence le fait qu'un certain nombre de processus biologiques, à différentes échelles, sont sensibles aux champs mécaniques locaux. Outre la mécanique classique, la biomécanique fait appel à diverses disciplines et techniques, telles que la rhéologie (étude du comportement des fluides biologiques comme le sang), la résistance des matériaux pour modéliser les contraintes subies par les tissus (cartilage des articulations, les os), la mécanique du solide pour analyser la motricité et la locomotion, depuis les cellules individuelles jusqu'aux organismes entiers.

La bio-ingénierie (contraction d'ingénierie biomédicale) est la science qui applique des méthodes d'ingénierie pour résoudre des problèmes biologiques. Elle innove et fait progresser les concepts fondamentaux, crée des connaissances du niveau moléculaire au niveau systémique, développe des biomatériaux, des procédés, des approches informatiques, des implants et des appareils innovants. Dans son esprit, la bio-ingénierie autorise un mieux-être de la population par la prévention, le diagnostic et le traitement des maladies, la réadaptation de patients et l'amélioration de la santé.

Les matériaux pour le vivant que conçoit et produit la bio-ingénierie, encore dénommés biomatériaux, ont pour vocation thérapeutique le remplacement de parties du corps humain. L'enjeu principal est d'obtenir une biocompatibilité active, c'est-à-dire une bonne adaptation de l'organisme à l'introduction d'une nouvelle contrainte locale (l'implant) et une réponse appropriée, d'ordre biologique et/ou mécanique, selon les fonctions déficientes à restaurer.

3.9.2. Un état de l'art s'appuyant sur des états de conjoncture ou avis récents

Dans cette exploration du vivant, dont le cahier des charges est exigeant (variabilité du comportement, hétérogénéité, aspect multiéchelle et multiphysique, complexité structurelle et de comportement), la mécanique a, d'ores et déjà, développé une grande palette de thèmes et de méthodes, parmi lesquels on peut citer : la résistance des matériaux, l'hydraulique, l'élasticité mais aussi la mécanique des milieux continus hétérogènes et anisotropes, souples et durs, la mécanique des milieux poreux multiphasiques et déformables, sièges de phénomènes couplés incluant des réactions chimiques, des transports et des transferts de masse, des interactions électriques dues à la présence d'ions et de macromolécules chargées. Les outils de modélisation et d'expérimentation, dont nombre ont déjà été employés au niveau national pour l'étude des milieux inertes, sont :

- la reformulation des approches classiques de la mécanique des milieux continus (qui furent élaborées pour des matériaux inertes), afin de prendre en compte leur aptitude à évoluer en s'adaptant à leur environnement (dont la mécanique configurationnelle, la thermodynamique des processus irréversibles pour des systèmes ouverts multiphasés) ;
- les modèles de tenségrité pour la description du cytosquelette ;
- les approches granulaires et discrètes et la mécanique non régulière, en particulier pour la description des efforts internes au sein de la cellule, analogues à ceux observés au sein d'amas de grains cohésifs ;
- la poroélasticité comme cadre de modélisation des structures osseuses ;
- les lois hypoélastiques et hyperélastiques (voire hyperviscoélastiques) pour le comportement des tissus mous du vivant (tels que veines, artères, ligaments, tendons) ;
- les modèles de couplage fluide/structure ;
- les approches multiéchelles (os, bois, tissus mous) et multiphysiques (mécanotransduction, modèle poreux multiphasique) couplant mécanique, chimie, biologie, électricité et magnétisme ;

– les méthodes d'investigation du vivant sondent des objets d'étude hétérogènes, structurellement complexes, variables en termes de comportement. La caractérisation se fait *in vitro* et *in vivo*, et tente de prendre en compte la variabilité et l'incertitude de la réponse. Outre des essais mécaniques classiques (traction/compression, ondes, ultrasons…), des mesures de champ, de nouvelles techniques ont vu le jour, telles que nanomécanique, microfluidique, acoustique, PIV, mesure à l'échelle de la picoseconde... Les méthodes d'imagerie suivantes sont largement utilisées : optique, RMN, IRM, MEB, ultrasons, microscopie confocale, microscopie X, tomographie, élastographie, spectroscopie Raman.

Ces outils ont permis d'aborder un nombre important de thèmes, tels que :

– l'étude des sollicitations mécaniques sur un sujet vivant (efforts musculaires, articulaires), conduisant à la notion de design mécanique afin, par exemple, de produire de la résistance en compression, des solutions optimales pour des matériaux aux fonctions multiples, pour des biosubstituts. Cela présuppose la modélisation cinématique et dynamique du système ostéo-articulaire et musculo-squelettique, l'étude des contraintes biologiques propres au mouvement humain, la quantification des tensions musculaires, des forces articulaires et ligamentaires, la coordination des segments (maintien de l'équilibre). L'impact médical est lié au fait qu'un déséquilibre mécanique peut entraîner une arthrose spécifique ou une ostéoporose ; la rééducation post-traumatique, l'optimisation de gestes sportifs, la robotique anthropomorphe et d'autres systèmes de réalité virtuelle ;
– la compréhension et la modélisation des interactions du corps humain avec l'environnement permettent de développer des outils applicables à différents domaines, tels que la biomécanique du choc (modélisation et prototype physique du corps humain, à des fins d'évaluation et de protection des usagers des transports), l'ergonomie, la modélisation biomécanique pour l'orthopédie, la réadaptation fonctionnelle. Cela requiert la constitution d'une base de données anatomique, incluant une définition fine de la géométrie des organes, le développement de lois de comportement jusqu'à la rupture des tissus, la recherche de relations micro/macro du comportement. Les objectifs concernent l'identification de critères mécaniques d'apparition de dommages et la constitution d'une base de données expérimentales caractérisant la réponse aux chocs ;
– l'analyse de l'évolution des tissus au cours du temps en fonction des paramètres mécaniques, biologiques, chimiques (remodelage, cicatrisation, vieillissement, lignification…) et la mise en œuvre de lois de comportement spécifiques pour les tissus mous (veines, artères, ligaments, tendons, peaux) et les tissus durs (os). Plus généralement, c'est la simulation multiéchelle et multiphysique du comportement mécanique des tissus du vivant qui est visée : os, cartilage, muscle strié (couplages mécanique/électrique), tendons et ligaments ;
– la mécanique cellulaire (interaction entre membranes et fluides biologiques) et l'analyse de la structuration des tissus à partir de l'échelle

cellulaire conduit à mener une recherche intégrative, de la cellule à l'organe (individu) afin, notamment, d'appréhender les facteurs mécaniques favorisant la différenciation cellulaire du processus de régénération *in vivo*. En particulier, la compréhension des interactions cellules/matériaux (biomatériaux) en fonction des états de surface (activations cellulaires induites par différents états de surface, biomatériau recouvert d'un facteur de croissance pour la régénération osseuse) a un impact médical qui est l'augmentation du taux de réussite de l'implantation de prothèses ;

– l'étude des processus d'adaptation, de remodelage et de régénération osseuse (notamment lors de la présence d'implants), l'étude des propriétés mécaniques de l'os et du cartilage pour comprendre les mécanismes de fracture selon des approches multiéchelles à partir du niveau des travées osseuses. L'étude du cartilage, qui est un milieu poreux très déformable, relève d'une approche fortement pluridisciplinaire, impliquant des couplages entre les aspects biologique, physico-chimique et mécanique pour les phases de résorption, apposition et minéralisation osseuse, électromécanique visant à prendre en compte le gonflement dû à des charges négatives fixes. L'impact médical des recherches est ici la mise en place d'outils de diagnostic ou d'analyse prédictive des mécanismes de transformation du système osseux à l'échelle microscopique (mécanotransduction), suite à des sollicitations subies à l'échelle macroscopique (risques de fractures), ou encore la reconstruction de grands défauts osseux par l'emploi de biomatériaux poreux, un choix adéquat des techniques de reconstruction et de réparation ;
– les interactions fluide/structure biologiques, à l'instar des écoulements dans les veines ou artères, autour de capsules pour des systèmes microfluidiques (vectorisation de médicaments), la mise à disposition d'outils de pronostic/diagnostic pour les pathologies cardiovasculaires telles que sténoses, thromboses, anévrismes (combinant imagerie IRM, simulation des contraintes de cisaillement hydrodynamiques et des vitesses au voisinage de la paroi), ou la caractérisation du disque intervertébral par des approches couplées fluide/structure (transfert de fluide entre le noyau et l'espace intervertébral). L'impact médical est ici l'élaboration de prothèses vertébrales reproduisant de façon optimale le transfert d'effort et l'amortissement d'un DIV ;
– l'étude des végétaux, du bois et l'interaction entre les recherches en biomécanique dans le monde végétal et le monde humain (et animal).

3.9.3. Les orientations nécessaires en fonction des enjeux

Elles sont largement décrites dans ce qui précède ; il ressort en particulier la nécessité de :

- construire des modèles multiphysiques et multiéchelles de milieux fortement complexes, intégrant les aspects d'anisotropie, variabilité intrinsèque au vivant, hétérogénéité, comportement dépendant du temps, phénomènes

couplés, et faisant le lien entre les propriétés cellulaires (incluant l'influence de certaines pathologies) et les propriétés d'usage des tissus ;
- la constitution de bases de données anatomiques aussi larges que possible intégrant des paramètres multiphysiques en vue de réaliser des simulations numériques du comportement fonctionnel d'entités anatomiques prenant en compte la cinématique, les interactions des organes avec leur environnement, des modèles rhéologiques complexes ;
- aborder la mécanique du vivant selon une approche pluridisciplinaire, avec une interaction forte entre la mécanique et la médecine, la biomécanique et la bio-ingénierie au service de la conception et de la fabrication de biosubstituts.

3.9.4. Les verrous scientifiques et technologiques à lever

Le problème des cultures *in vitro* pour la reconstruction de tissus lésés comporte de multiples facettes : génétique dans le choix des cellules initiales (cellules mésenchymales ou différenciées), biochimique (choix du support polymérique, composition du milieu, contrôle en oxygène) et mécanique (amplitude et fréquence des sollicitations mécaniques, transport des divers composants). Les bioréacteurs doivent être capables de contrôler l'état mécanique de contrainte et de déformation des cultures, afin de réaliser la mécanotransduction de façon efficace à l'échelle cellulaire.

La conception d'organes artificiels (foie, muscles, tendons, peau) selon une approche propre à l'ingénierie tissulaire est un autre défi : cela passe par la conception et l'optimisation de supports de culture cellulaire (biomatériaux poreux, billes d'alginate, dispositifs d'encapsulation) en régimes statiques et dynamiques. Des spécialistes du génie des procédés, de biologie, de mécanique des fluides et des transferts sont ici regroupés dans un travail pluridisciplinaire.

3.9.5. Les enjeux industriels et sociétaux par domaines d'application

La bio-ingénierie est à l'avant-garde des efforts actuels en matière de recherche en biologie et en médecine. Elle vise à répondre à des enjeux majeurs de santé publique et de performance industrielle dans différents secteurs : industrie des technologies pour la santé, mais aussi du sport, des loisirs et des transports. Si le marché est globalement dominé par quelques grands groupes, il est également caractérisé par un tissu de PME ou TPE. La bio-ingénierie a pour objectif d'améliorer la qualité de vie des patients.

Des aspects industriels importants de la mécanique pour le vivant concernent différents domaines, ainsi :

– la mécanique cardiaque a pour objectif de fabriquer des appareils destinés à la cardiologie (défibrillateurs, valves) et des cœurs artificiels. Ce besoin a conduit à des études relatives aux aspects mécaniques du muscle cardiaque,

au couplage électromécanique (lui-même faisant intervenir la chimie) et au couplage inverse. L'arrêt cardiaque par hypoxie ou anoxie entraîne un dommage local du muscle, qui est quelquefois fatal, ce qui motive les tentatives actuelles de remplacement des tissus lésés par le génie tissulaire ;

– le génie tissulaire suscite de grands espoirs de fabrication de tissus artificiels dans les prochaines décennies, tels que peau, vaisseau, cartilage, os, tendon, muscle cardiaque. Cette fabrication nécessite la collaboration de biologistes, biochimistes, d'ingénieurs chimistes et mécaniciens. Le principe de l'ingénierie tissulaire consiste à prélever des cellules souches sur un individu, qui sont disposées sur une matrice support poreuse 3D (*scaffold* en anglais), et à les cultiver ensuite dans un bioréacteur dans lequel on contrôle les paramètres physico-chimiques (teneur en oxygène...) et les sollicitations mécaniques (statiques ou cycliques). Le tissu arrivé à maturité est alors implanté (d'abord sur l'animal, puis sur l'Homme). Pour chaque tissu existe un grand nombre de méthodes potentielles, avec de nombreuses variantes. On a ainsi remarqué que la quantité de tissu fournie par les cultures *in vitro* est plus importante pour des supports polymériques tridimensionnels ouverts que pour des cultures monocouches. De plus, les cellules de base (chondrocytes pour le cartilage) ont une différenciation sensible aux contraintes mécaniques ;

– les biomatériaux ont connu depuis leur essor dans les années 1990 le développement d'une panoplie très vaste de substituts, tels que vaisseaux artificiels, valves cardiaques, stents, implants dentaires, remplacements de cristallin, prothèses de la hanche, du genou, du coude ou du poignet, cœur, pancréas, sphincter, ligament ou tendon artificiel, vis, plaques, broches, colles, drains, matériaux de suture, pompes portables et implantables, dialyseurs. Quatre grandes classes de biomatériaux peuvent être identifiées : les métaux et les alliages métalliques (acier inoxydable, titane, cobalt, chrome, molybdène, tantale), les céramiques (alumine, zircone, hydroxyapatite), les polymères fonctionnels ou résorbables et les matériaux d'origine naturelle (corail, chitine, fucanes, dextranes, cellulose, collagène…). Un biomatériau utilisé à des fins médicales doit respecter un cahier des charges d'ordre biologique et médical (tolérance immunitaire, absence de rejet de substances toxiques), mécanique (cycles d'ouverture et de fermeture d'une valve cardiaque, résistance de l'articulation de la hanche à une charge équivalente à trois à dix fois le poids du corps), chimique et biochimique (le milieu vivant est riche en eau et en substances corrosives ou oxydantes). Ainsi, l'arthroplastie de la hanche (remplacement total de la hanche) implique plusieurs disciplines de l'ingénieur, soit la mécanique, la tribologie et le génie des matériaux. L'opération consiste à remplacer la tête du fémur et le logement du pelvis par une prothèse en deux parties emboîtées ; on voit ici l'importance de l'interface os/prothèse (contraintes engendrées par frottement) et du choix des matériaux pour la pérennité de l'opération ;

– les muscles artificiels sont produits par le génie chimique sous forme de polymères électroactifs. Le principe de fonctionnement repose sur le couplage électrique/mécanique (flexion d'une plaque chargée et soumise à un champ électrique par conversion d'énergie chimique en énergie mécanique). Les

applications concernent par exemple la robotique médicale, où les muscles artificiels sont utilisés dans certains projets comme les doigts d'une main artificielle ;
– la mécanique des chocs : l'étude du comportement dynamique du choc des tissus et organes se fait en interaction forte avec des industriels du secteur des transports.

3.9.6. Les liens et concertations nécessaires avec les autres disciplines

L'étude du vivant et de l'interface vivant/(bio)matériau est, d'après ce qui précède, l'objet d'une recherche naturellement pluridisciplinaire, qui sollicite des modèles mathématiques et informatiques, la science des matériaux, la rhéologie, la mécanique des fluides et des solides, la thermique, l'anatomie, la biologique moléculaire, cellulaire et structurale, la chirurgie… Plusieurs groupes scientifiques et techniques sont ainsi concernés par la thématique : mécanique des matériaux (MECAMAT), comportement des matériaux composites, hydrotechnique et mécanique des fluides, rhéologie, thermique, vibrations et bruits.

3.9.7. La position française par rapport à l'international

La France est sans doute dans une position comparable à celle des autres pays européens en matière de recherche fondamentale en mécanique du vivant. La discipline est bien reconnue au niveau international, avec une présence significative de ses membres (en particulier les membres de la société de biomécanique) dans les congrès internationaux, que ce soit en Europe ou aux États-Unis. La discipline s'est développée en France plus tardivement par rapport aux États-Unis, qui ont su marier plus rapidement que nous mécanique et médecine, et ont de ce fait rapidement développé la bio-ingénierie au même niveau que les autres disciplines en sciences de l'ingénieur.

3.9.8. Recommandations et perspectives

On peut avancer quelques recommandations pour l'évolution de la discipline dans le futur :

- lier le développement de recherches fondamentales conduisant à des connaissances en amont sur le comportement des milieux du vivant à une contribution forte de l'ingénierie, en vue notamment de la maîtrise de l'ingénierie cellulaire, tissulaire et osseuse. Les avancées en ingénierie doivent, par ailleurs, développer des outils conduisant à des avancées des techniques médicales et de la pratique médicale au quotidien. Il s'agit donc aussi de sensibiliser les praticiens du monde hospitalier, dont la pratique est souvent encore empirique, à l'intérêt d'une approche plus scientifique dans laquelle la mécanique (notamment la mécanique des tissus) a un rôle important à jouer ;

- mieux structurer la communauté nationale : on distingue en effet, d'une part, des laboratoires reconnus dans le domaine ayant pignon sur rue et, d'autre part, des équipes émergentes ou en voie d'être officiellement labellisées. La structuration peut se faire par les GDR (laboratoires sans murs sur une thématique donnée) et les réseaux de chercheurs ;
- mieux identifier les besoins industriels en connaissances fondamentales afin de renforcer le lien entre production de connaissances fondamentales et réalisation de dispositifs innovants. Dans le même registre, accompagner des industriels dans le développement d'innovations diagnostiques et thérapeutiques ;
- former à et par la recherche de jeunes scientifiques (dont les ingénieurs) aux disciplines concernées. Mettre en place des cursus spécialisés en biomécanique et bio-ingénierie au sein des écoles d'ingénieurs et au niveau master, faisant appel à des intervenants de multiples horizons (praticiens hospitaliers, radiophysiciens, mécaniciens, spécialistes en techniques d'imagerie), et créer de nouvelles écoles d'ingénieurs sur ces thématiques ;
- promouvoir la conception de matériaux biocompatibles et de tissus artificiels pour remédier au vieillissement.

3.9.9. Les laboratoires concernés

Une liste des principaux laboratoires développant des activités en mécanique du vivant depuis plusieurs années peut être dressée. La discipline est en essor rapide à l'échelle nationale et il est clair que d'autres laboratoires ou équipes possèdent des activités émergentes, mais ne seront pas mentionnés dans ce bilan.

B2OA (UMR 7052), Paris 7 ; Biomécanique et bio-ingénierie (UMR 7338), UT Compiègne ; Laboratoire de biomécanique appliquée (LBA, UMR_T 24), Aix-Marseille ; Laboratoire de fiabilité mécanique (EA 4362), Metz ; Laboratoire de biomécanique de l'ENSAM (EA 4494), Paris ; LaMCoS (UMR 5259), Lyon ; LAMIH (FRE 3304), Valenciennes ; Laboratoire de biomécanique et mécanique des chocs (LMBC, UMR_T 9406), Lyon 1 ; Laboratoire d'énergétique et de mécanique théorique et appliquée (LEMTA, UMR 7563), Nancy ; Laboratoire de mécanique et de génie civil (LMGC, UMR 5508), Montpellier ; Institut des sciences du mouvement (UMR 7287), Aix-Marseille ; Modélisation et simulation multiéchelles (MSME, UMR 8208), Marne-la-Vallée.

Nos sources d'inspiration sont notamment le rapport de conjoncture du CNRS (2010) et le texte rédigé par B. Loret, « Manisfeste pour une ingénierie biomécanique », http://geo.hmg.inpg.fr/loret/lorethp.html.

3.10. Mécanique des fluides

3.10.1. Descriptif de la thématique

On s'intéresse ici aux fluides, c'est-à-dire à des milieux dont les déformations peuvent prendre des valeurs aussi grandes que l'on veut. On distingue

généralement les gaz, les liquides et les plasmas. Ces milieux peuvent prendre une forme quelconque lorsqu'ils sont soumis à un système de sollicitations, ces sollicitations pouvant être aussi faibles que l'on veut, à condition qu'on les fasse agir pendant une durée suffisamment longue. Une très grande majorité des problèmes de mécanique des fluides sont traités dans le cadre de la mécanique des milieux continus, avec des lois de comportement très diverses.

3.10.2. État de l'art

Comme le rappelle le rapport de conjoncture 2010 de la section 10 du Comité national de la recherche scientifique [1], la mécanique des fluides demeure « une discipline scientifique dont la maîtrise conditionne un grand nombre d'évolutions technologiques dans la plupart des grands secteurs économiques tels que les transports, l'énergie, le génie chimique, l'environnement, la sécurité, l'aménagement des territoires, l'élaboration de matériaux, le biomédical ».

Cela peut être illustré, par exemple, dans le secteur des transports terrestres, aériens et maritimes. Dans ce secteur, qui représente environ 50 % de la consommation mondiale annuelle de produits pétroliers, la réduction de la consommation d'énergie est devenue un enjeu majeur, aussi bien sur le plan économique qu'écologique. En 2003, on estimait que la consommation annuelle de carburant était de 2,1 milliards de barils de pétrole pour le transport maritime et de 1,5 milliard de barils de kérosène pour le transport aérien. La mise au point de technologies permettant de réduire la consommation, soit de manière passive en optimisant les formes ou en améliorant le rendement des systèmes de propulsion, soit de manière active avec des technologies de rupture fondées sur le contrôle des écoulements, est aujourd'hui un thème de recherche central.

Ce même rapport [1] rappelle également que « des avancées significatives ont été faites au cours des dernières décennies tant dans le domaine de la simulation numérique que dans le domaine de la métrologie » et que « le développement de méthodes expérimentales permettant d'accéder à des informations de mieux en mieux résolues en espace et en temps continue d'accompagner la validation des développements numériques ». La simulation numérique en mécanique des fluides est par exemple, aujourd'hui, un outil intégré à la conception de produits dans le secteur automobile, notamment pour l'aérodynamique tant externe qu'interne, l'aéroacoustique et l'aérothermique.

Il indique que « des développements fondamentaux continuent à être menés autour de la modélisation de la turbulence, dans des conditions significatives par rapport aux domaines d'application ». Il détaille enfin les thèmes d'ampleur qui se sont dégagés assez récemment, à savoir :

- mécanismes non linéaires et compréhension de la transition laminaire/turbulent avec des perspectives de contrôle associées ;
- turbulence développée dans des situations d'anisotropie associées par exemple à la rotation, la stratification ou la magnétisation ;
- transport turbulent, en incluant les transferts de chaleur turbulents, avec un large spectre de particules transportées ;

– interactions entre fluide et structure, dont les implications sont fortes tant dans le domaine industriel que dans le domaine environnemental ;
– microfluidique ;
– biomécanique des fluides ;
– dynamique de fluides à rhéologie sophistiquée et/ou en milieux complexes (écoulements multiphasiques, changements de phases, polymères, suspensions de particules, milieux granulaires, pâtes et poudres, fluides biologiques, milieux poreux) ;
– acoustique non linéaire dans ses divers aspects ; les développements du domaine de l'acoustique sont très largement détaillés dans le récent Livre blanc publié à l'initiative de la Société française d'acoustique [2].

3.10.3. Les orientations nécessaires en fonction des enjeux

Les mécaniciens des fluides sont de plus en plus intégrés à des études nécessitant des approches multi-physiques. Le document sur les « Technologies prioritaires 2015 en mécanique » [3] ne fait guère apparaître la mécanique des fluides de façon explicite, mais on la retrouve implicitement dans, d'une part, la nécessité de développement ou d'optimisation de certains procédés de fabrication et, d'autre part, dans le cadre du développement d'outils numériques de simulation et d'optimisation multiphysique et multiéchelle.

Le document « Technologies clés 2015 » [4], publié à l'initiative du ministère de l'Industrie, de l'énergie et de l'économie numérique, présente quant à lui un caractère beaucoup plus large puisqu'il se décompose en sept grands secteurs :

– chimie, matériaux, procédés ;
– technologies de l'information et de la communication ;
– environnement ;
– énergie ;
– transports ;
– bâtiment ;
– santé, agriculture et agroalimentaire.

La mécanique des fluides est évidemment au cœur de développements technologiques prévus à l'horizon 2015, plus particulièrement dans les secteurs de :

– l'environnement :
  • captation maîtrisée et traitement des sédiments pollués,
  • dessalement d'eau de mer à faible charge énergétique,
  • traitement des polluants émergents de l'eau,
  • traitement de l'air, gestion des ressources en eau ;
– l'énergie :
  • hydroélectricité, énergies marines,
  • énergie éolienne en mer,

- énergie nucléaire,
- géothermie ;

– les transports :
  - nouvelles technologies de turbomachines,
  - nouveaux concepts pour l'augmentation des performances et la réduction des nuisances (contrôle d'écoulement, optimisation des engins).

Elle est également présente, mais de manière plus secondaire, dans bon nombre des autres secteurs et bénéficiera pleinement des développements attendus dans le secteur des « technologies de l'information et de la communication », dans le domaine du calcul intensif.

Cette prospective à l'échelle nationale est en phase avec des études du même type réalisées au niveau international, comme par exemple le travail sur les technologies clés effectué en 2005 au niveau européen [5].

3.10.4. Les enjeux industriels et sociétaux

Dans ces divers secteurs, les travaux s'orientent principalement vers le développement d'outils de modélisation, validés expérimentalement aux échelles pertinentes en temps et en espace, aptes à favoriser la conception optimale de solutions technologiques performantes ou l'amélioration des conditions d'alerte et de sécurité associées aux risques naturels. Les travaux permettant l'amélioration des moyens métrologiques, plus particulièrement dans le domaine des méthodes de champ non intrusives, demeurent donc une nécessité.

Mais il est clair que, tout en restant au centre de ces développements, le spécialiste de mécanique des fluides est de plus en plus amené à collaborer avec des experts d'autres spécialités (mécanique des structures, génie électrique, thermodynamique, transferts de chaleur, combustion, etc.), de façon à pouvoir prendre en compte de façon optimale les interactions entre les fluides et leurs environnements.

3.10.5. Les verrous scientifiques et technologiques à lever

Sur le plan de la méthodologie d'étude, l'importance grandissante de la **simulation numérique** a conduit la plupart des équipes de recherche à se renforcer sur cette thématique à laquelle certaines unités de recherche sont entièrement dédiées. Les progrès informatiques sont naturellement à l'origine de cette évolution incontournable pour conserver une position favorable sur le plan international. L'enjeu autour de la simulation s'est même intensifié ces dernières années dans le développement du calcul haute performance, via l'installation, dans les pays leaders en recherche scientifique, de supercalculateurs massivement parallèles. Ces derniers permettent d'affronter des problèmes physiques à très grand nombre de degrés de liberté. Les écoulements de fluides multiphysiques et multiéchelles en sont un très bon exemple.

L'architecture massivement parallèle autorise le maintien d'une croissance exponentielle de la puissance de calcul disponible pour la recherche et l'industrie.

Dans le contexte de la recherche française, on peut noter la création du Grand Équipement national de calcul intensif, qui fédère les principaux centres de calculs nationaux et qui s'inscrit dans la restructuration des moyens de calculs à l'échelle européenne. Ce nouveau type de supercalculateur s'avère néanmoins très exigeant sur le plan des développements, en imposant aux spécialistes en simulation numérique de repenser la structuration de leurs codes de calculs et même de leurs méthodes numériques. Ce type de contrainte ne peut être surmonté qu'à travers une approche multidisciplinaire combinant une expertise mathématique (calcul scientifique et analyse numérique), informatique (langage de programmation et prise en compte avancée de l'architecture informatique logicielle et matérielle) et physique. On peut penser que cet impératif multidisciplinaire pour la mécanique des fluides numérique ira en s'accentuant dans les prochaines années. Cela devrait conduire la discipline à renforcer davantage ses interactions avec d'autres domaines d'applications nécessitant la levée de verrous scientifiques, telles, par exemple, la modélisation des raccords entre les différentes échelles présentes dans la physique ou la pratique d'algorithmes d'inversions.

On peut illustrer ces besoins de développement d'outils de simulation numérique en prenant l'exemple de la modélisation des **interactions entre fluides et structures**. On traite ici les couplages dynamiques entre une structure immergée et un fluide en écoulement. Les problèmes théoriques sont nombreux et les applications intéressent tous les domaines (nucléaire, aéronautique, transports terrestres, énergie, etc.). Les verrous et points de blocage concernent :

- la caractérisation des changements de régime et des nombres critiques fluide/structure qui leur sont associés lors de bifurcations vers des régimes développant des amortissements négatifs et leur prédiction à grand nombre de Reynolds ;
- la modification de la turbulence hors équilibre et sa modélisation en présence de fortes instationnarités (décollements massifs, ondes de choc et interactions avec les couches limites pariétales) et d'amplification des instabilités ;
- le couplage avec des matériaux tels que les matériaux électroactifs (alliages à mémoire de forme, polymères électroactifs, actuateurs piézo) afin de produire des structures solides capables d'optimiser leur forme pour contrôler les instabilités (avion souple de prochaine génération, structures hydrodynamiques optimales par exemple).

Les difficultés majeures qui demeurent se situent bien évidemment dans les zones d'interaction où des transferts d'informations entre codes de calculs doivent avoir lieu. Des efforts importants doivent encore être poursuivis dans le domaine de la réduction de modèles de façon à pouvoir couvrir les applications industrielles complexes, et des développements significatifs doivent être réalisés pour développer par exemple :

- des modèles de turbulence et/ou des lois de paroi appropriées prenant bien en compte la déformabilité des parois solides et les interactions locales avec les fluides en écoulement ;

- des modèles permettant de mieux représenter la dynamique des changements de phase (condensation, ébullition, cavitation) au voisinage de parois.

La **compréhension, la prévision numérique et le contrôle** (passif ou actif) **des écoulements turbulents** demeurent un enjeu majeur, tant sur le plan fondamental que pour les applications. Après plus d'un siècle de recherche active, la dynamique des écoulements turbulents et la transition à la turbulence demeurent des sujets ouverts. L'extension aux cas multiphysiques rencontrés dans les applications complique encore la tâche. La prévision des écoulements turbulents nécessite, pour aborder des cas réalistes, l'emploi de modèles de turbulence, dont la fiabilité et le spectre physique doivent encore être améliorés. Cette extension des modèles de turbulence est pilotée par le besoin grandissant de réaliser des simulations instationnaires et celui de prendre en compte des couplages multiphysiques qui modifient la dynamique turbulente (combustion, changement de phase, fluides à rhéologie complexe, etc.).

Si la simulation numérique est un moyen d'importance croissante pour accéder aux informations sur la dynamique des écoulements complexes, **l'expérimentation** demeure une source incontournable de renseignements. Elle a toujours une importance de premier ordre pour la recherche fondamentale, la validation des outils de simulation, la collecte des données de terrain ou la caractérisation des engins et machines à échelle 1. La finesse requise, toujours plus grande, des données nécessite la poursuite des développements en métrologie et en traitement du signal. Des avancées notables ont été réalisées ces dernières années, en particulier dans le domaine des méthodes optiques à haute résolution spatiale et temporelle (PIV[1] holographique et PIV 3D, fluorescence induite par laser), ainsi que dans les mesures pariétales quantitatives de pression et de frottement par peintures sensibles. Ces avancées doivent être poursuivies pour gagner en précision et étendues en gamme de régimes physiques : mesures de champs thermodynamiques, environnements difficiles à haute pression et haute température, écoulements multiphasiques, changements de phase, etc. Ces méthodes de champ ou pariétales devront être de plus en plus souvent couplées en temps réel à des moyens complémentaires que sont par exemple l'utilisation de rayons X et la thermographie infrarouge, voire remplacées ou complétées par d'autres techniques, telle l'imagerie par résonance magnétique nucléaire, pour accéder à des milieux difficilement accessibles optiquement. Dans le domaine de la mécanique des fluides de l'environnement, l'utilisation encore plus massive des techniques de télédétection par laser ou LIDAR[2] est amenée à se développer en relation avec l'acquisition de données de terrain et en lien avec la morphodynamique. Un point marquant est que les mesures produisent aujourd'hui des données qui, en volume et en nature, sont similaires à celles produites par les simulations numériques. Il en est de même, dans le domaine des applications environnementales, pour la gestion de bases de données de terrain en relation, par exemple, avec les outils numériques de prévision et de prévention des zones inondées (crues, submersions marines, états de mer). Le développement de

[1] PIV : vélocimétrie par images de particules.
[2] LIDAR : *Light Detecting and Ranging*.

méthodes d'extraction de l'information pertinente des données accumulées est donc un enjeu majeur pour le futur proche.

Les gains en performance et en robustesse des engins et des systèmes sont aujourd'hui recherchés de plus en plus souvent en ayant recours au **contrôle des écoulements**. Passif ou actif, le contrôle des écoulements requiert une très bonne connaissance de la physique à contrôler. Ici, le passage de l'échelle de l'expérience de laboratoire à l'échelle du système réel fait souvent apparaître une baisse de l'efficacité du contrôle, due au fait que la complexité du système réel a un impact non négligeable sur les mécanismes physiques à contrôler. Il nécessite aussi la mise au point d'actionneurs efficaces et viables sur le plan industriel, le dernier point faisant le plus souvent défaut. Enfin, dans le cas du contrôle actif à boucle fermée, la notion de contrôle en temps réel demande la mise au point de capteurs et de modèles réduits qui permettent de modéliser de manière efficace l'écoulement à contrôler et son évolution temporelle. Sur ce dernier point, on peut noter que les travaux récents intègrent des approches classiques de modélisation des processus stochastiques (exemple : modèles ARMAX), qui ne reposent pas sur les équations constitutives de la mécanique des fluides. La poursuite des recherches sur tous ces points est incontournable pour parvenir à des avancées technologiques significatives.

Un autre thème important est la **microfluidique**, dont les applications technologiques se multiplient dans de très nombreux domaines. C'est ainsi que les composants développés, tels que micropompes, microvannes, microéchangeurs de chaleur ou microcapteurs, ont vu leur utilisation exploser au cours de la dernière décennie dans l'analyse chimique, les diagnostics biomédicaux ou les refroidissements de composants électroniques. La microfluidique est caractérisée par l'exploitation de mécanismes physiques peu rencontrés dans les applications à plus grand nombre de Reynolds et ouvre ainsi de nombreuses perspectives en termes de recherche fondamentale. La réduction en échelle pose également de nouveaux problèmes technologiques, aussi bien pour la mesure que pour la fabrication. Au niveau métrologique, des enjeux importants demeurent pour la mise au point de mesures de pression, de température, de débit, aux incertitudes bien maîtrisées. Des développements demeurent nécessaires pour l'utilisation étendue de la micro-PIV, de la « *Molecular Tagging Velocimetry* » (MTV) et de la « *Molecular Tagging Thermometry* » (MTT), voire des « *femtosecond pulsed light sources* ». La modélisation physico-mathématique des écoulements est également un problème dans de nombreux cas, les descriptions macroscopiques classiques (équations de Navier-Stokes, conditions aux limites) ne prenant pas en compte tous les mécanismes physiques à l'œuvre. Ce dernier point est encore renforcé dans le cas de la nanofluidique. Ici aussi, les progrès technologiques souhaités nécessitent des avancées théoriques et pratiques de grande ampleur. Les références récentes [6] et [7] développent plus longuement des perspectives dans ce domaine en pleine évolution.

Le domaine des **écoulements multiphasiques** présente également des enjeux de développement importants pour de nombreux secteurs d'application (cavitation dans les machines hydrauliques, génie des procédés, combustion dans les moteurs, ébullition et condensation dans les échangeurs de chaleur). Un important verrou de la modélisation des écoulements diphasiques dispersés consiste en

la prise en compte du couplage inverse dans les propositions de lois de fermeture de la turbulence. Le couplage inverse consiste en une rétroaction de la phase dispersée sur la turbulence de la phase continue. Plusieurs types de couplage inverse existent :

(i) à titre individuel : des inclusions à grand nombre de Reynolds du mouvement relatif peuvent engendrer des perturbations importantes dans le fluide porteur et les interactions de ces sillages constituent ce que l'on convient d'appeler « l'agitation induite » par les inclusions ;

(ii) à titre collectif : des amas de particules qui ont des nombres de Reynolds relatifs faibles (et qui n'impriment donc pas de perturbation notable à titre individuel sur le fluide porteur) peuvent profondément modifier la turbulence du fluide porteur, même dans des régimes très dilués. Ces amas apparaissent par des effets de ségrégation inertielle dans les mouvements tourbillonnaires de la turbulence (éjection pour des particules lourdes et accumulation des particules légères aux centres des tourbillons) : on parle de régime de « concentration préférentielle ». Les modèles de turbulence existants pour le fluide porteur sont marqués par des lois de fermeture issues des études sur les écoulements turbulents monophasiques. Ces lois sont corrigées trop légèrement et souvent arbitrairement pour prendre en compte des effets de rétroaction de la phase dispersée sur la phase porteuse.

Les enjeux de la modélisation du couplage inverse sont énormes pour la prédiction des écoulements à bulles pilotés par la gravité (où il n'y a pas de turbulence d'origine cisaillée préexistante à l'introduction des bulles). Ils concernent surtout les applications du génie des procédés où l'on trouve des contacteurs ou des réacteurs chimiques, dans lesquels on cherche à faire du transfert de masse entre un gaz et un liquide ou à mélanger les produits présents en phase liquide pour favoriser une réaction en phase liquide. Les appareils qui réalisent ces opérations sont dénommés « colonnes à bulles ». Les enjeux de cette problématique sont aussi importants pour les écoulements diphasiques liquide/gaz dans les moteurs à combustion (où l'apparition du régime de concentration préférentielle peut provoquer une combustion imparfaite).

Un autre verrou concerne les lois du mélange en écoulement de type écoulement à bulles. Il n'existe, à ce jour, que des corrélations empiriques et quelques modèles phénoménologiques peu élaborés. Les mécanismes spécifiquement diphasiques doivent être identifiés et les lois d'échelle ne sont pas encore connues non plus. Les utilisateurs de codes de calculs industriels en sont réduits pour leurs simulations à tester des variations de diffusivité turbulente tout à fait arbitraires et d'un facteur dix (ce qui est beaucoup trop) pour encadrer leurs prévisions.

Enfin, il est important de noter que les moyens d'investigation expérimentale en milieux diphasiques sont encore trop limités en raison, en particulier, de l'opacité de ces milieux qui rend inopérantes les techniques de mesures optiques locales dès que les écoulements ne sont plus dilués. Le développement de techniques

tomographiques (extrêmement coûteuses) peut constituer un axe de développement intéressant à soutenir.

3.10.6. Les laboratoires concernés

La recherche en mécanique des fluides s'appuie, en France, sur un très grand nombre de laboratoires. Ainsi, la section 10 du Comité national de la recherche scientifique suit des chercheurs dans plus de cent unités de recherche labellisées par le CNRS et revendiquant une activité en mécanique des fluides.

À ces équipes de recherche viennent s'ajouter des unités de recherche universitaires sans label CNRS, celles d'organismes publics de recherche spécialisés (Bassin d'essais des carènes, BRGM, CEA, IFPEN, IFREMER, IRSTEA, Météo-France, ONERA), celles de centres techniques (CETIM, CETIAT, CSTB) ou industriels (Alstom, Artelia, EDF, DCNS, Total, Safran par exemple). À noter également l'existence de laboratoires de recherche mixtes entre des industriels et le CNRS et/ou des universités.

Le potentiel de recherche est donc très important, ce qui est tout à fait justifié au vu de la grande variété des domaines d'application, aux problèmes très spécifiques. L'existence de GDR permet également une mise en réseau de laboratoires et d'industriels autour de thèmes de recherche en développement, le plus souvent multidisciplinaires. Ces interactions entre la recherche en mécanique des fluides et les préoccupations industrielles ou sociétales trouvent également de nombreux points d'ancrage au sein de certains pôles de compétitivité des secteurs de l'aéronautique et de l'espace, des transports, de l'énergie, de l'eau. Enfin, de nombreuses écoles thématiques permettent chaque année la formation de jeunes chercheurs sur des thèmes d'actualité.

3.10.7. La position française au niveau international

La France demeure un acteur majeur, au meilleur niveau international, en matière de recherche en mécanique des fluides.

Sur le plan académique, la France fait partie des trois premiers pays (avec les États-Unis et la Grande-Bretagne) en termes de représentation dans les comités éditoriaux des journaux internationaux spécialisés les plus prestigieux (*Annual Review of Fluid Mechanics* ; *Journal of Fluid Mechanics* ; *Physics of Fluids* ; *International Journal of Heat and Fluid Flow* ; *International Journal of Heat and Mass Transfert* ; *Fluid, Turbulence and Combustion* ; *Computers and Fluids* ; *Experiments in Fluids* ; *ASME Journal of Fluids Engineering*).

Au niveau européen, les chercheurs français en mécanique des fluides participent efficacement aux projets des programmes-cadres de recherche dans de nombreux secteurs d'application, y compris pour leur pilotage.

Sur le plan applicatif, l'existence d'organismes publics de recherche spécialisés (Bassin d'essais des carènes, BRGM, CEA, IFPEN, IFREMER, IRSTEA, LHEEA Météo-France, CEA, ONERA) au service de grands acteurs industriels parmi les leaders mondiaux dans leurs domaines (Airbus, Safran, EDF, Total, Alstom, etc.) assure une visibilité et un leadership constants sur certaines thématiques de

recherche depuis plusieurs décennies. Cette activité a permis l'émergence et le maintien de grands moyens d'essais de niveau mondial (grandes souffleries, tunnels hydrodynamiques, bassins d'essais de modèles physiques).

3.10.8. Recommandations et perspectives

La mécanique des fluides reste une branche de la mécanique et de la physique dont le développement demeure capital pour de nombreux secteurs d'application tels que, par exemple, l'énergie, les transports, l'environnement, le génie chimique, la santé.

Des études fondamentales sur des modèles pertinents demeurent nécessaires, mais il est certain que des efforts importants de recherche doivent être faits conjointement dans les développements d'outils de modélisation numérique performants et validés par l'accès à des expérimentations pertinentes s'appuyant sur des outils d'analyse permettant d'accéder à des informations de qualité aux échelles pertinentes en temps et en espace. La prise en compte des interactions nécessaires avec les autres disciplines devra être plus systématiquement recherchée, de façon à permettre une adaptation optimale des résultats aux enjeux industriels et sociétaux.

3.10.9. Bibliographie

[1] *Milieux fluides et réactifs : transports, transferts, procédés de transformation*, rapport de conjoncture 2010 de la section 10 du Comité national de la recherche scientifique, 2010, 11 pages.

[2] *Le livre blanc de l'acoustique en France en 2010,* Société française d'acoustique, décembre 2010, 136 pages.

[3] *Technologies prioritaires en mécanique 2015.*

[4] *Technologies clés 2015,* ministère de l'Industrie, de l'énergie et de l'économie numérique, 2010, 330 pages.

[5] *Reports for the Key Technologies :*
- *Biotechnology*, July 2005, 50 pages ;
- *Energy*, August 2005, 63 pages ;
- *Environmental Technologies*, July 2005, 63 pages ;
- *Les enjeux liés aux transports*, avril 2005, 145 pages ;
- European Commission, DG RDT K2, Technology Foresight Unit.

[6] « Heat Transfer in Microchannels – 2012 Status and Research Needs », S.G. Kandlikar, S. Colin, Y. Peles, S. Garimella, R.F. Pease, J.J. Brandner, D.B. Tuckerman, *ASME Journal of Heat Transfer*, September 2013, vol. 135, p. 091001-1–091001-18.

[7] « A critical review of the measurement techniques for the analysis of gas microflows through microchannels », G.L. Morini, Y. Yang, H. Chalabi, M. Lorenzini, *Experimental Thermal and Fluid Science,* 2011, vol. 35, p. 849–865.

3.11. Vibrations et vibroacoustique, aéroacoustique

Les **vibrations**, oscillations répétées autour d'un état d'équilibre, sont présentes dans tous les domaines physiques, de la chimie à l'électricité, de l'optique à l'acoustique. Exploitées depuis des siècles dans les instruments de musique, les vibrations des structures mécaniques et de l'air qui les entoure constituent aujourd'hui une thématique bien identifiée tant dans le domaine scientifique que dans l'ingénierie industrielle, souvent intitulée « vibrations et acoustique ».

L'**acoustique**, ou « science des sons », est une discipline très large dotée de sa propre société savante, la Société française d'acoustique (SFA). *Le livre blanc de l'acoustique*, publié par la SFA en 2010, présente un état des lieux des applications et développements dans onze grands secteurs d'activité et décline l'acoustique selon douze thèmes scientifiques. Certains de ces thèmes présentent un recouvrement plus ou moins important avec les activités de l'Association française de mécanique. Nous avons fait le choix de n'inclure dans ce Livre blanc que les thèmes « vibroacoustique » et « aéroacoustique » traités dans le texte qui suit.

3.11.1. Vibrations et vibroacoustique

3.11.1.1. Périmètre de la thématique

On s'intéressera donc ici aux **vibrations des structures mécaniques et à leurs interactions avec le milieu qui les entoure** (en général de l'air ou de l'eau).

La destruction du pont de Tacoma sous l'effet du vent en 1940 est sans doute l'exemple le plus courant pour illustrer les effets extrêmes d'une mauvaise appréhension de la dynamique d'une structure et des interactions avec son environnement. Dans l'aéronautique, le même phénomène – dit de flottement – est redouté, tant pour la structure de l'avion que dans les turbines des réacteurs. La compréhension et la maîtrise de ces comportements dynamiques couplés a fortement stimulé le développement de la thématique dès les années 1960.

Aujourd'hui, la **dynamique des structures** fait partie intégrante des outils de dimensionnement dans le monde industriel. Si le calcul de structure par éléments finis s'est imposé comme un outil de référence pour la prédiction numérique, la place des essais expérimentaux est encore très importante pour la validation des modèles ou la certification du respect des spécifications.

3.11.1.2. Les pratiques actuelles

3.11.1.2.1. L'analyse modale

Le recours au **prototypage virtuel** est aujourd'hui une réalité omniprésente dans tout processus de conception. Dans ce monde numérique, les outils de calcul de structure sont de plus en plus accessibles et intégrés à la démarche de conception assistée par ordinateur (CAO).

Les premières **fréquences de résonance** des structures peuvent être estimées avec une précision typique de 10 à 20 %, même en l'absence de prototype physique. Elles constituent un élément important du cahier des charges vibratoire, qui peut par exemple exiger l'absence de résonance en dessous d'une fréquence

donnée. Les **déformées modales** représentent la façon dont la structure vibre à chacune de ses fréquences de résonance. Généralement prédites avec moins de fiabilité car très sensibles aux détails locaux, elles peuvent néanmoins être exploitées pour améliorer la conception.

L'analyse de ces « modes vibratoires » via leurs fréquences et déformées, appelée **analyse modale**, est aujourd'hui un outil courant et bien maîtrisé dans le monde industriel, tant par la voie de la simulation numérique que par celle des essais expérimentaux. Elle est pertinente dans le domaine des « basses fréquences », c'est-à-dire tant que les résonances sont relativement séparées et dénombrables. Dans le domaine dit des « hautes fréquences », les phénomènes de résonance disparaissent, les vibrations des structures deviennent peu sensibles à la fréquence et sont relativement bien appréhendées par des **méthodes énergétiques** dont la plus connue est la méthode SEA, *Statistical Energy Analysis*.

3.11.1.2.2. L'amortissement

La finalité première d'un dimensionnement de structure est de garantir la **fiabilité** de sa tenue mécanique. Autrement dit, il s'agit de s'assurer qu'une proportion importante des structures produites ne connaîtra pas de rupture mécanique prématurée, conformément à une durée de vie ciblée par le cahier des charges. Les causes d'une rupture prématurée peuvent être variées : dépassement d'un seuil de contraintes admissibles, fatigue vibratoire, frottement et usure…

Au-delà de ce premier objectif de « résistance », un second enjeu – plus récent – concerne la **réduction des nuisances** vibratoires et acoustiques. Selon les secteurs industriels, il s'agit de respecter les normes dont les exigences deviennent de plus en plus sévères, ou de se démarquer de la concurrence, les conforts vibratoire et acoustique devenant de véritables arguments commerciaux, souvent au prix d'une surcharge embarquée pénalisant l'efficacité énergétique.

Dans tous les cas, les **niveaux vibratoires**, c'est-à-dire les amplitudes des vibrations subies par les structures, sont un critère fondamentalement dimensionnant. Or, ces amplitudes sont en grande partie pilotées par ce que l'on appelle « **l'amortissement** », qui représente l'ensemble des pertes d'énergie au cours des vibrations. Les phénomènes physiques qui en sont à l'origine sont divers et variés : frottements dans les liaisons, viscoélasticité dans les matériaux, couplage avec les fluides environnants… Ils ont néanmoins un point commun redoutable : ils sont difficiles à modéliser. La prédiction des niveaux vibratoires n'est possible dans la majorité des cas qu'en appliquant un amortissement identifié par essais sur des prototypes physiques ou « forfaitaire » issu de l'expertise dans le domaine d'application concerné. La confiance dans les résultats de calcul s'en trouve dès lors fortement altérée, ce qui conduit à l'application systématique de marges plus ou moins empiriques.

3.11.1.3. Quelques tendances

Sans prétendre dresser un inventaire exhaustif, on peut dégager quelques tendances importantes dans les pratiques actuelles de l'ingénieur.

3.11.1.3.1. Davantage de physique dans les modèles

La taille des modèles utilisés pour la simulation numérique du comportement vibratoire et acoustique ne cesse de croître grâce au développement des capacités

matérielles et logicielles. Les mailleurs automatiques permettent par ailleurs un lien efficace avec les logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO). Les modèles décrivent donc la géométrie des structures de plus en plus fidèlement ; néanmoins, la qualité des prédictions numériques est tributaire de la description des physiques mises en jeu. La majorité des problèmes industriels sont aujourd'hui traités avec des analyses linéaires purement structurales et déterministes, sous des hypothèses potentiellement éloignées de la réalité : matériaux élastiques, petites déformations, liaisons parfaitement rigides ou parfaitement élastiques, conditions aux limites idéales… On observe cependant une tendance forte pour des modélisations plus complexes, comprenant par exemple :

– des **couplages multiphysiques** : fluide/structure, magnétomécaniques, électromécaniques… ;
– des **comportements non linéaires** : frottement, contact, usure, grandes déformations, matériaux, turbulence fluide… ;
– des **analyses multiéchelles** dans l'espace ou le temps : lien micro/méso/macro, dynamiques lentes et rapides… ;
– des modélisations **non déterministes** : approches probabilistes ou non probabilistes, paramétriques ou non paramétriques pour représenter les variabilités (matérielles, géométriques…) et les méconnaissances (comportement ou environnement mal identifiés).

3.11.1.3.2. Davantage de recul sur la validité des simulations

Les États-Unis ont ratifié le Traité d'interdiction complète des essais nucléaires en 1996. La question s'est alors posée de valider de nouvelles conceptions ou technologies en se basant sur la simulation numérique, sans recours aux tests expérimentaux. Une méthodologie dite « ***Model Verification and Validation*** » (V&V) s'est progressivement développée jusqu'à conduire à la rédaction de guides et de normes, notamment pour la mécanique des solides et des fluides. Le déploiement de ce type d'approche s'étend aujourd'hui à toutes les disciplines, dans certains laboratoires de recherche et petit à petit dans le milieu industriel. Quelques questions fondamentales pour lesquelles l'approche V&V tente d'apporter des outils d'aide à la décision sont par exemple :

– De quelle qualité de modèle ai-je besoin relativement aux décisions que je prends ?
– Quelles erreurs puis-je tolérer sans remettre en question la décision que je prends ?
– Quelles incertitudes et quelles méconnaissances existent dans le problème traité ? Lesquelles puis-je réduire ? Comment cela améliorerait-il la confiance dans les résultats ?

Cette méthodologie englobe les étapes indispensables de confrontation calculs/essais et de calibrage de modèle (autrefois dénommé recalage). Dans ce domaine, le développement des mesures optiques à forte densité spatiale d'information (**mesures de champs**) et des méthodes associées d'**identification inverse** constitue également une tendance actuelle.

Enfin, pour certains domaines d'application, cette prise de recul sur l'objectif final de la simulation numérique conduit à inclure dans la boucle de modélisation des aspects **psychosensoriels** (acoustiques, tactiles…), nécessitant de rechercher des liens entre les caractéristiques physiques des phénomènes et la façon dont ils sont perçus par l'être humain.

Bien que ces éléments ne concernent pas seulement le domaine des vibrations de structures, la communauté scientifique est particulièrement active dans ce domaine.

3.11.1.3.3. Des technologies innovantes

Les années 1980 à 2000 ont vu l'essor de la « mécatronique » et du « contrôle actif » vibratoire et acoustique. Ce mélange de mécanique, d'électronique et d'automatique est toujours en plein développement mais on parle plutôt aujourd'hui de « **structure intelligente** » (*Smart Structure*). Le développement continu des microcapteurs et microactionneurs (MEMS, *MicroElectroMechanical Systems*), de la microélectronique, de l'informatique des réseaux distribués sont autant de leviers qui permettent d'imaginer de nouvelles fonctionnalités pour les structures : autonomie grâce à des dispositifs de récupération de l'énergie environnante, capacité de s'autosurveiller, de détecter et communiquer tout comportement anormal, de prédire leur propre durée de vie résiduelle (pronostic)…

Le domaine des **matériaux intelligents** (*Smart Materials*) est également en pleine effervescence. On peut notamment citer l'évolution très rapide des polymères fonctionnalisés par l'insertion de nanoparticules. Le développement des **métamatériaux** se situe quant à lui à mi-chemin entre matériaux et structures, puisqu'il s'agit d'exploiter des structurations périodiques (éventuellement microscopiques) pour leur conférer des propriétés inédites, par exemple en termes de propagation des ondes.

3.11.1.4. Des verrous à lever

Que ce soit dans le domaine des transports, de l'énergie ou du génie civil, nombre d'exemples montrent que la maîtrise du comportement vibratoire ou vibroacoustique des structures n'est pas encore une réalité systématique, même si d'énormes progrès ont été réalisés en quelques décennies.

Il est vain de vouloir recenser toutes les pistes de progrès ; on cite ici quelques aspects qui donnent du fil à retordre aux ingénieurs et par la même l'occasion d'axes de travail pour les chercheurs :

- la **prédiction et l'optimisation de l'amortissement** dans les structures sont des points particulièrement délicats, car ils touchent à de multiples phénomènes physiques. De nombreuses études sont en cours, en particulier sur les assemblages boulonnés ou rivetés, mais le chemin à parcourir est encore long jusqu'à des outils génériques exploitables par l'ingénieur ;
- les **matériaux composites** poursuivent leur essor. Présentant en général de meilleures performances mécaniques pour une masse moindre, ils apportent aussi de nouvelles difficultés : forte anisotropie, variabilité accrue, dégradation complexe… Le cas des matériaux composites tissés rend

particulièrement délicate la gestion des changements d'échelle (micro/méso/macro). On peut également citer le manque d'outils satisfaisants de modélisation des structures feuilletées telles que les stators ou rotors d'alternateurs et de moteurs électriques ;
– les dimensionnements vibratoires ou vibroacoustiques sont en très grande majorité basés sur des calculs linéaires, représentant une approximation parfois grossière des comportements réels. Des **approches non linéaires** sont menées pour des problématiques précises, mais elles ne font pas encore partie des « standards ». **L'utilisation positive des non-linéarités** à des fins d'amélioration des performances vibroacoustiques des matériaux et des structures (allègement, dimensionnement, contrôle, auscultation innovante, durabilité, récupération d'énergie, mesures par capteurs résonants, etc.) constitue une piste prometteuse pour des développements scientifiques et des innovations technologiques ;
– les **méthodes avancées** (temps/fréquence, statistiques, angulaires, etc.) **de traitement des signaux** de mesure sont des outils indispensables pour la caractérisation et le diagnostic, parfois en temps réel, des structures et des machines. Ce champ enrichit le thème « vibrations et vibroacoustique » en se positionnant à l'interface avec d'autres communautés (mathématiques, automatique, etc.) ;
– si les outils de **calculs multiphysiques** se développent, il est néanmoins souvent complexe et coûteux – voire impossible – de faire dialoguer entre eux plusieurs logiciels spécialisés. Ainsi, la modélisation de couplages forts (fluide/structure, magnétomécanique, électromécanique…) est encore difficile sur les modèles de grande taille ;
– le domaine des **moyennes fréquences**, situé entre le domaine modal à basses fréquences et le domaine énergétique à hautes fréquences, reste difficile à aborder tant sur le plan de la simulation que sur celui des essais. Des méthodes existent, les recherches se poursuivent, mais l'ingénieur ne dispose pas encore d'outils dédiés ;
– la nécessité de modéliser, quantifier et propager les **incertitudes** (expérimentales et de modélisation) est bien comprise dans le monde industriel. À terme, il s'agit de s'éloigner de l'application de marges de sécurité en se dotant d'outils quantitatifs de conception robuste.

3.11.1.5. Une communauté française importante et active

Sur le plan industriel, les secteurs les plus actifs dans le domaine sont :

– l'**aéronautique/aérospatial**, où la maîtrise de la fiabilité des structures joue un rôle prépondérant ;
– l'**énergie**, secteur très concerné par les vibrations des machines tournantes et par les problématiques de durée de vie ;
– l'**automobile**, où le confort acoustique est devenu un réel enjeu.

Sur le plan académique, la communauté scientifique « vibrations/vibroacoustique » française est active et compte de nombreux membres. On peut estimer

à une trentaine les laboratoires concernés, et à environ 300 les chercheurs et enseignants-chercheurs permanents. La plupart des équipes de recherche sont nées dans les années 1960–1970, puis se sont progressivement développées et spécialisées. Aujourd'hui, les effectifs sont stables et les compétences fortes de chaque laboratoire sont bien identifiées. Il est délicat d'établir une cartographie précise et complète des équipes de recherche, mais on peut tout de même citer quelques laboratoires fortement impliqués : FEMTO-ST (Besançon), IJLRA (Paris), LaMCoS (Lyon), LAMIH (Valenciennes), LAUM (Le Mans), LISMMA (Saint-Ouen), LMA (Marseille), LMR (Blois), LMSSC (Paris), LSIS (Lille/Aix-en-Provence), LTDS (Écully), LVA (Lyon), Roberval (Compiègne), MSME (Marne-la-Vallée), UME (Palaiseau).

Dans l'Association française de mécanique, la discipline est regroupée au sein du **groupe scientifique et technique** « **Bruit et vibrations** », qui entretient des relations étroites avec la Société française d'acoustique et, en particulier, avec son groupe « Vibroacoustique et contrôle du bruit » (GVB). Le symposium VISHNO (*Vibrations, Shocks and Noise*) anciennement dénommé VCB (Vibrations, chocs et bruit) réunit tous les deux ans les acteurs académiques et industriels, ainsi que les fournisseurs de matériels et logiciels dans une manifestation conviviale et riche en échanges. La 19e édition a eu lieu à Aix-en-Provence du 16 au 19 juin 2014. Par ailleurs, la 4e édition du colloque « Analyse vibratoire expérimentale » se tiendra du 18 au 20 novembre 2014 à Blois. On peut également citer les Journées jeunes chercheurs dédiées aux doctorants, dont l'édition 2014 sera organisée à Lyon avec le GVB de la SFA. Signalons enfin l'activité du groupement de recherche en dynamique non linéaire (GDR CNRS DYNOLIN n° 3437) qui témoigne de l'importance de cette activité sur le territoire français.

Outre l'animation « au quotidien » de la communauté scientifique et technique, le GST « Vibrations et bruit » de l'AFM souhaite développer des actions visant à :

- améliorer les outils de communication en réseau, notamment pour favoriser les relations entre laboratoires et entreprises ;
- proposer des outils mutualisés dédiés à la formation (éléments de cours, applications numériques ou expérimentales, dossiers de projet…) ;
- renforcer les liens entre formations, entreprises et laboratoires en faisant émerger des partenariats et collaborations qui se stabilisent dans le temps.

Ces objectifs ne sauront être atteints qu'avec la participation active, constructive et souvent « bénévole » de tous les acteurs, mais les bénéfices potentiels pour chacun et pour toute la communauté dépassent largement l'énergie investie !

3.11.2. Aéroacoustique

3.11.2.1. La thématique « aéroacoustique »

L'aéroacoustique est la discipline consacrée à l'étude du bruit d'origine aérodynamique, à sa propagation généralement en milieu non homogène, à son rayonnement ainsi qu'aux moyens de réduire ce bruit par contrôle actif du champ sonore ou de la source de bruit elle-même. Le mot « aéroacoustique »

est associé à la génération et la propagation dans les gaz. Des phénomènes analogues se produisent également dans les fluides lourds. On peut mentionner la propagation acoustique sous-marine ou le bruit de couche limite par exemple ; on parle alors plutôt d'hydroacoustique. L'étude des instabilités thermoacoustiques, des fluctuations de pression pariétale, qui constituent le champ excitateur pour le rayonnement des structures, ou bien encore la modélisation des conditions aux limites pour aborder des problèmes de propagation ou de contrôle font partie intégrante des domaines d'activités actuels de cette thématique. La surveillance du bruit peut également être utilisée comme outil de diagnostic pour la propagation en conduite ou les machines tournantes. Il existe également des applications pour la médecine, liées à la cavitation ou à la propagation non linéaire par exemple, qui relèvent de l'aéroacoustique. Ces frontières correspondent assez bien à ce que l'on peut observer au niveau international, dans des congrès comme la série des Aeroacoustics Conferences organisées conjointement par l'AIAA (American Institute of Aeronautics and Astronautics) aux États-Unis et le CEAS (Confederation of European Aerospace Societies) en Europe, ou bien encore la série des International Symposium on Nonlinear Acoustics (ISNA).

3.11.2.2. Quelques faits marquants

L'aéroacoustique a longtemps été réduite à des approches semi-analytiques ou à des modélisations qui s'avèrent souvent trop simplistes pour aborder efficacement la réduction du bruit et l'optimisation de configurations complexes (géométrie, écoulement turbulent compressible). L'une des avancées les plus spectaculaires de la dernière décennie est sans conteste l'apparition de simulations numériques complètes, à l'image de ce qui s'est développé pour la mécanique des fluides numérique, avec l'essor d'algorithmes spécifiques adaptés au traitement de la turbulence et de la propagation sonore. Il est maintenant possible de simuler l'écoulement turbulent associé au volume source et également une partie du champ acoustique rayonné. Ces méthodes sont maintenant aussi utilisées pour la simulation des écoulements turbulents compressibles et ces nouveaux outils algorithmiques sont largement repris dans la littérature. On a choisi de développer trois aspects parmi de nombreux autres qui ont contribué au rayonnement de l'aéroacoustique ces dernières années.

3.11.2.2.1. Compréhension et réduction du bruit de jets propulsifs

L'avancée du calcul direct du bruit d'origine aérodynamique permet de mettre en évidence des mécanismes physiques encore mal connus jusqu'à présent (effets du nombre de Reynolds pour aller au-delà des écoulements transitionnels, effets de la température, caractérisation du bruit de choc avec effet de vol, effets d'installation…). Des travaux numériques et expérimentaux ont été menés pour obtenir une compréhension physique fine des différents phénomènes mis en jeu, identifier des évènements turbulents spécifiques que l'on peut corréler à l'émission sonore et développer des moyens innovants de réduction du bruit large bande. Il faut souligner au passage que ces activités de recherche s'appuient à la fois sur la simulation numérique et sur l'expérience, avec par exemple la généralisation de la

vélocimétrie par images de particules (PIV), résolue au moins partiellement dans le temps combinée à des algorithmes de localisation de sources par traitement d'antennes.

3.11.2.2.2. Problèmes de conditions aux limites

L'expression « conditions aux limites » doit être comprise dans un sens général. Il s'agit de modéliser la présence et le comportement de matériaux poreux aux frontières de domaines de propagation pour les ondes sonores, mais aussi de prendre en compte des matériaux intelligents, par exemple un élément piézoélectrique permettant de contrôler activement les basses fréquences, élément qui est associé à un matériau poreux pour contrôler passivement les hautes fréquences, afin d'obtenir une paroi parfaitement absorbante. Il est actuellement difficile de rendre cette technique hybride efficace en présence d'un écoulement, de la miniaturiser et de la rendre autonome pour des applications générales. La résolution de ces problèmes nécessite de développer des connaissances dans des domaines comme la propagation acoustique en milieu non homogène, la modélisation des matériaux sous écoulement et des actuateurs, ou les algorithmes robustes pour le contrôle actif. De nombreux progrès ont été faits ces dernières années, à la fois sur la modélisation et sur la faisabilité de ces approches dans le cadre de projets européens, avec des démonstrateurs pour les entrées d'air des moteurs d'avion ou bien pour la propagation en conduit.

3.11.2.2.3. Couplages en aéroacoustique

Le bruit rayonné par les écoulements turbulents peut, lorsqu'un phénomène de rétroaction est possible, venir perturber l'écoulement qui est lui-même à l'origine du rayonnement acoustique. Ces problèmes de couplages interviennent dans de nombreuses situations et sont généralement difficiles à bien prédire en termes d'apparition, de fréquence rayonnée et de niveau des perturbations mises en jeu. C'est le cas pour les instabilités de combustion dans les moteurs d'avion, les moteurs-fusées, les turbines à gaz, les chaudières ou les fours industriels par exemple. Ils interviennent fréquemment en écoulement confiné, en impliquant un couplage avec les résonances acoustiques liées à la géométrie. Ils engendrent aussi rapidement des problèmes de vibration et relèvent alors d'interactions de type fluide/structure et d'études d'aéroélasticité. Ce sont des problèmes difficiles à traiter car la géométrie, souvent complexe, est directement issue d'applications pratiques. De plus, les échelles physiques entre le mécanisme générateur et le champ acoustique sont disproportionnées (sources compactes), ce qui rend le coût des simulations numériques complètes relativement prohibitif.

3.11.2.3. Quelques enjeux et orientations

Deux grands domaines font actuellement l'objet d'enjeux considérables en aéroacoustique.

Le premier concerne directement le bruit d'origine aérodynamique. On peut ainsi mentionner ici les parties tournantes associées aux systèmes propulsifs avec la soufflante des turboréacteurs et les hélices contrarotatives. Compte tenu de l'accroissement du taux de dilution sur les futures architectures UHBPR, les effets

d'installation du moteur sous la voilure prennent beaucoup d'importance et nécessitent d'être identifiés et modélisés. De même, seule la simulation des grandes échelles permettra d'appréhender de manière prédictive le bruit de jet isolé ou en configuration installée. Il faut cependant noter que peu d'outils numériques pourront appréhender la complexité géométrique et le caractère large bande du bruit de jet nécessitant de calculer une large partie du spectre de la turbulence.

Un second enjeu concerne le bruit de couche limite. On retrouve cette problématique à la fois pour les applications en hydroacoustique, pour des applications dans les transports terrestres (automobiles ou trains) et aéronautique dans des conditions de croisière pour le bruit rayonné dans le cockpit et la cabine. Il s'agit de pouvoir caractériser les contributions de la couche limite, de nature hydrodynamique, et de l'excitation acoustique directe. Des approches numériques et expérimentales doivent être développées, en prenant en compte les gradients de pression ou la présence de petits obstacles perturbant les écoulements incidents. Une thématique connexe à ce sujet est la notion d'impédance utilisée comme formulation de condition aux limites, qui doit être sérieusement revisitée.

3.11.2.4. Un enjeu stratégique : le développement de plates-formes numériques pour le calcul haute performance

C'est bien évidemment un des enjeux essentiels pour la mécanique des fluides et l'aéroacoustique numérique. Les équipes universitaires et de R&D en France, et plus largement en Europe, occupent actuellement une place importante et jouent un rôle moteur dans plusieurs domaines depuis les années 1990. On peut cependant noter que l'apparition des moyens de calcul haute performance fait émerger un certain nombre de difficultés, qui ne sont pas sans conséquence sur les activités de recherche à moyen terme en France.

Les acteurs qui assurent le développement de l'aéroacoustique numérique sont peu nombreux (essentiellement DynFluid, LMFA, Institut Pprime, ONERA et CERFACS). Par ailleurs, les études et recherches sont à mener pour des configurations géométriques très complexes, quelle que soit la problématique retenue. Il est clair que toutes ces configurations sont déjà actuellement quasi inaccessibles aux codes numériques universitaires. L'adaptation de ces codes à des problèmes présentant des géométries complexes et leur portage sur des machines massivement parallèles du GENCI (Grand Équipement national de calcul intensif) demandent un investissement en temps et en travail considérable, et des compétences techniques qui ne sont pas disponibles au niveau d'une équipe de recherche universitaire. On dispose d'indicateurs assez objectifs pour mesurer cela, comme les codes numériques de mécanique des fluides, qui occupent actuellement les supercalculateurs et également les thématiques des projets de recherche. Il y a une certaine urgence pour entamer une réflexion sur les grandes plates-formes du futur (capables d'affronter les supercalculateurs) pour la mécanique des fluides numérique en France et le rôle des équipes universitaires dans ce contexte. Cette réflexion devrait être menée avec tous les acteurs concernés (relevant de disciplines comme la mécanique des fluides et l'aéroacoustique, et aussi de la recherche académique et de l'industrie).

3.11.2.5. Laboratoires

L'aéroacoustique, au sens défini en introduction de ce texte, connaît actuellement un essor sans précédent à la fois du côté industriel – Airbus France, Dassault Aviation, EADS, EDF, METRAVIB, Michelin, PSA, SNCF, Safran (Snecma, Aircelle, Messier-Bugatti-Dowty), Renault, Valeo, VibraTec – et du côté académique. Outre les centres de recherche comme l'ONERA et le CERFACS, on peut mentionner parmi les laboratoires universitaires les plus impliqués le centre acoustique du LMFA (École centrale de Lyon), l'Institut Pprime (Poitiers), le LAUM (Le Mans), DynFluid (ENSAM Paris), l'Institut Jean-Le-Rond-d'Alembert (Paris), POEMS (ENSTA Paris), EM2C (École centrale Paris) ou I3M (Montpellier II).

La France est pour le moment bien reconnue pour ses travaux dans les différents domaines évoqués, mais elle doit certainement faire un effort sensible pour soutenir ces thématiques émergentes et le développement de l'informatique scientifique.

Les contributions archivées associées à l'aéroacoustique se trouvent principalement dans l'*AIAA Journal*, l'*International Journal of Aeroacoustics, Acta Acustica,* le *Journal of Sound and Vibration, The Journal of the Acoustical SocIety of Am*erica ; les études les plus proches de la mécanique des fluides paraissent dans le *Journal of Fluid Mechanics, Physics of Fluids, Theoretical and Computational Fluid Dynamics.* ; et la partie algorithmique dans le *Journal of Computational Physics*, le *Journal of Computational Acoustics* ou encore *Computers & Fluids.*

3.11.2.6. Enjeux sociétaux

Les grands aéroports constitueront de plus en plus le goulot d'étranglement du trafic aérien en Europe et à d'autres endroits dans le monde du fait de la gêne, principalement acoustique, que leurs vols génèrent. Malgré les progrès spectaculaires obtenus ces dernières décennies dans la réduction du bruit émis par chaque aéronef, la croissance du trafic aérien et l'augmentation de la sensibilité de la population aux gênes environnementales font que ce sujet reste un enjeu majeur pour l'aviation.

Cette importance se traduit au sein du CORAC (Conseil pour la recherche aéronautique civile), où le réseau thématique « Aéronautique et environnement » a pour mission d'analyser le contexte de la recherche aéronautique dans les domaines concernés et de recommander des projets spécifiques permettant de mieux comprendre les mécanismes d'impact du transport aérien sur l'environnement. Par ailleurs, les activités de recherche et de développement en aéronautique en France sont coordonnées au sein du réseau IROQUA – Initiative de recherche pour l'optimisation acoustique en aéronautique – dont les partenaires sont : Airbus France, Dassault Aviation, Safran, le Centre national de la recherche scientifique (CNRS), l'Office national d'études et recherches aérospatiales (ONERA), Aéroport de Paris (ADP) et Air France.

3.12. Transferts thermiques

3.12.1. Descriptif de la thématique

La thématique « transferts thermiques » est portée par la Société française de thermique (SFT), qui constitue le Groupe scientifique et technique 11 de l'Association française de mécanique. La SFT a édité un Livre blanc (http://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user-3775/documents/livre_blanc_V3-12 avril05-Final.pdf) en 2005. Nous nous appuyons ici sur ce document, ainsi que sur le rapport de conjoncture 2010 du CNRS (section 10 – Milieux fluides et réactifs : transports, transferts, procédés de transformation) pour montrer les évolutions survenues depuis cette date.

Nous reprenons donc la définition de la thermique mentionnée dans le document de 2005 : « *La thermique est la branche de la physique relative à l'une des formes les plus usuelles de l'énergie : la chaleur. Elle traite de tous les phénomènes liés à son transfert, entre milieux matériels ou en leur sein, sous l'action de différences de températures.* » En conséquence, sa finalité principale est la maîtrise des températures et des flux de chaleur.

En complément, la thermique (« *heat transfer* » en anglais) est une science qui intègre naturellement les interactions et les couplages entre les mécanismes de transfert de chaleur d'une part, et les phénomènes étudiés dans d'autres champs disciplinaires d'autre part. On peut citer notamment la mécanique des fluides et des solides, le génie des procédés, la combustion, la science des matériaux, le génie électrique, la chimie et la physique, et ce, quelles que soient les échelles spatio-temporelles considérées.

Il n'est pas inutile, pour montrer que la thermique est bien la science des couplages, de citer d'autres domaines, plus éloignés des sciences pour l'ingénieur, où la contribution des personnes qui se proclament de cette thématique pourrait être très utile : les sciences de la Terre, la biologie ou la médecine.

La thermique est également associée à l'énergétique, c'est-à-dire la science des conversions entre les différentes formes d'énergie : elle permet de comprendre comment ces conversions, nécessairement imparfaites entre sources, se traduisent par une dissipation thermique et donc par des flux de chaleur conditionnés par l'environnement externe des convertisseurs (conditions aux limites et termes sources).

3.12.2. Un état de l'art s'appuyant sur des états de conjoncture ou avis récents

Nous avons choisi ici de classer les thématiques actuelles non pas en fonction des domaines applicatifs, mais en balayant plutôt les grands domaines scientifiques actuels que l'on rencontre usuellement dans les congrès de thermique. Cela présente l'avantage de garder à la fois la cohérence scientifique à cette classification, tout en mettant en exergue les méthodologies spécifiques à la thermique qui rapprochent justement ces applications. Une autre déclinaison, fondée sur les grands secteurs socio-économiques et industriels, est évidemment possible.

3.12.2.1. Le rayonnement thermique aux échelles mésoscopiques

La demande est ici assez forte dans les domaines suivants : la combustion, la thermique du bâtiment (isolants, thermique de l'ambiance), l'aéronautique et l'aérospatial, les plasmas froids (génie des procédés et matériaux) et chauds (tokamaks), l'astrophysique, la science des matériaux et des procédés d'élaboration et de mise en forme (caractérisation des propriétés radiatives des surfaces et interfaces, matériaux hétérogènes semi-transparents, matériaux pour l'énergie, fours électriques/induction).

3.12.2.2. Les transferts thermiques convectifs dans les fluides et milieux monophasiques

Il s'agit des instabilités, de la turbulence, de la manipulation des structures thermoconvectives (tourbillons de Rayleigh-Bénard, allées de Von Karman, avec des applications dans le domaine de l'intensification des échanges chaleur/masse) et enfin de la problématique des écoulements de fluides complexes (non newtoniens et/ou thermodépendants, émulsions, suspensions), avec une demande du secteur agroalimentaire.

3.12.2.3. Les transferts aux micro- et mini-échelles

On inclut ici :

(i) les écoulements avec ou sans changement de phase dans les caloducs et les mini échangeurs, avec une demande qui porte sur l'intensification des transferts (réfrigération, électronique, piles à combustible) ou sur la diminution de la quantité de réactifs (mini-fluidique pour la chimie) ;

(ii) la conduction dans les microstructures, les couches de très faible épaisseur et les interfaces, avec des applications en science des matériaux (procédés d'élaboration de couches minces et dépôts), en électronique (caractérisation), en combustion (barrières thermiques).

3.12.2.4. La nanothermique

Il s'agit ici des transferts d'énergie aux échelles ultimes de la matière où la loi de Fourier pour la conduction, les équations de Navier-Stokes pour la dynamique des fluides et la loi de Planck pour le rayonnement ne sont plus adaptées du fait des très courtes échelles spatio-temporelles mises en jeu. Ces phénomènes se produisent respectivement lorsque le libre parcours des phonons, des molécules ou ions en phase fluide, ou des photons devient supérieur à la taille du système considéré. C'est notamment le cas des films « minces » au sens de la physique du solide, avec des applications en électronique, thermoélectricité et dans les super-isolants à nanoporosité et transport balistique des phonons. Ce type de nanotransfert se rencontre également dans les écoulements de gaz raréfiés ou dans les solutions ioniques en nanocanal (transferts dans les argiles). Enfin, ils concernent aussi les transferts radiatifs paroi/paroi avec échanges assurés par les modes électromagnétiques de surface.

Cette thématique se situe donc à l'intersection de la physique du solide, de l'électromagnétisme et, évidemment, de la thermique. Elle est actuellement en très forte croissance. Les enjeux sont ceux des nanotechnologies et des structures matérielles associées (nanotubes de carbone, graphène…) pour des applications dont le nombre explose, tant en sciences de la matière et de l'énergie que dans celle de l'information.

3.12.2.5. Les transferts thermiques dans les milieux hétérogènes

On les sépare en :

(i) thermique des milieux di- ou multiphasiques, dont l'étude est généralement motivée par des problématiques industrielles provenant par exemple du secteur énergétique (condenseurs, évaporateurs, bouilleurs) ou de l'élaboration des matériaux (solidification contrôlée par jets ou sprays) : on retrouve ici la problématique très actuelle de l'intensification des transferts où la collaboration avec les physico-chimistes est indispensable (effet de la texturation des surfaces en ébullition externe par exemple) ;

(ii) transferts dans les milieux poreux, qui sont des systèmes hétérogènes dont les échelles diffèrent parfois de plusieurs ordres de grandeur. Les applications sont multiples : matériaux pour l'isolation, séchage, géothermie, sûreté nucléaire, biologie, stockage des déchets, incendies, mise en forme des composites, filtration, réacteurs de génie chimique, piles à combustible, pyrolyse et combustion de la biomasse… ;

(iii) transferts aux interfaces, d'abord solide/solide avec contact fixe ou mobile, avec les problématiques thermomécaniques des résistances thermiques de contact (assemblages et collages, tribologie et freinage, usinage). On trouve ici également la problématique des transferts pariétaux aux interfaces paroi/fluide, avec les problèmes de modélisation nécessaire au dépassement de l'approche classique basée sur les modèles simples (que l'on peut certainement qualifier de « modèles réduits ») utilisant les coefficients d'échange issus des corrélations traditionnelles de la convection thermique ou massique. Là aussi, les domaines d'applications sont nombreux : intensification des transferts, ébullition et condensation, échangeurs/stockeurs pour la récupération de la chaleur fatale. Cette dernière résulte du complément au rendement des machines thermiques basées sur des cycles thermodynamiques en phases fluides (réfrigération, pompes à chaleur, production d'énergie mécanique) ou solides (effet Peltier, réfrigération magnétocalorique). Les progrès dans ces domaines nécessitent une coopération active entre thermiciens et mécaniciens des fluides, ainsi que la prise en compte des régimes transitoires dans les modélisations.

3.12.2.6. La thermique des systèmes

Elle concerne tous les domaines où c'est l'application elle-même qui devient le cœur de la discipline, les transferts de chaleur étant couplés avec d'autres phénomènes, de transfert de masse, mécaniques, physiques, physico-chimiques, électriques, électroniques, chimiques, biochimiques ou même les sciences de l'environnement et de l'Univers.

Il est possible de distinguer ici notamment :

- les échangeurs de chaleur,
- les machines thermiques,
- l'électronique et l'électrotechnique,
- les piles à combustible,
- le solaire thermique et photovoltaïque,
- la thermique des procédés agroalimentaires et de mise en forme des matériaux,
- la gestion du froid et de la chaleur,
- la thermique du bâtiment et de l'environnement,
- la thermique du vivant,
- les matériaux et fluides à haute température.

Le détail des problématiques rencontrées dans ces domaines dépasse le cadre de cet exposé. Nous renvoyons ici le lecteur au *Livre blanc de la recherche en thermique* (avril 2005) et nous soulignons quelques évolutions majeures dans la section 3.12.3. ci-après.

3.12.2.7. Les méthodologies spécifiques à la thermique

La thermique est une science particulièrement propice au développement de nouveaux concepts théoriques ou méthodologiques, qui sont listés ci-dessous.

(i) La métrologie thermique

– Il s'agit d'abord des techniques de mesure directe. Par direct, on entend les mesures, de température, par exemple, issues de capteurs dont le principe est basé sur une instrumentation conçue à cet effet, souvent par les physiciens (effet Seebeck pour les thermocouples, détecteurs quantiques pour les caméras infrarouges…) et dont le thermicien est un expert pour leur mise en œuvre (paramètres d'influence, implantation et conception des capteurs « invisibles » thermiquement…).

– Ensuite, la métrologie thermique intègre de plus en plus les méthodes inverses, d'abord pour la caractérisation thermophysique de matériaux, qui nécessite la mise en œuvre d'une excitation (actuateur), souvent thermique, et de la mesure de sa réponse thermique (capteur), qui est comparée à la sortie d'un modèle basé sur l'équation de la chaleur ou sur celle du transfert radiatif par des approches du type moindres carrés. Une autre application est la mesure, ou plutôt l'estimation, au sens statistique, des flux ou densités de flux de chaleur en utilisant la conduction inverse en régime le plus souvent instationnaire. Ces techniques de fluxmétrie non intrusives deviennent maintenant de plus

en plus populaires, non seulement en laboratoire de thermique, mais dans l'industrie et dans d'autres domaines (fluxmètres pour l'injection en plasturgie, fluxmétrie en paroi dans les tokamaks ou aux interfaces dans les composants électroniques). L'usage des techniques inverses en thermique s'est développé depuis une vingtaine d'années grâce notamment aux écoles thématiques qui ont été montées par le groupe METTI (Mesures en thermiques et techniques inverses) de la SFT.

(ii) Les techniques de modélisation et de simulation

De nouvelles méthodes de modélisation/simulation sont utilisées depuis quelques années en transferts convectifs, pour prendre finement en compte la turbulence – DNS (*Direct Numerical Simulation*), LES (*Large Eddy Simulation*) –, en exploitant les performances numériques accrues des ordinateurs. Les problèmes de contrôle des incertitudes et de vérification des modèles deviennent des sujets majeurs. Il en est de même avec les techniques de réduction de modèle, qui permettent de diminuer les temps de calcul, pour des applications embarquées par exemple, aux dépens d'une certaine perte de précision. La même problématique s'applique en modélisation des transferts radiatifs. Signalons enfin le développement extrêmement rapide de la méthode de Boltzmann sur réseaux (Lattice-Boltzmann), qui permet maintenant d'aborder la résolution de systèmes très complexes avec des moyens informatiques limités. Citons par exemple ses récents succès dans l'approche de problèmes de turbulence ou multiphasiques.

(iii) Les méthodes inverses

Ces méthodes, voir la section « La métrologie thermique » ci-avant, peuvent être employées dans des applications très larges : optimiser les expériences de caractérisation, concevoir de façon la plus optimale un système, inverser des données expérimentales, calibrer des capteurs, identifier un modèle (réduit) à partir de mesures, réduire un modèle détaillé, estimer la taille ou les paramètres d'un défaut en contrôle non destructif, piloter un procédé de manière optimale de façon à contrôler la distribution des propriétés du produit fini… Elles sont au carrefour des mathématiques appliquées, de l'automatique, des statistiques, du traitement du signal et de la métrologie.

Ces méthodes sortent maintenant du cadre du laboratoire et peuvent s'appliquer à des systèmes, non seulement pour évaluer un flux à partir de la mesure d'une température et d'un modèle adéquat (en régime instationnaire), mais également pour remonter à une mesure (indirecte) de température en un endroit inaccessible du système (capteur virtuel).

(iv) La thermodynamique

L'approche thermodynamique/énergétique est indispensable pour concevoir et optimiser les cycles moteurs et récepteurs utilisant un fluide thermodynamique et plusieurs fluides caloporteurs. Cela est nécessaire pour les machines thermiques (moteurs alternatifs à combustion, turbines et

turboréacteurs, réfrigérateurs, pompes à chaleur) ou plus généralement pour tout système moteur ou récepteur équipé d'auxiliaires (pile à combustible par exemple). La maximisation du rendement s'appuie sur l'analyse des bilans énergétiques (premier principe) et des bilans entropiques (second principe) ou exergétiques, en cherchant à faire la chasse aux causes d'irréversibilité. Ces dernières sont souvent thermiques, comme dans un condenseur où l'intégralité de la puissance thermique (chaleur latente) générée dans le fluide n'est pas fournie au fluide caloporteur, du fait des pertes axiales dans l'épaisseur des parois de l'échangeur. Cela se complique évidemment en régime transitoire (apport de chaleur solaire par exemple) où la notion de source à température uniforme dans l'espace et constante dans le temps est encore plus mise en défaut.
L'utilisation de la thermodynamique hors équilibre est aussi de plus en plus fréquente dans les procédés mettant en œuvre un changement de phase hors équilibre dans des matériaux qui peuvent être compressibles (plasturgie, métallurgie, stockage d'énergie par chaleur latente, coulis de glace…).

(v) Les méthodes d'homogénéisation et les processus stochastiques

Il s'agit de trouver des valeurs de propriétés de transport effectives (équivalentes) de milieux par nature hétérogènes (matériau composite stratifié, milieu poreux, cœur de pile à combustible) au sein desquels des transferts couplés chaleur/masse/électrohydrodynamique avec réaction peuvent s'effectuer. Citons par exemple la polymérisation dans l'élaboration de composites, le séchage du papier ou du bois, les transferts en membrane d'une pile à combustible, la dispersion thermique ou massique en réacteur à lit fixe. Il est alors nécessaire de revisiter les modélisations, en prenant en compte l'emboîtement des échelles spatiales.
Des méthodes de changement d'échelle sont employées par les thermiciens : homogénéisation périodique, prise de moyenne volumique avec fermeture et notion de VER (volume élémentaire représentatif) ou encore des méthodes stochastiques lorsque la longueur de corrélation diverge. Le thème du changement de phase (fusion, solidification, polymérisation) dans les milieux hétérogènes (composites par exemple, pour des applications mécaniques, de stockage ou d'intensification des transferts) est encore presque vierge.

Au cours des quinze dernières années, l'analyse et la compréhension de processus thermiques très divers se sont développées de manière très importante, grâce aux progrès combinés de la modélisation et des techniques expérimentales. Remarquons que l'un des points forts de la thermique, en France tout particulièrement, est d'avoir su préserver une place conséquente à l'expérimentation.

3.12.3. Les orientations nécessaires en fonction des enjeux

Actuellement, dans un contexte énergétique et économique tendu, il y a beaucoup plus de demande que d'offre de recherche en thermique. Cette demande est souvent traitée de façon incomplète, et au pire « mal(-) » traitée, par des chercheurs d'autres disciplines qui n'ont pas forcément intégré la nécessité d'une double culture (leur thématique de base plus la thermique), indispensable à tout chercheur dans ce domaine.

Cette mauvaise appréciation de la dimension incontournable que doit occuper la thermique dans les différents « génies » résulte de sa prise en compte progressive, que l'on observe selon trois niveaux séquentiels : au niveau 0, l'utilisateur est obligé d'intégrer la température comme variable d'influence ; au niveau 1, il effectue des corrections de température sur le phénomène qu'il étudie ; et au niveau 2, il utilise des modèles couplés intégrant la thermique. Les exemples de cette approche progressive sont légion. On peut ainsi citer le problème de la récupération de la chaleur issue du plasma dans les cœurs de tokamak (ITER), celui de la fatigue thermomécanique dans les centrales nucléaires au sein desquelles les matériaux sont soumis à des alternances d'écoulements chauds et froids (CEA, IRSN), et aussi le développement des différentes techniques optiques (photo- ou thermomécanique) avec l'intéressant problème du pilotage des différents champs.

Les recherches menées dans le domaine des transferts thermiques sont motivées par de nombreux enjeux de société : solaire concentré, émissions polluantes dans les systèmes combustifs, imagerie médicale, climatologie, planétologie, systèmes embarqués (refroidissement de l'électronique dans le transport ferroviaire, automobile, aéronautique et spatial), procédés industriels, biologiques, lutte contre les feux, intensification des transferts, efficacité énergétique, thermique des bâtiments, nouvelles énergies, ITER... D'une façon générale, la thermique devient un facteur incontournable pour gérer l'énergie, optimiser et contrôler les systèmes industriels, concevoir des matériaux nouveaux…

Depuis le début des années 2000, du fait du réchauffement climatique et de la raréfaction des ressources fossiles et du renchérissement correspondant, la problématique de l'énergie est devenue un sujet de plus en plus prégnant qui nécessite des réponses où le thermicien occupe une place majeure, voire centrale dans les domaines suivants :

– la recherche d'une meilleure efficacité énergétique, dans le secteur de l'énergie, dans tous les secteurs des procédés (métallurgie, cimenterie, plasturgie…), habitat et tertiaire et dans les transports. Dans le secteur industriel, cela doit d'abord passer par une récupération systématique des rejets thermiques au sein de chaque entreprise où la chaleur perdue par un procédé pourrait servir de source chaude à un autre procédé ; la même démarche est à promouvoir et à intensifier dans les procédés cycliques (alternativement chauffés et refroidis) comme ceux rencontrés dans l'industrie verrière par exemple. Les enjeux ne sont pas seulement techniques et économiques, mais surtout méthodologiques, et les approches basées sur la thermodynamique (méthode

du « pincement » par exemple) doivent occuper une place primordiale, pour savoir où placer un échangeur ou une pompe à chaleur ;
– la valorisation à la fois de cette chaleur fatale et de celle du rayonnement solaire collecté et converti en chaleur, qui reste encore sous-utilisé dans notre pays, constitue un autre enjeu : il faut pour cela maîtriser les régimes intermittents afin d'apparier fourniture et demande de puissance, et donc concevoir soit des systèmes de stockage, c'est-à-dire des « batteries thermiques » basées sur le changement de phase ou sur la variation de la chaleur sensible, soit passer par le vecteur hydrogène afin d'assurer cet indispensable lissage. Cet aspect présuppose la conception et l'optimisation de systèmes originaux.

3.12.4. Les verrous scientifiques et technologiques à lever

Ces verrous sont nombreux. Nous n'en citerons ici que quelques-uns :

- le développement de systèmes énergétiques innovants capables de stocker l'énergie ou de récupérer la chaleur fatale ;
- le développement des matériaux pour l'énergie, c'est-à-dire :
  – les matériaux résistant aux conditions extrêmes : hautes températures et hautes pressions, hauts flux (conductifs, photoniques thermiques ou gamma), avec la thématique centrale de leur vieillissement (besoin de modélisation stochastique) ;
  – la mise au point de plastiques et composites conducteurs ;
  – la mise au point de matériaux isolants et super-isolants à la fois écologiques et économiques ;
  – l'exploitation des matériaux adaptatifs (piézoélectriques, magnétostrictifs, à mémoire de forme), comme interrupteurs, diodes ou même transistors, permettant une commande du flux à transférer entre deux sous-systèmes ;
  – les matériaux capables de stocker l'hydrogène de façon réversible ;
  – les matériaux, à changement de phase ou non, capables de stocker et restituer la chaleur avec des flux importants (matériaux conducteurs) ;

- le problème du raccordement matériel et de sa modélisation, des composants nanothermiques au monde de la thermique classique (changement d'échelle) ;
- le développement d'une métrologie thermique adaptée, capable d'évaluer notamment des flux thermiques de manière non intrusive (techniques inverses) et l'amélioration des techniques de caractérisation thermique, notamment pour les matériaux hétérogènes et pour les dépôts ;
- le développement de la thermique « hors laboratoire » permettant d'utiliser les techniques mises au point en laboratoire (capteurs virtuels adaptés à la modélisation, « boîte grise » de systèmes convolutifs, c'est-à-dire linéaires et invariants en temps) dans un contexte industriel ;

- de manière similaire, la thermique peut être appliquée aux grandes échelles, c'est-à-dire à celles de l'environnement (une agglomération, par exemple, en dépassant l'échelle habituelle de la thermique du bâtiment), à condition qu'elle intègre une certaine dose de modélisation stochastique (thermique « en contexte incertain »), du fait d'une méconnaissance croissante des paramètres du système et des sources de chaleur (éclairement solaire, température ambiante et température des cours d'eau…) au fur et à mesure que celui-ci grandit.

3.12.5. Les laboratoires concernés

La discipline s'est structurée, depuis 1961, autour de la Société française de thermique. Cette dernière rassemble au total environ 400 chercheurs permanents et 180 doctorants (voir l'annuaire 2013). Ils relèvent principalement soit de la 10e section du CNRS, pour les chercheurs académiques, soit des sections 60 et 62 du CNU pour les enseignants-chercheurs (ou chercheurs universitaires ou industriels), soit enfin du monde industriel.

Au niveau universitaire, on compte au total 56 laboratoires recensés sur le site http://www.sft.asso.fr dans une enquête récente, dont un peu moins de la moitié adhère à la SFT et une bonne dizaine fédère l'activité de cette société savante (organisation du congrès annuel et de journées scientifiques) dans les agglomérations suivantes : Bordeaux, Grenoble, La Rochelle, Lyon, Lorient, Marseille, Nancy, Nantes, Paris, Perpignan, Poitiers, Reims, Toulouse, Valenciennes.

3.12.6. La position française par rapport à l'international

La place de la thermique française est importante au niveau international. Si l'on prend par exemple le critère du nombre de communications soumises au congrès mondial quadriennal de thermique (International Heat Transfer Conference, août 2014, Kyoto), on observe qu'environ 8 % sont français, derrière la Chine et le Japon, mais devant les autres grands pays européens (Allemagne, Royaume-Uni et Italie).

3.13. Combustion

3.13.1. Descriptif de la thématique

La combustion est certainement l'une des sources de la civilisation. L'Homme maîtrise le feu depuis un demi-million d'années, mais ne sait l'allumer que depuis peut-être 30 000 ans. La compréhension de ses mécanismes, quant à elle, est bien plus récente. Des théories comme celle du phlogistique n'avaient aucun fondement scientifique. C'est Lavoisier qui propose une représentation cohérente des réactions chimiques. Un siècle plus tard, la première théorie des flammes est présentée par Mallard et Le Chatelier. La théorie moderne des flammes et des détonations, issue des travaux de Zeldovich, Frank-Kamenetsky, Chapman, Jouguet et

Von Neumann réalisés dans la première moitié du XX^{e} siècle, a remarquablement progressé à partir des années 1970. La combustion est aujourd'hui essentielle aux activités humaines ; elle fournit l'énergie des automobiles, fait voler les avions et les fusées, procure la majeure partie de l'énergie dans le monde. Sur 12,7 Gtep de consommation d'énergie primaire en 2010, la combustion s'élève à 11 Gtep, soit environ 85 % du total. La combustion est mise en jeu dans des procédés aussi importants que la production de ciment, de verre ou l'élaboration des matériaux métalliques. Ces aspects positifs peuvent cependant être accompagnés de risques, tels que les feux, les incendies, les explosions ou encore la pollution engendrée. Un objectif constant dans le domaine est d'augmenter l'efficacité en réduisant les émissions polluantes et en améliorant la fiabilité et la sécurité des procédés. Une difficulté majeure pour l'avenir, largement sous-estimée, sera de réussir à remplacer les énergies fossiles dans un grand nombre d'applications. On peut augmenter la part des carburants issus de la biomasse, mais leur production demande de l'énergie et les quantités qui pourraient être élaborées sont limitées par la disponibilité des sols. Pour certaines applications comme celle de la propulsion aéronautique et spatiale ou encore celle du transport maritime, il n'y a pas d'alternative à l'utilisation de la combustion et les combustibles liquides donnent encore les meilleures densités d'énergie massiques ou volumiques. Pour certains procédés d'élaboration de matériaux comme le verre ou le ciment, la combustion est difficilement remplaçable.

L'analyse de la combustion s'appuie sur une combinaison de disciplines aussi variées que la dynamique des fluides, la physico-chimie, la cinétique de réactions, la thermodynamique et les phénomènes de transport, cumulant les difficultés de ces domaines. La chimie de la combustion fait intervenir des dizaines à des centaines d'espèces et des dizaines à des milliers de réactions. Les vitesses de réaction qui définissent les taux de conversion des espèces suivent des lois exponentielles de l'inverse de la température (les lois d'Arrhenius) et, de ce fait, les problèmes de combustion sont mathématiquement « raides ». La formation des polluants constitue aussi une question centrale qui implique à la fois la cinétique chimique et son interaction avec l'écoulement. Les zones de réaction dans lesquelles s'effectue le dégagement de chaleur sont fines, quelques dixièmes de millimètre à peine, tandis que les systèmes de combustion ont des dimensions souvent très grandes (de l'ordre de quelques dizaines de centimètres pour les foyers de moteurs d'avion à quelques mètres pour les turbines à gaz, quelques dizaines de mètres pour les centrales thermiques, voire des kilomètres pour la propagation des feux de forêts). La turbulence des écoulements permet d'augmenter les taux de conversion des réactifs et donc le rapport énergie dégagée / volume du brûleur. La combustion turbulente, par la multiplicité des échelles spatiales et temporelles qui interviennent, est d'une grande complexité, mais sa compréhension et sa maîtrise sont essentielles car elle est exploitée dans la majeure partie des applications pratiques (énergie, procédés, automobile, aéronautique…). Une autre complexité de la combustion est liée au fait que beaucoup de combustibles utilisés en pratique sont solides ou liquides, ce qui implique des interactions fortes entre plusieurs phases avec des difficultés de modélisation.

Dans la majeure partie des applications, la combustion est réalisée par le biais de flammes lentes appelées « déflagrations ». La pression reste quasiment constante à la traversée de la flamme et la vitesse de propagation est modérée (de l'ordre

du m/s). Le second mode de combustion est celui des flammes rapides appelées « détonations », caractérisées par une zone de réaction couplée à une onde de choc. Les détonations se propagent à des vitesses de plusieurs milliers de mètres par seconde et elles sont accompagnées d'une variation brutale de la pression. Au-delà des applications militaires, les détonations sont étudiées dans le domaine de la sécurité et sont envisagées pour la propulsion aéronautique. Dans le cas des déflagrations, il est naturel de distinguer trois types de situations : (1) les flammes formées à partir de réactifs initialement séparés (les flammes non prémélangées), (2) les flammes qui brûlent un mélange réactif initial (les flammes prémélangées) et (3) les flammes partiellement prémélangées, résultant d'un mélange initial imparfait, voulu ou non. Le premier mode de combustion, rencontré dans la nature, est à la fois le plus facile à réaliser et le plus sûr, mais l'intensité de la combustion reste souvent faible et favorise la formation de polluants (espèces aromatiques, suies, oxydes d'azote). La combustion naturelle est aussi la plus polluante ! La combustion prémélangée, plus artificielle, consiste à mélanger les réactifs avant la combustion. Les flammes prémélangées sont généralement plus efficaces (les réactifs sont déjà en contact) et plus propres car la température de flamme peut être réduite pour diminuer radicalement les niveaux d'émission d'oxydes d'azote. Toutefois, ce mode de combustion est plus difficile à maîtriser car il peut donner lieu à des phénomènes de remontée de flamme, d'extinction si les conditions de fonctionnement sont trop proches de la limite pauvre ou des instabilités couplées par les modes acoustiques résonants.

La combustion pose aussi de nombreux problèmes d'interaction et de couplage. C'est ainsi que des oscillations de grande amplitude peuvent résulter du couplage résonant entre la combustion, l'hydrodynamique et les modes acoustiques du système, induisant une dégradation des performances, une fatigue cyclique des structures, l'intensification des flux de chaleur vers les parois et, dans les cas extrêmes, des accidents qui peuvent s'avérer catastrophiques dans les systèmes à haute performance (comme les systèmes de propulsion) ou dans ceux qui gèrent des énergies élevées. Le couplage avec le rayonnement est aussi particulièrement important car ce mode de transfert d'énergie détermine une part importante des flux de chaleur vers les parois du système ou contrôle la propagation des incendies. Les modes de combustion peuvent prendre des formes très variées.

Les phénomènes de combustion doivent être envisagés dans des conditions opératoires difficiles. Les géométries des foyers peuvent être complexes, voire variables dans le temps comme celles des moteurs à combustion interne. Le milieu lui-même peut être hétérogène avec présence de plusieurs phases. La combustion est souvent réalisée à des pressions élevées (moteurs aéronautiques), voire extrêmes dans les moteurs-fusées, dans lesquels l'un des réactifs est injecté à basse température. L'évolution dans la chambre est alors réalisée dans une situation transcritique, au-dessus du point critique, typique des moteurs cryotechniques dans lesquels l'oxygène liquide est injecté dans des conditions supercritiques. Il faut alors tenir compte des effets de gaz réel et des modifications correspondantes des coefficients de transport. Des questions aussi complexes nécessitent de mener de front des études sur des problèmes fondamentaux dans des configurations simplifiées et d'autres plus appliquées sur des systèmes plus proches des situations pratiques.

3.13.2. L'état de l'art de la recherche en combustion

La théorie a progressé d'une façon remarquable à partir des années 1960, avec notamment l'utilisation des techniques asymptotiques – inspirées en particulier des travaux de Zeldovich et Frank-Kamenetski –, les méthodes de réduction de schéma cinétique ou les techniques de tabulation de la chimie. De nombreux travaux ont permis d'élucider les régimes de combustion, d'analyser les interactions des flammes avec des tourbillons et la turbulence. D'autres travaux ont permis de mieux comprendre les interactions entre l'acoustique et la combustion, et de décrire ces mécanismes au moyen de modèles unifiés. Des progrès sensibles ont été réalisés dans le domaine de la cinétique chimique de la combustion avec l'amélioration de schémas pour des hydrocarbures comportant un grand nombre d'atomes de carbone. Les études réalisées sur les flammes laminaires et sur les mécanismes fondamentaux ont permis d'aborder la question de la combustion turbulente par le biais de stratégies de modélisation très variées utilisant par exemple les notions de fonctions de densité de probabilité (PDF) ou de densité de surface de flamme (la quantité de surface disponible pour la réaction). Des progrès ont ainsi été accomplis sur la modélisation physique dans le cadre des équations de Reynolds moyennées et, plus récemment, dans le domaine de la simulation des grandes échelles appliquée à la combustion.

Sur le plan expérimental, des progrès importants ont été réalisés par le biais du développement de techniques de diagnostics optiques utilisant les lasers et les capacités de prise et de traitement d'images numériques. Des mesures instantanées non intrusives, multidimensionnelles, multiscalaires ont ainsi été effectuées à basse, puis à haute cadence (PIV, Raman spontané, Raman cohérent, LIF essentiellement). Des méthodes ont aussi été développées pour caractériser les phases liquides dispersées (LIF, *Phase Doppler*) ou pour mesurer les fractions volumiques de particules (LII). Des diagnostics quantitatifs ont été mis en place pour l'étude des mécanismes chimiques détaillés. Le besoin de mesures détaillées et résolues dans le temps et l'espace subsiste pour permettre les validations plus fines rendues nécessaires par les progrès de la simulation.

Dans le domaine du calcul, les développements les plus remarquables ont été réalisés en simulation des grandes échelles (LES) avec le développement de codes de calcul comme AVBP ou YALES2, issus de travaux collaboratifs regroupant des organismes comme le CERFACS, l'IFPEN et les laboratoires du CNRS, et exploitant au mieux les performances des machines massivement parallèles apparues dans les années 1990. Les calculs permettent de simuler des configurations de complexité croissante en tirant parti des capacités nouvelles des codes et des méthodes de résolution, de l'augmentation constante des puissances des processeurs ou de l'augmentation du nombre de processeurs et de la vitesse de transfert des réseaux de transmission de données, et de l'adaptation des méthodes de résolution aux nouvelles architectures parallèles. Le développement de la simulation des grandes échelles est au centre des recherches engagées par les laboratoires dans le domaine de la combustion turbulente. L'identification aux échelles résolues de la disposition instantanée des zones de gaz frais et brûlés permet naturellement une meilleure description de la turbulence, des transferts radiatifs, de la formation des espèces polluantes ou encore des effets de flottabilité (incendies), toutefois avec

un coût calcul élevé. Les applications de ces méthodes traitent de la dynamique de la combustion dans des configurations simples, mais aussi progressivement dans des géométries réelles. La simulation aux grandes échelles permet d'aborder des questions difficiles comme celle de l'interaction entre l'acoustique et la combustion, les instabilités de combustion des turbines à gaz, les variabilités cycliques dans les moteurs à combustion interne. De façon générale, ce type de simulation trouve une large gamme d'applications dans l'étude de flammes turbulentes en interaction. La simulation des grandes échelles couplée au rayonnement permet aussi de mieux estimer les flux de chaleur vers les parois. L'effort en recherche pour le développement de ce type de simulations numériques fait également apparaître des défis pour les mathématiques appliquées, avec notamment un besoin de développement de méthodes numériques précises et efficaces. Les problèmes de la turbulence et de la combustion turbulente ne sont pas résolus sur le fond, mais le calcul des écoulements turbulents réactifs a progressé d'une façon étonnante, permettant d'envisager des applications de plus en plus réalistes. Cependant, il ne faut pas perdre de vue que les calculs demandent des ressources informatiques importantes et qu'il n'est pas encore possible d'envisager des études de sensibilité aux conditions opératoires, à la géométrie ou aux paramètres des modèles. De ce point de vue, il est intéressant de déduire de calculs multidimensionnels des modélisations d'ordre réduit, un sujet qui est déjà bien engagé dans le domaine de la combustion pour les moteurs automobiles. Par ailleurs, les calculs LES peuvent permettre des analyses de phénomènes instationnaires qui étaient inaccessibles aux méthodes moyennées plus classiques.

On sait maintenant calculer des flammes turbulentes dans des configurations simples (principalement des flammes jets issues d'injecteurs coaxiaux) et dans des situations plus complexes comme celles qui existent dans les moteurs à piston ou les turbines à gaz. La modélisation et la simulation ont fait des progrès significatifs dans le domaine des pressions élevées et notamment dans les cas où l'évolution s'effectue dans des conditions supercritiques (la pression dépasse la valeur critique et la température d'injection est basse et inférieure à la température critique). La prise en compte de chimies détaillées demeure un sujet de recherche important avec des avancées dans le développement et l'exploitation de méthodes fondées sur la réduction de schémas et la tabulation. Des validations ont été réalisées au moyen d'expériences fondamentales sur des flammes simples et, plus récemment, sur des expériences plus proches des situations réelles. On reste cependant dans des conditions opératoires simples : combustible le plus souvent gazeux, avec des chimies simplifiées. Le traitement des combustibles liquides (pulvérisation, atomisation, vaporisation…), qui est de plus multicomposants, demeure un problème difficile. Les calculs s'avèrent très sensibles aux paramètres des modèles diphasiques.

Les questions soulevées par l'utilisation de nouvelles technologies de combustion et de nouveaux carburants impliquent le développement et la validation de schémas cinétiques de plus en plus complexes au moyen d'expériences adaptées.

3.13.3. Les nouveaux enjeux scientifiques de la combustion

L'optimisation des processus de combustion constitue un enjeu permanent pour réduire les émissions polluantes sans diminuer les performances ni altérer la stabilité de la combustion et en évitant ou en contrôlant les instabilités qui peuvent être induites par des couplages thermoacoustiques. Dans un contexte d'épuisement des ressources fossiles, la réduction de la consommation dans toutes les utilisations de la combustion, et donc des émissions de gaz à effet de serre, est un objectif primordial pour répondre aux problèmes environnementaux et économiques, contribuer au développement de solutions préservant de façon durable la qualité de l'environnement, réduisant les impacts sur la santé et relever le défi du changement climatique. La réduction de la consommation (et donc des gaz à effet de serre) n'est pas simplement un problème de combustion puisque l'efficacité de celle-ci est déjà excellente. Il s'agit surtout de mieux récupérer l'énergie de la combustion, ce qui est plutôt une question de cycle thermodynamique et d'architecture système. Ainsi, par exemple, on peut envisager de nouvelles technologies de combustion qui facilitent la capture des gaz à effet de serre.

De nombreux défis scientifiques et techniques sont à relever. Bien que la combustion ait atteint un bon degré de maturité, il faut poursuivre l'analyse des phénomènes de combustion, continuer à élucider les mécanismes fondamentaux, améliorer les méthodes d'expérimentation, de diagnostic et de simulation. La complexité des processus de combustion implique une combinaison d'analyse théorique, d'expérimentations bien contrôlées mettant en jeu les diagnostics les plus avancés, des modélisations intégrant les progrès déjà réalisés et des simulations utilisant pleinement les possibilités offertes par le calcul à haute performance. Les sujets d'étude sont très nombreux :

- développement de nouveaux modes et de nouveaux procédés de combustion, de nouveaux systèmes et de nouvelles configurations permettant une réduction de la consommation et des émissions polluantes, de nouveaux carburants, de nouveaux modèles (cinétiques, numériques), de nouvelles architectures de foyers ou de systèmes d'injection ;
- modélisation de la combustion turbulente avec prise en compte de la cinétique complexe au moyen de méthodes de réduction ou de tabulation ;
- systèmes d'injection et combustion diphasique ;
- formation, destruction et traitement des polluants, notamment des oxydes d'azote, des particules de suie, des imbrûlés ;
- modélisation de la dynamique de la combustion ; instabilités, couplages et régimes transitoires (allumage, extinction, variations cycliques, démarrage à froid, flashback...), instabilités thermoacoustiques couplées par des modes azimutaux, couplages forts et cohérents opérant à une fréquence pour laquelle la densité modale acoustique est importante ;
- contrôle de la combustion et des systèmes réactifs (par exemple combustion assistée par plasma, utilisation de plasmas micro-onde, allumage par laser), robustesse des systèmes de contrôle de la combustion dans des environnements extrêmes ;

- bruit de combustion direct ou indirect et effets mécaniques induits par les vibrations acoustiques associées à la dynamique des flammes ;
- systèmes de combustion avancés pour la propulsion et nouveaux modes de combustion (combustion supersonique, propulsion par onde de détonation, combustion à volume constant), matériaux énergétiques pour la propulsion, combustion à haute pression, injection et combustion dans des conditions transcritiques ;
- initiation et propagation des détonations, prévision de la transition déflagration/détonation, notamment dans des configurations industrielles complexes ;
- mécanismes de réaction aux interfaces, échanges et transferts dans les matériaux hétérogènes et poreux, combustion turbulente dans des écoulements à phase dispersée solide ;
- modélisation cinétique pour des espèces et des combustibles classiques et alternatifs qui pourraient trouver une utilisation pratique dans le futur (ou de leurs *surrogates*), validés dans des conditions réalistes de pression, température, richesse et dilution. Validation des schémas en termes de délais d'auto-inflammation, dégagement de chaleur, espèces majoritaires et intermédiaires, vitesses de flamme, réponse à l'étirement afin d'en permettre l'usage pour des problématiques pratiques où il est souvent important de reproduire plusieurs de ces caractéristiques ;
- méthodes ab initio pour le calcul des constantes de réaction, méthodes de réduction à partir des schémas détaillés, mise en œuvre pratique dans des approches de tabulation et de résolution en ligne dans des codes de calcul avec spécification des domaines de validité de ces schémas ;
- analyse de la combustion de biocarburants qui possèdent une variabilité de composition liée à leur origine. Les émissions polluantes associées méritent aussi des études détaillées ;
- utilisation de la gazéification et de nouveaux modes de combustion pour la production d'énergie ;
- développement et propagation des incendies et des feux de forêt, optimisation de la lutte contre les incendies ;
- investigation, modélisation et maîtrise des problèmes couplées : combustion/transferts thermiques et radiatifs, interaction combustion/structures/matériaux (fatigue, durée de vie)…

Un autre besoin concerne le développement d'installations de combustion représentatives des conditions de température, pression, etc., rencontrées en particulier dans les moteurs aéronautiques, spatiaux et automobiles, mais aussi dans les chaudières ou les fours industriels et l'utilisation de techniques de diagnostics quantitatifs utilisables dans des environnements hostiles et de méthodes de traitement permettant une comparaison détaillée avec les simulations numériques, en particulier aux grandes échelles. Il s'avère aujourd'hui que les profils moyens ne sont pas suffisamment discriminants pour valider des simulations LES et il faut donc aller plus loin. Par ailleurs, il n'existe pas d'expériences suffisamment instrumentées pour valider des simulations couplées (combustion/rayonnement par exemple).

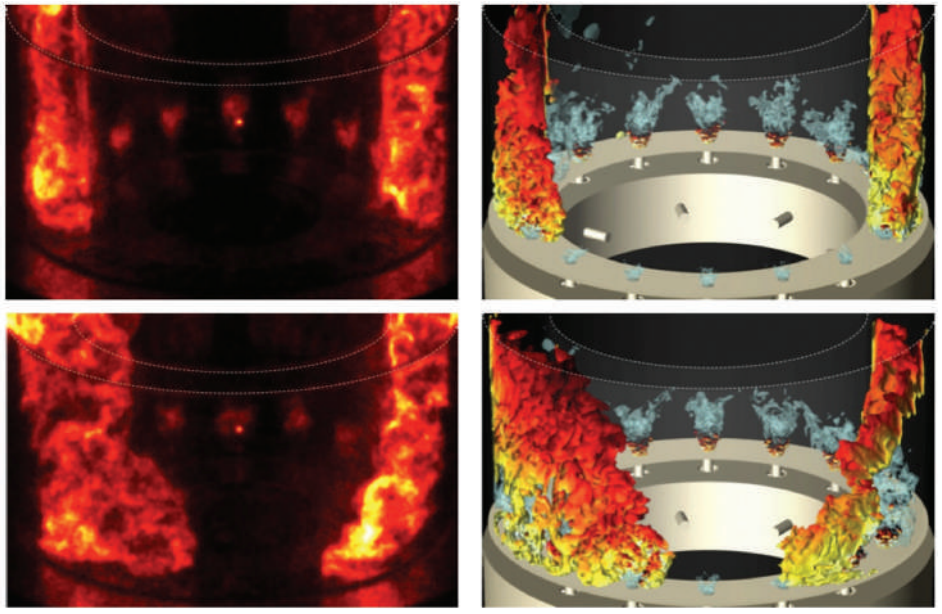


FIGURE 3.1. – Analyse de l'allumage d'un foyer annulaire. Le système comporte seize injecteurs *swirlés* alimentés en prémélange air/propane. Cette configuration est représentative des géométries réelles utilisées dans les turbines à gaz. Les parois en quartz permettent une visualisation directe de l'émission de lumière de la flamme. Les images de gauche sont tirées d'un film rapide de l'allumage et l'intensité lumineuse est représentée en fausses couleurs. Les images de droite donnent les résultats d'un calcul effectué au moyen du code AVBP (développé par le CERFACS et l'IFPEN) muni du modèle F-TACLES. Expériences et calculs réalisés à EM2C, CNRS.

Le développement de diagnostics avancés est un enjeu permanent pour la combustion avec notamment :

(1) des techniques de mesures de suies issues de la combustion en termes de fraction volumique, de distribution en tailles, de structure et de composition ;

(2) des techniques de diagnostics quantitatifs rapides, permettant l'étude simultanée des champs de vitesse, de température, de mélange et la caractérisation des espèces majoritaires et minoritaires et des taux de réaction ;

(3) des techniques de mesure non intrusive de température de parois dans les conditions difficiles rencontrées par exemple dans les moteurs à piston, mais aussi dans les brûleurs stationnaires. L'objectif est de mieux caractériser ces conditions aux limites impactant directement la combustion.

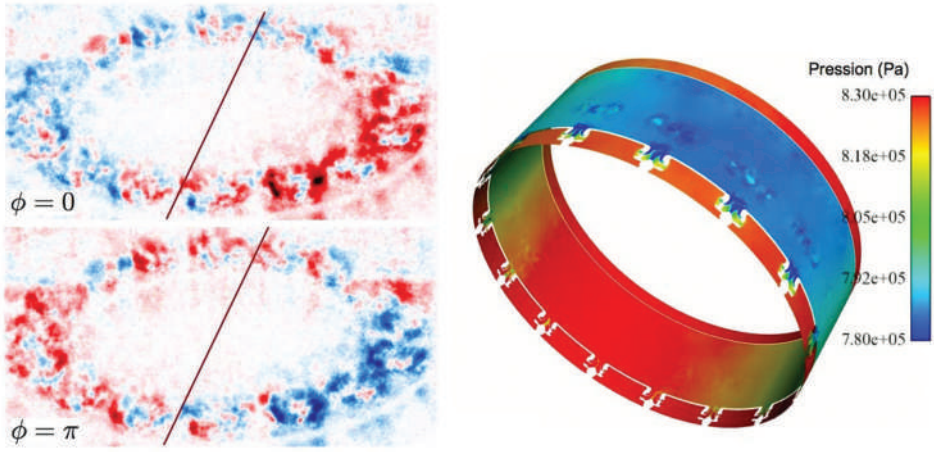


Figure 3.2. – Analyse des instabilités de combustion couplées par des modes acoustiques azimutaux. À gauche : fluctuations du dégagement de chaleur dans un foyer annulaire multi-injecteurs à deux instants au cours d'un cycle d'instabilité. Le mode azimutal est dans ce cas stationnaire et sa ligne nodale représentée sur la figure est fixe (photographie EM2C). À droite : simulation aux grandes échelles (LES) d'une instabilité couplée par un mode azimutal tournant dans une chambre de combustion aéronautique. La figure montre une coupe de la chambre suivant un cylindre et fait apparaître les niveaux de pression. On distingue aussi la réponse des injecteurs à la perturbation de pression (photographie CERFACS).

Dans le domaine de la simulation, l'objectif est maintenant de poursuivre le développement des modèles pour représenter plus finement les effets de la cinétique complexe, l'influence de phases dispersées sous forme liquide ou solide, le couplage de la dynamique de flamme avec les modes acoustiques du système, le couplage avec le rayonnement, l'interaction de la flamme avec les parois (influence sur la propagation, transferts thermiques, fatigue des matériaux…). L'objectif est de perfectionner les outils de calcul pour les besoins de la recherche et pour ceux de la conception et de l'optimisation de systèmes de combustion avancée. Un autre besoin, plutôt au niveau des applications, est celui de l'optimisation sous contraintes de la géométrie de la chambre, des conditions opératoires... Dans le même ordre d'idées, au moins en termes de méthodes, tout ce qui concerne la quantification des incertitudes (UQ) et l'assimilation de données (ajustement du calcul en fonction des données expérimentales connues, classique en météo) constituent des sujets actuels. L'assimilation de données a déjà été explorée pour les feux de forêt et il s'agit d'une voie intéressante pour l'avenir. Enfin, la tendance actuelle et future implique des couplages de codes pour traiter des phénomènes physiques en interaction au moyen de codes dédiés, l'exemple type étant celui de la combustion et du rayonnement qui demandent des architectures de codes très différentes.

Un élément clé dans le domaine du calcul est celui de la disponibilité de moyens numériques puissants massivement parallèles, offrant un potentiel d'heures de calcul élevé. Un aspect central sera de faire émerger des codes de simulation communs,

permettant l'intégration des développements réalisés, facilitant les collaborations interdisciplinaires ainsi que la mutualisation des efforts de développement et de maintenance. Dans ce domaine, l'effort de recrutement d'experts du calcul à haute performance est indispensable et il faut prévoir des investissements en moyens humains qualifiés et compléter le dispositif par les machines parallèles les plus performantes, en visant la prochaine évolution vers l'*exascale*. Les progrès passent nécessairement par l'augmentation des moyens de calcul. Il ne s'agit pas d'une course à la puissance de calcul mais plutôt de rendre possibles des études de sensibilité et d'optimisation, ainsi que l'incorporation de mécanismes plus fins ou l'analyse de systèmes complets.

3.13.4. Les enjeux industriels et sociétaux

La combustion intéresse une grande gamme d'applications, qui ont chacune des besoins spécifiques mais qui partagent aussi un noyau de connaissances commun. Ainsi, par exemple, les questions centrales de la combustion turbulente se trouvent dans les moteurs à combustion interne, les turbines à gaz, les foyers aéronautiques, les foyers industriels, les fours pour les procédés (élaboration des matériaux…). Dans les applications destinées à la production d'énergie, on recherche la plus grande flexibilité en termes de mode de conduite (étagement air et combustible), de combustible (spécification des combustibles, cocombustion charbon/biomasse), de technologies (tranches « *capture ready* », installations adaptées au captage du CO_2). Dans ce secteur, l'utilisation de combustibles solides reste importante avec un regain d'intérêt associé à la promotion de l'énergie de la biomasse, mais le sujet est insuffisamment étudié au niveau fondamental. Les objectifs industriels à atteindre concernent, toujours :

- la réduction des émissions (NOx, SOx, NOX, métaux dont Hg, particules) et de la toxicité des effluents ;
- l'optimisation de la conduite.

L'objectif est d'acquérir des données (notamment de caractérisation fine des combustibles et des régimes de fonctionnement des brûleurs. Au niveau de la modélisation, les questions principales sont celles des modèles de combustion turbulente pour les écoulements à phase dispersée.

Dans le domaine des moteurs, les sujets de recherche concernent les carburants réels et alternatifs, la diversification des sources énergétiques et donc les variabilités de carburants, les phénomènes de combustions anormales, liés notamment à la diversité des carburants, les modes de combustion ultra-dilués et dans des conditions extrêmes, les technologies de combustion avancées : les systèmes d'injection haute précision (et souvent haute pression…), les combustions maîtrisées (aérodynamique, mélange, allumage). Les nouveaux développements s'appuient sur les outils de simulation les plus avancés (simulation des grandes échelles) et des modèles d'ordre réduit déduits des simulations multidimensionnelles.

La combustion concerne aussi les problèmes de sécurité, que ce soit en termes de prévention ou de lutte : incendies, feux de forêt, explosions, sureté des installations industrielles ou des centrales nucléaires. Les feux de forêt sont aussi une source de pollution importante. Ces thématiques méritent des efforts de recherche

à la hauteur des enjeux économiques et sociétaux associés. Elles ne sont pas très bien couvertes en France aujourd'hui car, faute de moyens (pas d'investissements industriels dans le domaine, à la différence de l'aéronautique ou de l'automobile), la communauté est dispersée entre les laboratoires du CNRS, LNE, INRA, IRSN, etc., et chacun développe ses recherches en fonction de ses besoins, sans concertations. Il faut noter le rôle positif joué par le GDR « Feux », qui cherche à fédérer ces efforts, certes avec des moyens limités.

Pour cela, il faut promouvoir des recherches interdisciplinaires avec les communautés géoscience, météorologie, sciences sociales… La formation, la dispersion, la réduction des émissions polluantes constituent un enjeu fondamental pour l'automobile et l'aéronautique, et plus généralement pour tous les procédés utilisant la combustion. Les progrès réalisés en combustion, essentiellement pour l'aéronautique et l'automobile, couplés à l'augmentation des performances des moyens de calcul, permettent maintenant d'envisager des réponses pertinentes à des problèmes très complexes (grande taille, fort rôle du rayonnement et des effets de flottabilité, transition déflagration/détonation, cinétiques mal maîtrisées voire inconnues...). Parallèlement, les « opérationnels » (pompiers, sécurité civile, Météo-France, industriels...) se rendent compte qu'ils sont au bout de leurs modèles empiriques simples et qu'ils doivent maintenant aller plus loin, rendant le dialogue possible et constructif.

Le problème des particules est désormais l'objet de préoccupations permanentes et un sujet d'inquiétude pour la santé publique. Il s'agit dans ce domaine de poursuivre le développement et la mise en œuvre de moyens de caractérisation, faire progresser les connaissances sur la formation et la destruction des suies et des polluants, et innover dans les systèmes permettant de réduire les émissions gazeuses ou de particules nanométriques.

3.13.5. La concertation avec les autres disciplines

Les liens de la combustion avec les autres sciences de l'ingénieur sont naturels. La combustion partage de nombreuses problématiques avec la mécanique des fluides, la turbulence, les transferts thermiques et le génie des procédés. Il faudrait favoriser encore, dans l'avenir, les points de rencontre, par exemple par le biais d'écoles thématiques ou de plates-formes communes. Il faudrait aussi faciliter les collaborations aux interfaces avec d'autres communautés, par exemple :

- la communauté « chimie », pour ce qui a trait aux moyens de production de combustibles de nouvelle génération, les biocombustibles, l'utilisation de microalgues pour la production de biocarburants, etc., l'utilisation des méthodes dérivées de la dynamique moléculaire et de la mécanique quantique pour la détermination des constantes cinétiques et des caractéristiques thermodynamiques d'espèces radicalaires ;
- les communautés « santé » et « chimie atmosphérique » pour des études d'impact des nanoparticules et des polluants gazeux ;
- la communauté « géosciences » pour les problèmes liés à l'impact des feux ;
- la communauté « procédés » pour l'étude des systèmes hybrides (solaire/turbine, pile à combustible/turbine).

Le lien avec la communauté « matériaux et structures » pourrait aussi permettre de progresser sur l'interaction combustion/matériaux/structures avec en vue les problèmes de fatigue et de vieillissement.

3.13.6. La position française par rapport à l'international

La communauté française en combustion est de taille relativement réduite si l'on considère l'importance pratique du sujet et la taille des communautés de recherche qui existent dans des domaines d'importance pratique bien plus réduite. La communauté combustion est cependant bien identifiée et structurée, et a appris à travailler d'une façon collective et concertée. Sa reconnaissance internationale est établie dans des domaines clés comme ceux de la combustion turbulente, de la dynamique de la combustion et des méthodes de simulation des grandes échelles. Dans le domaine de l'acquisition des connaissances fondamentales, les unités de recherche (UPR ou UMR), dans lesquelles le CNRS a un poids considérable, jouent un rôle décisif qu'il convient de conforter et de développer. Le CNRS a dans ce domaine une responsabilité stratégique importante et se doit de réfléchir au devenir des unités sur ces thématiques pour renforcer judicieusement la communauté, notamment en moyens humains. Cette réflexion devrait s'appuyer sur les éléments principaux suivants :

(1) permettre à la communauté française en combustion d'assumer sa place dans la communauté internationale, car le nombre de ses chercheurs est déséquilibré par rapport à sa reconnaissance et ses potentialités ;

(2) faire face aux sollicitations croissantes de l'industrie, dont la résolution de problèmes de plus en plus difficiles nécessitent des recherches fondamentales, des expériences bien contrôlées et des simulations complexes ;

(3) traiter en l'anticipant le problème du renouvellement des chercheurs, ingénieurs et techniciens, car la pyramide des âges laisse présager des situations difficiles qui, dans le cadre d'une communauté à effectifs réduits, peut conduire à la disparition de thématiques d'importance.

3.13.7. Recommandations et perspectives

Bien que le domaine de la combustion ait atteint un niveau de maturité important, ce sujet pose toujours des défis considérables aux forts impacts économiques et sociétaux. Des progrès et des avancées dans la compréhension des phénomènes, dans leur modélisation et dans leur simulation sont nécessaires. Les problèmes de combustion sont d'autant plus importants qu'ils déterminent pour une bonne part les émissions polluantes. D'autre part, la réduction de consommation est devenue un objectif permanent dans le contexte de la raréfaction des ressources fossiles et de la lutte contre les gaz à effet de serre. Pour traiter ces problèmes, il faut évidemment consolider les unités qui effectuent des recherches dans ce domaine, encourager les collaborations entre unités dans des projets coordonnés et dans des structures comme l'INCA (Initiative sur la combustion avancée) qui regroupent les chercheurs des laboratoires et des organismes et les ingénieurs des

entreprises concernées du groupe Safran, ou le GDR « Feux » qui rassemblent les chercheurs des différents organismes se préoccupant de sécurité incendie. Les actions permettant la fédération et la structuration de la communauté en combustion, en liaison avec les partenaires industriels et les autres organismes, doivent être soutenues car elles sont source de progrès. Il faut aussi faire des investissements pour l'amélioration des capacités expérimentales en privilégiant les diagnostics optiques et laser, l'imagerie rapide et les moyens de traitement adaptés. De ce point de vue, les plates-formes diagnostics peuvent jouer un rôle important dans la formation des jeunes chercheurs. Dans le domaine de la simulation, il faut poursuivre le recrutement de chercheurs formés au calcul à haute performance et d'ingénieurs pouvant apporter leur concours aux développements de logiciels mutualisés d'envergure. Il faut continuer à développer les codes de façon collaborative en capitalisant les avancées faites au niveau par les unités de recherche. Enfin, l'accès aux moyens de calcul les plus puissants est aussi l'une des conditions de la réussite dans ce domaine.

3.14. Simulation numérique en mécanique des solides et des structures

3.14.1. Descriptif de la thématique

Il s'agit, dans ce cadre, de comprendre concevoir et agir, les trois finalités de la simulation numérique qui constitue une avancée déterminante du XX^{e} siècle [1]. La science de l'ingénierie fondée sur la simulation est devenue une nouvelle discipline scientifique à part entière : c'est une véritable révolution des modes de pensée qui va structurer la manière de concevoir l'ingénierie au XXI^{e} siècle. Cette manière de comprendre le monde se montre très efficace et utile pour la science mécanique. Ce type d'outils s'est considérablement développé depuis l'après-guerre et a bénéficié des progrès énormes des technologies informatiques. Il est communément admis que les progrès considérables de la simulation numérique sont dus pour 50 % à l'augmentation de la puissance des ordinateurs et pour 50 % aux progrès des méthodes de simulation. On peut maintenant faire sur des PC portables des calculs bien plus importants que ceux que l'on pouvait faire sur les ordinateurs centraux les plus puissants dans les années 1960. Ce développement considérable a donné aux ingénieurs des outils de prévision et de simulation très performants, et aux chercheurs des outils d'expérimentation numérique très puissants leur permettant de simuler nombre de situations, et de bien mieux comprendre ainsi les expérimentations, d'en concevoir de nouvelles et de bien assurer leur qualité. Les développements en mécanique des matériaux, structures et procédés sont principalement basés sur la méthode des éléments finis. On doit également citer ici les éléments frontières, fort utiles pour certaines applications, et les méthodes sans maillage, qui sont en plein développement et offrent des perspectives intéressantes pour les fragmentations, ruptures et perforations.

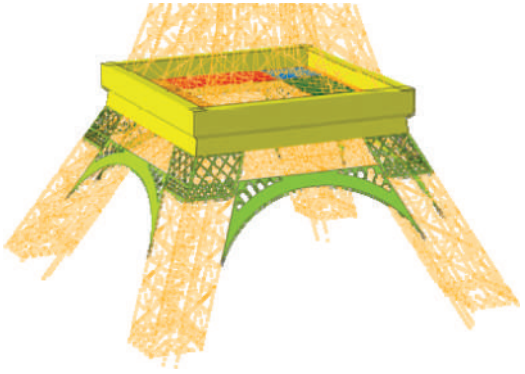


FIGURE 3.3. – Numérisation de la tour Eiffel et étude de son comportement mécanique.

3.14.2. État de l'art

On doit citer pour commencer au moins deux ouvrages qui font référence :

- un rapport d'Étienne Klein [1] qui définit les trois finalités de la simulation par les trois verbes : comprendre, concevoir, agir. Cette manière de définir l'approche de l'ingénieur, en particulier de l'ingénieur mécanicien, fait de cette discipline une science à part entière car elle ajoute au « comprendre » – habituellement réservé aux scientifiques – le « concevoir » – qui caractérise les ingénieurs –, puis le « décider » qui apporte un élément essentiel au processus. Cette contribution se place délibérément dans cette perspective ;
- un rapport de prospective écrit à la demande de la NSF publié aux États-Unis en 2006, puis révisé en 2009, intitulé « Simulation-Based Engineering Science » [2]. L'ingénierie basée sur la simulation repose sur des données statiques de simulation : ces données peuvent être les paramètres des modèles, conditions limites chargements, matériaux, sorties aux divers instants de calcul, etc., résultats des expériences (par exemple champs mesurés). Ces données peuvent être combinées pour trouver la solution d'un nouveau problème, mais la base de données est statique au sens où cette nouvelle analyse ne la modifie pas.

Un nouveau paradigme est en émergence actuellement, qui consiste à enrichir cette base de données dynamiquement par la nouvelle simulation effectuée. La dénomination anglo-saxonne de cette stratégie est DDDAS (*Dynamic Data-Driven Application System*). Ce type de démarche permet de conjuguer calculs complexes et mesures en temps réel et d'interagir entre mesures et essais en temps réel. Par exemple, les techniques de collage de sous-domaines en dynamique développées par les Français ont d'ailleurs permis ainsi de réussir des essais hybrides de réponses au séisme de piles de ponts reliés par un tablier sur le mur de réaction d'ISPRA (les piles étaient testées et la réponse non linéaire du tablier du pont était simulée par éléments finis).

Pour le monde industriel, les simulations numériques s'appuient actuellement principalement sur l'utilisation d'outils commerciaux conviviaux, bien documentés et ciblés sur la résolution de problèmes linéaires et non linéaires (faible complexité), en statique et dynamique. Ces outils sont très présents pour les calculs quotidiens dans les PMI, PME et les grands groupes pour les analyses de routine. Quelques grands logiciels de simulation du marché offrent des possibilités de modélisation et simulation en non-linéaire avec la possibilité de calculs sur les ordinateurs multiprocesseurs. Ces dernières années, des solutions de calcul linéaire intégrées ou couplées aux systèmes de CAO ont été proposées avec succès. Par ailleurs, la plupart des éditeurs des logiciels de simulation ont été rachetés par les éditeurs des systèmes de CFAO avec comme objectif de proposer des solutions intégrées de CAO/calcul. Des solutions alternatives de calcul avec une forte intégration bidirectionnelle avec les systèmes de CAO du marché sont également utilisées par les industriels. La grande tendance concerne le chaînage des différents logiciels, notamment pour résoudre les problèmes multiphysiques.

Le réflexe le plus courant lorsque l'on doit faire face à des difficultés avec ces procédures est de passer à des expérimentations. La question qui se pose immédiatement est la représentativité de ces expériences, bien souvent à échelle réduite. Quelques grandes entreprises, où la recherche est plus développée, font des simulations numériques plus complexes intégrant la dynamique (transitoire ou sur base de recombinaison modale) et parfois le non-linéaire. Ces applications sont cependant encore peu répandues et servent généralement de support à des expérimentations. Il est plutôt rare que des méthodes de calcul complexes soient utilisées pour faire de la conception. Il y a là un frein à l'innovation car bien souvent les analyses non linéaires permettent de diminuer le conservatisme, donc d'augmenter les performances des objets et finalement de diminuer leur coût (généralement assez proportionnel à leur masse).

Pour le monde de la recherche et développement, les applications avancées (dynamiques et non linéaires) sont maintenant pratiquement le seul domaine d'activité. Et ce domaine est en forte évolution. Les produits de la recherche sont nombreux et la communauté est très active. Ces activités sont en plein essor actuellement dans le monde académique et chez les industriels à la pointe de la technologie. Il s'agit ici de prévoir et de comprendre par le calcul des situations complexes non linéaires et parfois dynamiques. Bien souvent, les physiques sont couplées, par exemple dans les turboréacteurs d'avion, dans la conception de circuits imprimés de microprocesseurs, dans la prédiction de durée de vie des appareils. Ce couplage a un effet déterminant sur la prévision des marges et des durées de vie. La maîtrise de ces couplages est essentielle pour prendre les bonnes décisions au moindre coût, mais impose des calculs de plus en plus complexes et des ingénieurs bien formés. Les échelles inférieures comme la microstructure ou les architectures de matériaux peuvent avoir des effets considérables sur le comportement macroscopique (on peut citer ici par exemple le choix d'architectures de réseaux de poutres permettant de créer des matériaux auxétiques). Se développent actuellement de très nombreuses méthodes de simulation alliant multiéchelle, parallélisme et multiphysique.

La maîtrise de la qualité et de la confiance dans les simulations est également un sujet important. Cette piste de recherche nécessite de considérer trois étapes

que sont la vérification, la validation et la certification des modèles. Remarquons ici que l'oubli de la prise en compte des équipes d'Hommes qui opèrent ces méthodes pourrait conduire à des erreurs majeures lors de la conception. Notons enfin les méthodes de réduction de modèles en plein développement actuellement.

Tentons maintenant de faire un bref état des lieux du calcul en mécanique des solides et des structures. Nous allons distinguer ici les évolutions et améliorations continues des ruptures.

Pour ce qui est des développements de type évolution :

- sur la fonction maillage, les outils sont arrivés à maturité pour les éléments finis (les mailleurs automatiques 3D sont presque parfaits) ;
- pour ce qui est des méthodes éléments finis, il n'y a plus de nouveauté de type rupture mais essentiellement des progrès incrémentaux ;
- les simulations sans maillage ne sont pas encore au point mais les développements actuels se concentrent sur les sujets sur lesquels elles sont particulièrement bien adaptées : fragmentation, contacts et ruptures multiples, interactions complexes fluide/structure ;
- pour les post-traitements, il n'y a en général pas de question majeure, les outils graphiques puissants venant de la communauté « animation ». Cependant, on voit émerger les premiers calculs de structure avec environ un milliard d'inconnues. Le dépouillement graphique de ces grandes masses de données est actuellement l'une des limitations importantes de ces analyses. La technique des sous-domaines permet de distribuer les analyses sur plusieurs calculateurs, mais l'analyse des résultats dans son ensemble reste encore bien difficile.

Les principales ruptures sont :

- le développement des fonctions de niveau (*level set*) conjugué au concept de partition de l'unité qui a apporté une amélioration significative dans les modèles numériques car cette notion permet de ne plus confondre les interfaces (entre matériaux par exemple) avec le maillage. On peut ainsi très facilement gérer la présence et la propagation des interfaces mobiles dans les maillages. Les méthodes X-FEM en sont un exemple ;
- le couplage CAO/calcul qui connaît en ce moment une avancée majeure avec le développement en plein essor des éléments isogéométriques. Ces techniques sont encore peu matures mais plutôt prometteuses. En effet, ces méthodes s'immergent naturellement dans la CAO et offrent donc aux outils de CAO des possibilités pour intégrer simplement de la physique ;
- les méthodes de couplage et d'assemblage de codes et de sous-domaines en statique et en dynamique, en particulier toutes les techniques « non intrusives » qui permettent de faire des applications multiphysiques en se servant du « meilleur » code pour chacune des physiques ;
- les méthodes de réduction de modèle qui peuvent être vues comme des bases modales évolutives pour le non-linéaire statique et dynamique, et qui sont en plein développement ;
- les théories de champ de phase qui permettent de traiter simplement les naissances et croissance de discontinuités dans un cadre thermodynamique solide.

3.14.3. Les orientations scientifiques nécessaires en fonction des enjeux

- Exploitation des modélisations des matériaux par des modèles mieux physiquement fondés que les modèles phénoménologiques actuels : les modèles physiquement fondés s'appuient sur les échelles plus basses (microstructure).
- Pour toutes les industries, le développement de matériaux à architecture contrôlée est un défi majeur et essentiel dans un monde où les matières premières ne sont pas inépuisables. L'idée d'introduire ce degré de liberté dans la conception des matériaux conduit à des innovations majeures et à des gains de masse qui peuvent être considérables pour une même résistance. L'apport du calcul y est essentiel car toutes sortes d'architectures peuvent être imaginées et testées virtuellement, ce qui permet une créativité exceptionnelle. L'observation des matériaux naturels montre que les possibilités sont presque infinies.
- Modélisation fine de structures mécaniques complètes et cohérentes avec la CAO (par exemple modéliser et calculer un avion complet en matériaux composites conduit à la résolution d'un problème avec un milliard d'inconnues : le parallélisme intensif est ici incontournable).
- Robustesse des quantités d'intérêt pour la conception mécanique : maîtrise de la sensibilité aux erreurs de modèles et aux erreurs de données. Ce concept est essentiel pour le design : il consiste à connaître quels sont les paramètres qui influent le plus significativement sur la quantité d'intérêt visée.
- Pour les industries nucléaire et aéronautique, l'extension de durée de vie est une problématique majeure. Pour maîtriser cette dernière, il est essentiel de prendre en compte toute l'histoire de la fabrication dans l'évaluation des marges à la rupture ou à l'endommagement.
- Le développement des méthodes de réduction de modèle permet de généraliser au non-linéaire transitoire la notion de mode propre adaptatif. Ces modèles réduits peuvent ensuite être utilisés à un niveau plus global et prendre en compte ainsi tous les détails non linéaires d'un objet avec peu d'inconnues. De plus, ils permettent des analyses simples et efficaces de robustesse.
- Le contrôle basé sur la simulation qui permet d'agir sur les procédés et les systèmes en temps réel, et apporte surtout la capacité d'opérer au sein des systèmes embarqués (robots autonomes et la future robotique bio-inspirée). On aura donc besoin de calculs rapides dans des plates-formes de calcul légères et d'un rapprochement des communautés de la simulation et du contrôle.
- L'évaluation rapide des solutions des modèles complexes sur des plates-formes légères permettrait de démocratiser le calcul et décentraliser les services de R&D dans les industriels vers les ateliers.
- Médecine et bio-ingénierie. Réalité augmentée obtenue par assemblage de simulations numériques fines sur lesquelles sont faites des réductions de modèles. Ces modèles réduits sont ensuite utilisés comme base de recalage en temps réel pour assister les praticiens dans leurs gestes.

– Couplages multiphysiques : thermo/hydro/chimie/fluide/structure/métallurgie/magnétisme. Un exemple parmi de très nombreux autres est la modélisation de la morphogenèse des tissus biologiques.
– Réalité augmentée : actuellement, ces concepts ne prennent généralement pas en compte le comportement mécanique. Or la mécanique joue un rôle déterminant dans certains cas et les redistributions de contraintes associées aux procédés simulés peuvent changer la géométrie de manière drastique. (Par exemple, lorsque l'on ouvre la boîte crânienne pour retirer une tumeur du cerveau, la position de cette tumeur change parfois tellement que le médecin passe souvent beaucoup de temps à la « retrouver ».)

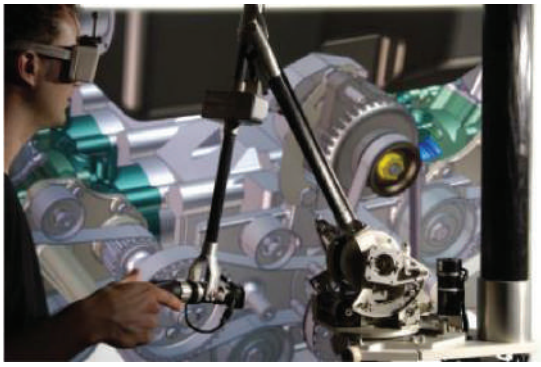


FIGURE 3.4. – Réalité augmentée et calcul de structures.

3.14.4. Les verrous scientifiques et technologiques à lever

– Techniques sûres de changement d'échelle en non-linéaire et rupture. Ce domaine en plein développement consiste à prendre en compte au niveau macroscopique les phénomènes aux échelles inférieures et prédire ainsi les effets des échelles inférieures sur le comportement à l'échelle macroscopique. Ces questions complexes sont souvent mentionnées sous le terme « multiéchelle ».
– Méthodes numériques efficaces pour les problèmes transitoires non linéaires : les méthodes de réduction de modèles en non-linéaire dynamique sont probablement une clé qui donnera accès à la possibilité de faire des analyses de robustesse et à la simulation en temps réel de phénomènes complexes non linéaires indispensables pour pouvoir travailler dans une réalité augmentée.
– Une vision unifiée essais/mesure de champ/calcul qui permet de révolutionner le pilotage des expérimentations, mais également d'éliminer de nombreuses complexités dans les lois de comportement en supprimant les artefacts expérimentaux.

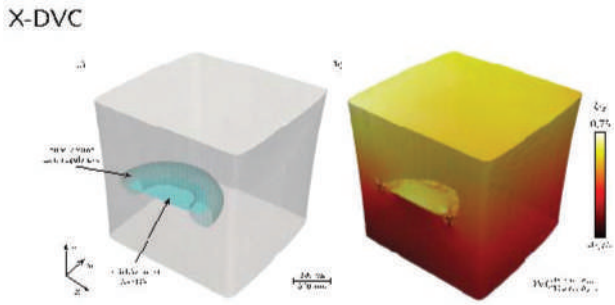


Figure 3.5. – Calcul hybride éléments finis/mesure.

- Vérification, validation et quantification des incertitudes. Ces trois étapes sont indispensables pour que la simulation soit digne de confiance et puisse être réellement utilisée au quotidien dans l'industrie. Pointons ici un domaine particulièrement délicat qui est la quantification des incertitudes dans les évènements extrêmement rares (séismes, accidents sévères, etc.) pour lesquels les méthodes statistiques usuelles sont inopérantes.
- Couplages de codes non intrusifs pour la multiphysique.
- Méthodes isogéométriques robustes et efficaces pour toutes les applications usuelles en mécanique des solides.
- Parallélisation massive des simulations.
- Constitution d'abaques numériques capables de contenir la solution de systèmes multiparamétriques complexes, calculés *offline* et exploités *online* en temps réel et dans des plates-formes de calcul légères. Applications, optimisation, identification, analyse inverse et contrôle de matériaux, procédés, structures et systèmes.

3.14.5. Les laboratoires concernés

LMT Cachan, GEM Nantes, LaMCoS INSA Lyon, Mines ParisTech Évry et CEMEF, LMS-École polytechnique, Roberval UTC, LTDS Site de Saint-Étienne, LMGC Montpellier, LMA Marseille, LML Lille, LPMM Metz, ONERA Paris, LaMSID EDF CEA, CEA Paris, EDF DER Clamart, CETIM.

3.14.6. Les enjeux industriels et sociétaux

- Monter en compétence pour aborder les problèmes complexes systématiquement par la simulation et ainsi décider des essais les plus pertinents qui doivent être réalisés. On parle ici d'essais virtuels (*virtual testing*). Cette ligne de recherche permet aussi de grosses économies, mais nécessite une bonne confiance dans les outils de simulation et aussi dans les équipes d'Hommes qui auront préparé ces essais.

- Diminution des temps de conception des objets industriels et des coûts du cycle conception/optimisation.
- Développement d'outils d'aide à la décision à partir d'abaques numériques évolutives produites par des outils de la famille des modèles réduits. Un exemple peut être donné ici : en cas d'incendie dans un tunnel, une décision doit être prise très rapidement en fonction d'une observation (un feu sur un camion ou une voiture à tel endroit dans le tunnel). La mise à disposition des décideurs d'abaques numériques permettant de naviguer facilement entre des situations précalculées par des calculs multiphysiques complexes leur donne une aide cruciale dans ce type de cas.
- Pour les effets d'évènements très rares (séisme par exemple) sur l'intégrité de structures sensibles, les méthodes statistiques OUQ (*optimal uncertainty quantification*) donnent des bornes raisonnables pour évaluer les probabilités de rupture dans de tels cas et sont la clé pour pouvoir dire quelque chose sur ces évènements non accessibles par les méthodes statistiques usuelles, inopérantes pour les évènements très rares.

3.14.7. Les liens et concertations nécessaires avec les autres disciplines

La simulation numérique en mécanique des solides et des structures a des liens forts avec les disciplines suivantes :

- mathématiques appliquées,
- science des matériaux,
- thermique,
- chimie,
- automatique,
- génie électrique,
- électromagnétisme.

3.14.8. La position française par rapport à l'international

La communauté française dans ce domaine a commencé à se structurer relativement tard (le CSMA, par exemple, est né en 1991, presque dix ans après les Allemands). Cette communauté s'est très bien développée, en particulier grâce au congrès de Giens qui attire de plus en plus de personnes. Il rassemble maintenant tous les deux ans plus de 400 personnes. Les chercheurs français ont été au cœur de plusieurs développements scientifiques de grande envergure : XFEM, validation et vérification, homogénéisation, réduction de modèles, méthodes sans maillage, multiphysique et multiéchelle, dynamique et non-linéaire. Cette communauté se distingue des autres communautés internationales par ses liens très forts avec l'industrie (aéronautique, spatial, énergie, transport, défense…). Cette originalité est différenciante : c'est un véritable atout, mais aussi une faiblesse auprès de certains académiques internationaux. La communauté

a beaucoup progressé dans sa visibilité internationale, cependant celle-ci n'est pas encore à la hauteur de son importance. C'est en effet la deuxième ou troisième communauté la plus imposante au niveau mondial. Sa visibilité dans les conférences et son implication dans l'organisation de grandes conférences internationales est remarquable (conférences sur invitation plus fréquentes par exemple). Le lobbying et la solidarité, nécessaires entre collègues à ce niveau, peuvent encore progresser. Remarquons que la politique de mise en avant d'un certain nombre de jeunes est de bon augure pour la visibilité de la France dans ce domaine.

Concernant les publications dans les revues, la France a une très bonne visibilité et est présente dans les équipes qui dirigent les grands journaux du domaine. Elle ne possède cependant encore aucun journal majeur dans la discipline. Cela résulte principalement d'un éclatement trop fort des communautés solides, fluides et mathématiques appliquées. Un projet est en cours avec le lancement de la première revue « *open access* » du domaine AMSES pilotée par le CSMA et hébergée chez Springer.

3.14.9. Recommandations et perspectives

Nous formulons les recommandations suivantes :

- privilégier l'innovation et les ruptures scientifiques par rapport aux recherches incrémentales ne visant que de légères améliorations de l'existant, proposer plutôt que suivre ! Cette innovation a besoin d'une transversalité qui doit être mise en avant entre mécaniciens des solides, des fluides, thermiciens, électromagnéticiens, biologistes, médecins, automaticiens, physiciens, chimistes… ;
- chercher le bon équilibre entre fondamental et applicatif, sachant que notre action doit s'inscrire dans la boucle comprendre/concevoir/agir ;
- être présent dans les comités internationaux pour représenter l'ensemble de la recherche française avec ses spécificités et ambitions ;
- travailler à l'émergence d'un journal porté par la communauté française, assise cependant sur une base européenne. Œuvrer à la réussite de AMSES ;
- mettre en place un projet structurant pour les analyses massivement parallèles. Un projet de couplage de codes pour la multiphysique serait très porteur car il nécessiterait obligatoirement un travail collaboratif entre scientifiques d'horizons différents et des gros moyens de calcul, et permettrait à chacun de comprendre les méthodes de l'autre et peut-être les adopter ;
- insister sur le volet communication de la mécanique numérique en montrant des applications grand public qui « rassurent ». La chirurgie, par exemple, ou l'explication de la mécanique au sport (comment se déforme un ballon de foot et comment le frapper pour donner telle ou telle propriété à la trajectoire…), ou encore l'explication d'expérimentations simples et surprenantes. La mécanique des bulles et des gouttes est un sujet très intéressant et abordable pour mobiliser le grand public. Des modélisations dans le spatial ou encore aux nanoéchelles pourraient présenter un grand intérêt.

3.14.10. Bibliographie

[1] « Comprendre, concevoir, agir : les trois finalités de la simulation », É Klein, *Clés CEA* 47, hiver 2002–2003.

[2] « Simulation-Based Engineering Science. Revolutionizing Engineering Science through Simulation », T. Oden et al., NSF report, Feb. 2006, Blue Ribbon Panel on Simulation-Based Engineering Science.

3.15. Modélisation et simulation numérique des procédés d'assemblage par soudage et de mise en forme par grandes déformations

3.15.1. Descriptif de la thématique

Comme dans de nombreux autres domaines des sciences de l'ingénieur, la simulation numérique joue un rôle central dans le développement des sciences mécaniques en général, et des procédés d'assemblage par soudage et de mise en forme tels que les procédés de forgeage, emboutissage, etc., par grandes déformations. Pour les métaux, par procédés de fabrication par grandes déformations nous entendons tous les procédés qui visent à obtenir une forme finale plus ou moins complexe à partir d'une forme simple qui peut être une tôle (formage de structures minces), un tube (hydroformage), une poutre (pliage…), un lopin massif (forge, estampage…), de la poudre métallique (fabrication additive), de métal en fusion (fonderie) ou en état semi-solide (thixoformage). Par soudage nous entendons les procédés qui consistent à réunir deux ou plusieurs pièces issues de la fabrication (qui seront les parties constitutives d'un assemblage) de manière à assurer la continuité de la matière entre les parties assemblées. Ces procédés sont le soudage à l'arc (TIG MIG/MAG), le soudage par faisceau haute densité d'énergie (laser, faisceaux d'électrons), le soudage par résistance, mais aussi le soudage par friction inertielle et par friction malaxage. Pour les matériaux non métalliques, cela peut concerner l'obtention de pièces complexes à partir d'ingrédients comme des fibres, des étoffes, etc., noyés dans une matrice en polymère. La simulation numérique a permis des progrès colossaux dans le domaine de l'optimisation des procédés de fabrication, non seulement pour obtenir des pièces conformes aux cahiers des charges, mais également pour réduire les coûts de la mise au point des procédés et leurs impacts sur l'environnement.

Dans ce domaine, la simulation numérique permet d'éviter progressivement l'usage des méthodes purement expérimentales très coûteuses d'essais/correction, au profit d'une utilisation courante de la simulation numérique communément appelée « soudage », « formage » ou « fabrication virtuelle ». Ainsi, l'ingénieur ne passe à la réalisation d'un essai physique du procédé que lorsque le procédé virtuel est satisfaisant. Si ce dernier est conforme aux cahiers des charges, une exploitation industrielle du procédé est alors lancée, sinon on revient à la simulation numérique en modifiant les données de la simulation, et ainsi de suite jusqu'à l'obtention d'un procédé conforme aux cahiers des charges.

Pour améliorer les performances de fabrication et d'assemblage virtuels, la méthodologie numérique doit reposer sur :

- ***une modélisation à fort potentiel prédictif*** sous forme d'équations de mouvement représentatives du procédé et des phénomènes physiques qui s'y développent. Il s'agit :
  - o d'EDP (équations différentielles aux dérivées partielles) et de leurs conditions initiales et aux limites appropriées, résultant des diverses lois de conservation dans le cadre de la mécanique des milieux continus (solides et fluides) en présence de multiples phénomènes : équilibre dynamique, transfert thermique, transport de masse, transformation de phase, électromagnétisme, écoulement de fluide… Ces équations dérivent en général de lois de conservation de la physique des milieux continus comme la conservation de la masse, de la quantité de mouvement, de l'énergie ou toute équation de bilan en relation avec les phénomènes physiques pris en compte ;
  - o d'équations d'évolution (équations différentielles ordinaires ou EDO) de tous les phénomènes physiques tenant compte des diverses interactions (ou couplages) et représentant, aussi finement que possible, les phénomènes physiques intrinsèques à chaque phénomène. Des modélisations mono- ou multiéchelles peuvent être utilisées ;
  - o d'équations de comportement des interfaces de contact entre outils et pièces ou entre diverses parties d'une même pièce. Il s'agit là de modèles de contact frottement aux interfaces de contact compte tenu des nombreux phénomènes physiques qui y siègent : phénomènes thermique, état de surface (rugosité), pression de contact, environnement de contact (lubrification)… ;

- ***des méthodes numériques robustes*** et adaptées à la nature des équations de mouvement pour la résolution globale du problème et à la nature des équations d'évolution des phénomènes dissipatifs. Des schémas adaptatifs de discrétisation de l'espace 3D par éléments finis (EF) ou par des méthodes sans maillage (*meshless*) sont indispensables pour la résolution des EDP. Pour la résolution des EDO localement en chaque point de quadrature, l'utilisation de schémas implicites est souvent incontournable. Pour les besoins de l'adaptation des discrétisations de l'espace et du temps, des méthodes appropriées doivent être développées concernant les estimateurs d'erreurs, la sélection de la taille pertinente du pas de l'espace ou du temps en chaque point et à chaque instant, la génération de la nouvelle discrétisation, le transfert des champs entre les discrétisations successives, la création de nouvelles frontières dues à des propagations de fissures…

Ces modélisations avancées et ces méthodes numériques performantes doivent être intégrées dans des plates-formes qui permettent de simuler numériquement toutes sortes de procédés de fabrication par grandes déformations ou d'assemblages par soudage. Ces plates-formes sont plus larges qu'un logiciel de calcul de structures et doivent en conséquence contenir plusieurs outils pour répondre

aux besoins de l'ingénieur, lui permettant d'obtenir des pièces conformes aux cahiers des charges tout en minimisant le coût global (coût de mise sur le marché, coût carbone…). Ces besoins industriels sont liés à des critères de performance et de sûreté ; on recherche principalement l'augmentation de la productivité et de la fiabilité du procédé, de l'assemblage et du produit. Finalement, il s'agit pour l'industriel d'atteindre un haut niveau de qualité avec un processus fiable pour un coût minimum, un temps de mise sur le marché minimum et un impact sur l'environnement conforme aux exigences des nouvelles normes.

Ces plates-formes numériques doivent permettre de combiner : (i) des modèles discrétisés, (ii) des méthodes numériques appropriées pour résoudre globalement des EDP et/ou pour intégrer localement des EDO, (iii) une base de données de résultats expérimentaux pour l'identification des paramètres et pour la validation, (iv) des outils d'optimisation multiobjectifs, d'aide à la décision, de visualisation et d'analyses, des outils d'exploration de l'espace de conception, de simplification de modèles (métamodèles) et d'analyse des incertitudes et de la sensibilité des modèles, tout en facilitant l'intégration de nouvelles fonctionnalités. Elles doivent offrir des solutions de communication/intégration performantes avec les systèmes de CFAO du marché.

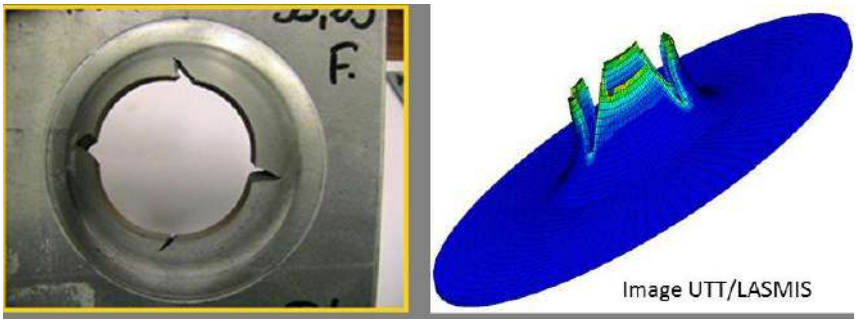


FIGURE 3.6. – Formatage virtuel.

3.15.2. État de l'art

Actuellement, de nombreux logiciels industriels dédiés à la simulation numérique des procédés de mise en forme sont proposés. Ils permettent de modéliser et de simuler des procédés 3D : mise en forme de structures métalliques minces ou massives par grandes déformations, usinage par enlèvement de copeaux ou de moulage par fonderie, etc. La grande majorité de ces logiciels sont basés sur la MEF et permettent des représentations 3D des procédés avec analyses adaptatives (voir par exemple [1, 2]). Quelques logiciels proposent même des résolutions par des méthodes sans maillage (*meshless*) (voir [3]). Cependant, les équations de mouvement et de comportement utilisées dans ces logiciels ne permettent pas une représentation fine des nombreux phénomènes physiques et de leurs interactions mutuelles.

La tendance qui se développe cette dernière décennie vise à proposer des logiciels basés sur des modélisations plus fines (voir [4]) qu'il convient d'encourager.

Pour aller dans ce sens, il faut s'appuyer sur les avancées récentes dans de nombreux domaines connexes :

- le domaine des sciences des matériaux qui propose des méthodes performantes d'observation 3D et de mesure de champs in situ pour mieux caractériser les phénomènes physiques et mesurer leurs évolutions ;
- le domaine de la mécanique des solides et des structures qui propose des formulations avancées dans le cadre de la mécanique des milieux continus généralisés, des modélisations multiphysiques et multiéchelles qui s'appuient sur des observations fines des mécanismes physiques des divers phénomènes ;
- le domaine de l'analyse numérique qui propose des méthodes numériques particulièrement bien adaptées aux fortes non-linéarités des problèmes de valeurs initiales et aux limites (PVIL), et des méthodes de simulation adaptatives performantes (voir le chapitre « Simulation numérique en mécanique des solides et des structures »). Malgré les grands progrès réalisés par les logiciels de simulation des procédés du marché, il reste encore des progrès à faire sur les méthodologies de formage ou d'assemblage virtuel complètes, prédictives et conviviales permettant, dans une même analyse adaptative, de :
  - simuler de manière itérative un procédé de fabrication jusqu'à l'obtention du procédé optimal validé ;
  - optimiser le procédé de fabrication par référence à de nombreux critères : obtenir une forme idéale (sans défauts), minimiser la quantité de matière utilisée, minimiser le nombre de passes (donc le nombre d'outillages) nécessaires à l'obtention de la pièce voulue, maximiser la durée de vie des outillages de fabrication… Tout cela contribue à la recherche d'une gamme de fabrication à faible coût (coût de revient, coût carbone…) ;
  - maximiser la durée de vie en service des pièces fabriquées, en fonction des champs mécaniques résiduels dans la pièce en fin de procédé de fabrication. Cela revient à tenir compte de l'histoire des procédés de fabrication des pièces et de son incidence sur leur tenue en service.

Concernant la simulation des distorsions de la structure et des contraintes résiduelles engendrées par l'opération de soudage [7, 8, 9, 11], menés activement depuis plus de trente ans, ces travaux ont acquis une bonne maturité et ont concerné une grande diversité de matériaux, de procédés, de configurations et de structures. Les limitations sont principalement d'ordre technologique pour les modèles de grande taille comme les multicomposants monopasses (turbomachine, automobile) comportant de l'ordre d'une centaine de soudures, les composants de grosse épaisseur multipasses (nucléaire) et les très grandes structures monopasses (aéronautique, naval, offshore) comportant plusieurs dizaines de mètres de soudure. Une autre limite se trouve dans la confrontation expérimentale en vue de la validation car la mesure des contraintes résiduelles reste difficile et très dépendante de la méthode.

Concernant la simulation du procédé de soudage [5, 6, 10], des modèles indirects dits de « source de chaleur apparente », représentant l'énergie apportée par le procédé dans la pièce, existent pour les principales technologies de soudage (à l'arc, laser, par résistance, hybride, friction, malaxage, etc.) ; des modèles multiphysiques

sont utilisés pour simuler plus finement le procédé directement à partir des paramètres de ce dernier. Lorsque le procédé est directement modélisé, il faut alors tenir compte des phénomènes physiques dans le bain de fusion et dans l'arc. L'état de l'art propose quelques approches qui sont principalement en 2D ou 2D axisymétrique, des calculs 3D émergent mais la validation demeure difficile par manque d'observables de la scène de soudage. En effet, il semble peu crédible de valider une simulation magnétohydrodynamique des écoulements dans le bain en fusion par une simple macrographie du cordon de soudure (coupe transverse du bain fondu solidifié).

Concernant les outils logiciels utilisables pour la simulation du soudage, il existe des logiciels dédiés à la simulation des effets thermométallurgiques et thermomécaniques (contraintes résiduelles, distorsions) du soudage tels que SYSWELD ou MORPHEO, mais les outils plus généralistes tels que Abaqus, ANSYS, Code-Aster, Cast3M sont aussi couramment utilisés. Pour la simulation des procédés de soudage à proprement parler des « codes multiphysiques » sont nécessaires ; on peut citer les outils dédiés DB-LASIM WProcess (sur la base de Cast3M [12]) ou bien l'outil généraliste COMSOL.

Cela donne une idée sur les perspectives des travaux à conduire par la communauté scientifique qui doit s'attaquer aux verrous scientifiques s'opposant encore à ces objectifs, tout en travaillant avec les ingénieurs pour intégrer ces nouveaux développements dans des plates-formes de formage virtuel à usage industriel. En effet, de plus en plus de modèles et de méthodes performants sont développés et « éprouvés » par les chercheurs mais restent, hélas, à l'état embryonnaire faute de moyens et d'intérêt pour les transférer dans des outils industriels performants et indispensables pour l'innovation technologique.

3.15.3. Les orientations scientifiques nécessaires en fonction des enjeux

Sur le plan de la modélisation avancée des procédés de fabrication et d'assemblage, il convient de :

- mettre plus de physique dans les modèles décrivant les évolutions des phénomènes dissipatifs en se basant soit sur des méthodes macroscopiques ou monoéchelle (approches inductives), soit sur des méthodes micro/méso/macro ou multiéchelles (approches déductives). L'objectif étant de mieux décrire les fortes hétérogénéités et anisotropies initiales et induites des matériaux en fonction de leur composition microstructurale ;
- s'orienter vers des schémas de modélisation qui dépassent le cadre de la mécanique des milieux continus matériellement simples (milieux de Cauchy) au profit des théories plus générales basées sur les milieux « discontinus » généralisés comme les milieux d'ordre supérieur (milieux micromorphiques), les milieux à gradients supérieurs ou les milieux non locaux. Les théories à

champs de phase permettent également de traiter élégamment les milieux fortement discontinus ;
- ces modélisations fines sont indispensables pour les matériaux déjà élaborés à partir de procédés métallurgiques préalables, mais sont également indispensables pour développer des structures fortement hétérogènes à architectures contrôlées comme les structures à base de matériaux composites ou des structures métalliques à base de déchets métalliques (copeaux…) recyclables. Ces structures sont directement obtenues à partir d'ingrédients appropriés pour lesquelles la simulation numérique est indispensable afin de les concevoir et les tester virtuellement avant de se lancer dans des investissements lourds de production.

Sur le plan des méthodes numériques, de nombreux points de blocage résistent encore et méritent un effort pour les résoudre :

- des formulations variationnelles pour des problèmes couplant un grand nombre de phénomènes physiques différents, ce qui rend complexe la nature mathématique du problème ;
- la discrétisation spatiale 3D par EF ou par méthodes sans maillage adaptatives en fonction des évolutions spatiales et temporelles des champs physiques sur des domaines à fortes variations géométriques. Les discrétisations spatiales par éléments finis compatibles avec la description CAO des pièces et outils impliqués dans le procédé sont très prometteuses car elles permettent une sorte de couplage entre la physique d'un problème et sa représentation CAO. Dans ce sens, les éléments isogéométriques connaissent actuellement un développement intense ;
- le traitement numérique des conditions de contact aux interfaces entre solides 3D sans négliger les modèles de frottement où des couplages forts entre des phénomènes mécaniques, thermiques, géométriques, métallurgiques et même chimiques sont souvent présents ;
- le développement de méthodes d'approximation nodales 3D des champs d'inconnues par EF ou par méthode sans maillage bien adaptées aux spécificités des équations de mouvement et aux inconnues nodales additionnelles ;
- les méthodes robustes de résolution des problèmes à grand nombre d'inconnues. Les techniques de décomposition de domaines, de parallélisation massive et de réduction de modèles sont sûrement d'un grand intérêt pour la résolution robuste et à moindre coût de ces problèmes.

La prise en compte du procédé de soudage dans la tenue en service des assemblages est maintenant bien admise. Les liens en aval avec d'autres disciplines comme la fatigue des assemblages soudés, le contrôle non destructif, la mécanique de l'endommagement et de la rupture sont à établir. Mais des liens en amont aussi sont à créer pour prendre en compte l'état résiduel avant soudage, par exemple l'usinage. Ainsi la maîtrise du procédé complet permettra une meilleure maîtrise des aléas, de limiter les mises au rebus et de réduire les matières premières utilisées.

Pour accroître la productivité, il est donc nécessaire de mieux comprendre les limitations dans la simulation des procédés et de les améliorer. Là où l'Homme de l'art a atteint ses limites, la modélisation directe (à partir des paramètres du soudeur), et *in extenso* du procédé de soudage, semble incontournable. Cette modélisation est bien souvent un problème couplé de type magnétohydrodynamique qui sort du seul cadre de la mécanique, mais qu'il est nécessaire d'entreprendre.

Outre les couplages multiphysiques forts évoqués ci-dessus qui sont coûteux et fastidieux à implémenter, des méthodologies complètes couplant plusieurs logiciels performants (couplage de codes) pour traiter des problèmes multiphysiques peuvent être d'une grande utilité industrielle. En effet, ces méthodologies à couplage faible peuvent permettre la résolution de problèmes multiphysiques à moindre coût et sont souvent préférées par les industriels aux méthodologies de couplage fort plus rigoureuses mais plus coûteuses.

3.15.4. Les verrous scientifiques et technologiques à lever

De nombreux verrous scientifiques et technologiques entravent encore les développements de la simulation numérique des procédés de fabrication ou fabrication virtuelle :

- détermination des valeurs des nombreux paramètres intervenant dans les équations de mouvement et dans les modèles de comportement volumiques (dans le volume de la matière) ou surfaciques (aux interfaces de contact). Plus ces modèles sont « multiphysiques », plus ils font intervenir un grand nombre de paramètres dont les valeurs sont à déterminer avec précision faute de diminuer leur potentiel prédictif. Ainsi, la caractérisation de propriétés mécaniques et thermophysiques, de surcroît à haute température, la caractérisation en condition de soudage ou de fabrication des matériaux sont des enjeux importants. De plus, le développement d'instrumentations fines multiphysiques multicapteurs synchrones des essais avec des mesures sans contact doit être intensifié pour permettre la validation de modèles de plus en plus gros et la prise en compte des incertitudes, à tous les niveaux de la modélisation, expérimentales, théoriques, numériques et même d'utilisation ;
- démocratisation des codes pouvant faire du calcul distribué et développement des méthodes de réduction des modèles pour pouvoir réaliser des calculs multiphysiques à très grand nombre de degrés de liberté et faciliter la validation et la vérification des codes développés ***via*** des plans d'expériences numériques ;
- méthodes hybrides couplant la MEF (avec éventuellement des éléments isogéométriques) avec des méthodes sans maillage adaptées. De nombreux verrous liés à l'intégration numérique, à la prise en compte des conditions aux limites et au raccordement entre les méthodes d'approximation sont encore actifs ;

- couplage des codes spécialisés pour réaliser des simulations à couplage faible ou chaînage de codes spécialisés afin de réaliser des chaînes complètes de calculs multiphysiques ;
- construction de plates-formes numériques complètes à utilisation industrielle conviviales, multiphysiques, permettant de simuler un procédé avec des modèles à fort pouvoir prédictif et de l'optimiser vis-à-vis de nombreux critères liés à la résistance mécanique de la pièce et des outillages, et au coût global en moyens et en impact sur l'environnement.

3.15.5. Les laboratoires concernés

CEMEF Mines ParisTech, LASMIS UTT, Roberval UTC, ENSAM ParisTech Paris, Metz et Angers, FEMTO-ST Besançon, GeM Nantes, LMT Cachan, CdM Mines ParisTech, LTDS/ENISE de Saint-Étienne, LPMM Metz, LaMCoS INSA Lyon, INPG, URCA Reims, TEMPO Valenciennes, LAMSID EDF/CNRS, LIMATB UBS, ENSTA Palaiseau, LMGC IUT Nîmes, IJL Nancy, I2M Bordeaux, CEA, CETIM.

3.15.6. Les enjeux industriels et sociétaux par domaines d'application

Pour les industriels, le premier enjeu est de pouvoir concevoir ou choisir l'outillage qui va permettre d'obtenir la pièce voulue, en limitant le nombre d'essais. Le second enjeu est de rechercher la durée de vie la plus longue possible de cet outillage et de la pièce en service.

Il faut aussi être conscient que chaque procédé implique des phénomènes particuliers que les logiciels doivent être capables de simuler, par exemple l'écoulement de la matière dans les moules de plasturgie afin de concevoir des canaux garantissant une répartition homogène de la matière, les replis fréquents dans le forgeage d'une pièce, la limite de formabilité d'un matériau afin d'éviter le déchirement de la matière emboutie…

Pour ce faire, il semble nécessaire de :

- doter les industriels de plates-formes numériques pour la simulation des procédés de fabrication pour produire vite et à moindre coût des composants mécaniques performants afin d'augmenter leur compétitivité en proposant, plus vite que la concurrence, des produits à forte valeur ajoutée ;
- disposer, sur ces plates-formes, d'outils et d'expertises spécifiques aux différents procédés de fabrication ou d'assemblage, voire spécialiser celles-ci par type de procédé ;
- mettre en place des procédés « propres » qui contribuent aux économies d'énergies et de ressources, et réduisent l'impact sur l'environnement en optimisant par la simulation numérique les procédés de fabrication pour obtenir des pièces légères et résistantes sans gâcher les énergies et les ressources naturelles ;

- dynamiser l'industrie française de la mise en forme pour accroître sa compétitivité face à la concurrence internationale et préserver ainsi le marché du travail ;
- renforcer le rayonnement international de la communauté française de la mise en forme par des développements scientifiques nouveaux, pour être actifs en la matière et non de simples suiveurs des développements des autres nations.

3.15.7. Les liens et concertations nécessaires avec les autres disciplines

- Science des matériaux :
  - o métallurgie physique ;
- mécanique des solides et des structures :
  - o milieux continus généralisés,
  - o thermodynamique physique,
  - o modélisation des structures mécaniques,
  - o la mécanique de l'endommagement et de la rupture,
  - o la fatigue des assemblages soudés ;
- mécanique des fluides ;
- physique des plasmas ;
- le génie logiciel ;
- la métrologie ;
- mathématiques :
  - o algèbre et analyse tensorielle,
  - o EDO et EDP ;
- mathématiques appliquées :
  - o méthodes numériques pour la résolution des EDP et EDO,
  - o algorithmie géométrique,
  - o optimisation multiobjectifs, minimisation, méthodes inverses,
  - o réduction de modèles, incertitudes ;
- CAO / CFAO.

3.15.8. La position française par rapport à l'international

La communauté française de formage virtuel, bien que relativement petite, est très active et très présente sur la scène internationale. Elle est très impliquée dans l'organisation de nombreuses conférences internationales dédiées aux procédés de fabrication et de mise forme en général, et à la simulation numérique de ces

procédés en particulier comme ESAFORM, NUMIFORM, NUMISHEET, IDDRG, ICTP, Metal Forming.

La communauté française est également très impliquée dans le journal lié à ESAFORM et intitulé *International Journal of Material Forming*, ISSN 1960-6206 (Elsevier), dont le poste de rédacteur en chef a été majoritairement assuré par un chercheur français.

Les chercheurs français dans le domaine de la modélisation et de la simulation numérique des procédés de fabrication et de mise en forme sont à l'origine de nombreux développements scientifiques majeurs dans le domaine : modèles de comportement avancés macro et micro/macro en transformations finies, méthodes numériques adaptées aux grandes déformations, maillage adaptatif des structures subissant de grands changements géométriques, développement de logiciels entiers dédiés à la simulation des procédés de mise en forme comme FORGE, PAM/STAMP, etc., ou de routine dans le cadre de plates-formes généralistes (ABAQUS, LS-DYNA, DEFORM…).

Malgré « le déclin » relatif de l'industrie française de transformation des matériaux ces dernières décennies, la collaboration entre les chercheurs et les industries de la mise en forme reste dynamique. Mais les développements les plus innovants ne sont pas suffisamment encouragés par la demande industrielle. Des efforts restent donc à faire dans ce domaine pour que les chercheurs français puissent obtenir le soutien financier nécessaire pour proposer de nouveaux développements scientifiques et technologiques indispensables à la création des outils de formage virtuel de demain.

Concernant le soudage : les principales équipes se situent en Allemagne, aux États-Unis au Japon, en Suède, mais la Chine et la Corée commencent à proposer des travaux concernant l'état de l'art. La France est à un très bon niveau mais accuse un léger retard sur la simulation 3D multi-physique du procédé et manque de publications marquantes à l'international. Elle peut profiter cependant de moyens expérimentaux de qualité, ainsi que d'un regain d'intérêt de l'industrie française pour la simulation numérique du soudage, notamment dans l'automobile, l'aéronautique et l'énergie.

3.15.9. Recommandations et perspectives

- Favoriser une véritable transversalité des recherches en renforçant les collaborations entre les communautés des sciences des matériaux, de mécanique des matériaux, de mécanique des solides et des structures, de mathématiques appliquées, de CAO/CFAO, etc., indispensable moteur à l'innovation scientifique et technologique.
- Chercher le bon équilibre entre développements scientifiques fondamentaux et développements applicatifs en favorisant le transfert des technologies innovantes au profit des industries de la mise en forme.
- Encourager la communauté industrielle de la mise en forme à utiliser des méthodologies innovantes de formage virtuel en mettant à sa disposition des plates-formes intégrant les derniers développements scientifiques.

- Donner les moyens humains et matériels aux chercheurs français pour qu'ils soient force de propositions innovantes dans le domaine de la simulation et de l'expérimentation.
- Entretenir et renforcer la présence de la communauté française sur la scène internationale par une participation accrue dans des comités et consortium européens et internationaux.

3.15.10. Bibliographie

[1] Wagoner R.H., Chenot J.L., *Metal Forming Analysis*, Cambridge University Press, Cambridge, 2001.
[2] Dixit P.M., Dixit U.S., *Modeling of Metal Forming and Machining Processes by Finite Element and Soft Computing Methods*, Springer-Verlag, London, 2008.
[3] Chinesta F., Cescotto S., Cueto E., Lorong P., *La méthode des éléments naturels en calcul des structures et simulation des procédés*, Hermes, Paris, 2009.
[4] Saanouni K., *Modélisation et simulation numériques en formage virtuel*, Hermes, Paris, 2012.
[5] Cerjak H. et al., Editors, *Mathematical Modelling of Weld Phenomena*, Verlag der technischen Universität Graz.
[6] Cockcroft S., Maijer D., *Modeling of Casting, Welding, and Advanced Solidification Processes*, John Wiley & Sons, 2009.
[7] Feng Z., *Processes and Mechanisms of Welding Residual Stress and Distortion, Woodhead Publishing in Materials*, CRC Press, 2005.
[8] Goldak J., Akhlaghi M., *Computational Welding Mechanics*, Springer, 2005.
[9] Lindgren L., Computational Welding Mechanics : Thermomechanical and Microstructural Simulations, Woodhead Publishing in Materials, Woodhead, 2007.
[10] Radaj D., *Heat Effects of Welding : Temperature Field, Residual Stress, Distortion*, Springer, 1992.
[11] Radaj D., *Welding Residual Stresses and Distortion : Calculation and Measurement*, English Edition, DVS-Verl., 2003.
[12] Cast3M, CEA, DM2S, http://www-cast3m.cea.fr/.

3.16. Calcul haute performance et intensif en mécanique des fluides

3.16.1. Descriptif de la thématique

En sciences de l'ingénieur, la mécanique des fluides et l'énergétique jouent un rôle particulier en raison de l'étendue de leurs domaines d'application et des couplages nécessaires avec les disciplines voisines. La représentation mathématique de ces phénomènes se fait via les équations de Navier-Stokes, qui régissent le comportement des milieux fluides et traduisent des principes élémentaires de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. La résolution

numérique de ces équations est difficile en raison de la non-linéarité des termes de transport convectif. Cette non-linéarité correspond au développement d'instabilités qui dégénèrent en agitation turbulente. Ces équations de Navier-Stokes sont des équations aux dérivées partielles dont l'existence systématique de solution régulière reste encore à démontrer. Ces équations figurent ainsi dans la liste des problèmes du Prix du millénaire publiée par l'Institut Clay de mathématiques (www.claymath.org). Faute d'approche analytique, la résolution des problèmes de mécanique des fluides ne peut s'appuyer que sur des simplifications des équations ou des approximations des solutions. Dans le premier cas, on négligera, par exemple, le rôle de la viscosité ou du transport convectif, mais les résultats porteront alors toujours sur des cas d'école éloignés de la réalité. Dans le second cas, on remplacera les équations de Navier-Stokes par des formes discrétisées pour lesquelles des solutions approchées seront obtenues. En fonction de la précision des discrétisations et de la qualité des méthodes d'approximation, les résultats s'approcheront au mieux d'une réalité par essence très complexe. C'est le calcul de ces solutions approchées qui fait appel aujourd'hui aux ressources de calcul intensif à haute performance.

Afin d'évaluer les besoins en puissance de calcul pour la résolution de ces équations, une première approche consiste à évaluer le nombre de points de calcul discrets nécessaires à la prise en compte de toutes les échelles caractéristiques d'un écoulement. Une analyse simplifiée permet d'évaluer le rapport entre les plus petites échelles (échelle de Kolmogorov) et les échelles les plus grandes (dimension du domaine fluide considéré). Ce rapport permet d'évaluer le nombre N^3 de points discrets dans un volume de calcul en fonction du nombre de Reynolds *Re* comme :

$$N^3 \sim Re^{\frac{9}{4}}.$$

Pour un nombre de Reynolds modéré, qui est encore loin de toute configuration d'intérêt industriel, 10^4 par exemple, il faudrait donc 10^7 points de calcul pour prendre en compte toutes les échelles caractéristiques. Pour les écoulements instationnaires, les temps caractéristiques sont liés à ces échelles en raison de la vitesse de propagation de l'information au sein du domaine de calcul. Si l'on introduit d'autres phénomènes physiques complémentaires à la dynamique du milieu fluide (combustion, écoulements multiphasiques, magnétohydrodynamique, rayonnement électromagnétique, acoustique, comportement hors équilibre thermodynamique, couplage multiphysique, etc.), il convient bien sûr de prendre en compte également les échelles spatiales et temporelles caractéristiques de ces phénomènes, qui peuvent amener des contraintes supplémentaires en termes de coût de calcul.

La résolution approchée de tout problème de mécanique des fluides d'intérêt pratique se heurtera donc a priori à des problèmes de volume de données à manipuler pour intégrer les équations de Navier-Stokes (éventuellement complétées par d'autres modèles physiques) et à des problèmes de temps de calcul pour représenter des phénomènes physiques significatifs.

Ces limitations théoriques sont surmontées par l'introduction de modélisations, qui consistent essentiellement à modifier la nature du fluide (par exemple en augmenter la viscosité) pour supprimer les plus petites échelles (simulations

instationnaires aux grandes échelles) ou atteindre directement le comportement moyen de l'écoulement (simulations stationnaires moyennées). Dans le premier cas, la viscosité additionnelle de la modélisation sera proportionnelle au nombre de Reynolds de la maille de calcul ; dans le second cas, au nombre de Reynolds de l'écoulement.

3.16.2. Un état de l'art s'appuyant sur des états de conjoncture ou avis récents

Pour surmonter ces difficultés, la première approche a été d'appliquer des traitements statistiques aux équations, pour ne représenter les variables que sous formes moyennées, ainsi que leur taux de fluctuation. En fonction de la taille du filtre imposé, on obtient des représentations des écoulements gommant tout ou partie des fluctuations. Ces filtres peuvent être strictement statistiques (fermeture en un point) ou être en lien avec la discrétisation (simulation des grandes structures et modélisation de sous-mailles). La puissance des ordinateurs croissant continûment, il est maintenant envisageable de s'affranchir de ces différents filtres pour effectuer des simulations directes, quoique l'on soit encore limité à des nombres de Reynolds modérés.

Si l'on examine les évolutions parallèles de ces trois approches, les premières solutions des équations de Navier-Stokes datent des années 1970, avec des modèles de fermeture algébrique en un point pour des écoulements réels. Les méthodes étaient peu précises (ordre deux seulement en temps et en espace) et les modèles très grossiers. Néanmoins, ces outils ont permis les premiers calculs d'écoulements complexes comme des interactions d'ondes de choc et de couches limites turbulentes. Ensuite, les modèles de turbulence se sont complexifiés et ont inclus des équations de transport supplémentaires pour décrire les variances des valeurs moyennes (énergie cinétique de turbulence, tenseur des contraintes de Reynolds, etc.).

En même temps se développaient les premières résolutions numériques des équations de Navier-Stokes via des méthodes spectrales de précision plus élevée, mais limitées à des boîtes de turbulence homogène (permettant des conditions aux limites périodiques). Les nombres de points de discrétisation pour couvrir ces boîtes de turbulence sont passés de 32^3 à 64^3, puis 128^3, 512^3, etc., et ont continué à grossir, au fur et à mesure que les capacités des ordinateurs le permettaient (actuellement $6\,000^3$). Cette croissance a bien sûr permis d'examiner des turbulences à nombres de Reynolds de plus en plus élevés. En s'affranchissant des limites géométriques des méthodes spectrales, grâce à des discrétisations temporelles et spatiales d'ordres plus élevés (jusqu'à l'ordre 10 en espace), il a été possible d'ouvrir le champ des simulations directes des écoulements turbulents à des géométries d'intérêt pratique. Il en a été de même pour les méthodes de simulation des grandes échelles qui ont vu se réduire la gamme d'échelles où les modèles de sous-mailles étaient nécessaires.

Dans les années 1970, les maillages étaient construits à partir de dizaines de milliers de points de grille ou cellules de discrétisation. Aujourd'hui, les simulations les plus avancées reposent sur des maillages intégrant jusqu'à plusieurs dizaines de milliards de cellules en utilisant plusieurs centaines de milliers de processeurs,

avec des maillages non structurés plus aptes à prendre en compte les géométries réelles des systèmes industriels. Dans ce contexte, les équipes de recherche les plus avancées réalisent aussi du couplage de codes, pour traiter le caractère multiphysique des écoulements, chaque code faisant appel à un parallélisme optimisé.

L'adoption de ces méthodes avancées n'a pas suivi le même rythme dans l'industrie et dans la recherche. Le décalage reste chronique pour de nombreuses raisons :

- avancées en recherche d'un côté (validation de modèles et calculs de démonstration) ; contraintes de disposer d'outils de production (développement) ;
- accès à des machines de calcul suffisamment puissantes ;
- part relative du pré-/post-traitement des données et de la validation des schémas et modèles pour atteindre un niveau de certification permettant une bonne maîtrise de l'incertitude de la prévision numérique ;
- etc.

Suivant la filière RANS[3], les modèles statistiques avancés ont été implantés dans les laboratoires jusqu'au niveau des fermetures à l'ordre 2, à la fois pour les variables dynamiques (vitesse, masse volumique, température) et pour les modèles physiques associés (combustion, milieux hors équilibre, diphasique, etc.), alors que les environnements industriels vont très rarement au-delà des modèles à base de viscosité turbulente ($k - \varepsilon$, $k - \omega$, etc.), disponibles dans des logiciels commerciaux (FLUENT, STAR-CD, NUMECA, etc.) ou libres (OpenFOAM, Code_Saturne, etc.). À de rares exceptions près (en particulier dans l'aéronautique sous l'impulsion de l'ONERA et du CERFACS), le monde industriel n'a pas adopté massivement les programmes de résolution des équations de Navier-Stokes issus des laboratoires de recherche.

En pratique, les ingénieurs des centres de R&D utilisent essentiellement des petits calculateurs, voire leur ordinateur de bureau, pour réaliser des simulations, avec un temps de retour accepté de l'ordre de la journée. Ce qui, dans le meilleur des cas, permet d'atteindre des maillages de l'ordre de quelques dizaines de millions de cellules. Donc très en deçà vis-à-vis de ce qu'il est possible de réaliser dans les laboratoires de recherche avec les calculateurs du GENCI[4]. Cela étant, la simulation numérique en mécanique des fluides est aujourd'hui systématiquement présente dans les chaînes de conception des grands groupes industriels (aéronautique, automobile, industries de transformations et chimiques). Elle a permis de diminuer les coûts de conception et d'optimisation en apportant une visualisation qualitative et parfois quantitative des écoulements.

Du côté des méthodes de simulation directe, la balle est encore essentiellement dans les mains des laboratoires de recherche, qui collaborent bien sûr avec les grands partenaires industriels (aéronautique, automobile, énergie, thermohydraulique, génie des procédés, etc.). Il est maintenant possible de calculer des configurations pratiques (chambre de combustion aéronautique ou écoulement autour d'un profil d'aile d'avion civil, par exemple) par simulation directe, mais

[3] RANS : Reynolds Averaged Navier-Stokes equations.
[4] GENCI : Grand Équipement national de calcul intensif.

cela n'a pas encore atteint un stade de maturité permettant à un industriel d'en faire un outil d'études paramétriques. Toutefois, des méthodes de simulation instationnaires comme la simulation des grandes échelles sont aujourd'hui des outils permettant des simulations sur des engins à échelle 1 avec une fidélité géométrique et physique (couplages multiphysiques), qui sont utilisées en conception, par exemple dans le secteur du transport terrestre.

Néanmoins, l'utilisation du calcul intensif pour la mécanique des fluides ne se limite bien évidemment pas à ces seules disciplines que l'on peut qualifier d'ingénierie. L'environnement, en ce qui concerne les efforts de modélisation du changement climatique, est un sujet prioritaire, qui regroupe une communauté scientifique bien structurée autour de la modélisation de l'atmosphère et de l'océan et, bien sûr, la prise en compte des phénomènes couplés pour l'étude globale du climat. Les équations de Navier-Stokes sont complétées avec les modèles physiques propres comme le rayonnement, le diphasique et les aérosols, la chimie atmosphérique, etc.

La résolution des équations se fait au sein de la communauté suivant un mode participatif via des chaînes de traitement très complexes qui sont intrinsèquement liées à l'architecture des ordinateurs. Pendant de nombreuses années, les programmes de résolution, optimisés pour des ordinateurs vectoriels, ont eu beaucoup de mal à s'adapter à des machines massivement parallèles et la rigidité de ces chaînes de traitement rendait même difficile la migration d'une architecture informatique à une autre.

Pour compléter la situation de la modélisation du climat, le couplage entre océan et atmosphère est indispensable, alors que les échelles caractéristiques (espace, temps, chimie) sont complètement différentes. Ce couplage, qui doit marier des chaînes de traitement complexes et autonomes, se fait via des outils dédiés comme par exemple OASIS au CERFACS. Il est alors possible de coupler la dynamique des océans (NEMO) avec celle de l'atmosphère (UM, LMDZ). Ces activités représentent par ailleurs le socle de la contribution française aux travaux du GIEC.

De plus, la modélisation de l'atmosphère nécessite une forte synergie entre les outils de simulation et l'observation in situ. Grâce à des mécanismes d'assimilation des données, les outils de simulation prennent en compte, au cours de leur exécution, les données de terrain issues des observations météorologiques. Ce mode de fonctionnement est caractéristique des applications météorologiques, mais il a également inspiré l'ingénierie en envisageant une interaction en temps réel entre outils de simulation et opérateur. L'exécution des travaux ne se fait alors plus seulement en mode différé (*batch*), mais en interactif.

Un autre aspect, qui différencie également le contexte industriel du travail de recherche, porte sur les outils de pré- et post-traitement. Dans un environnement industriel, le calcul de mécanique des fluides ne se suffit pas à lui-même, mais doit être intégré dans un outil global de simulation, qui inclut d'une part la préparation intelligente des géométries et des conditions d'écoulement (on parle alors de maquette numérique), et d'autre part des outils interactifs d'analyse des résultats. L'ordinateur doit être considéré comme une soufflerie numérique, donnant accès à des informations qui n'auraient pas pu être mesurées expérimentalement sur un objet réel. La réalité virtuelle va alors bien au-delà d'une simple représentation géométrique pour faire place à une réalité complètement simulée par les modèles

numériques. Les phénomènes multiphysiques deviennent de plus en plus importants, comme par exemple les couplages fluides/structures, l'aérothermique et l'aéroélasticité, les écoulements sanguins, le comportement des plasmas, etc.

3.16.3. Les orientations nécessaires en fonction des enjeux

Un certain nombre d'orientations sont nécessaires pour faire progresser les connaissances que l'on peut avoir des phénomènes propres à la mécanique des fluides et à leurs applications. En premier lieu, il est nécessaire de raffiner les modèles de la physique qui sont encore trop approximatifs pour des phénomènes complexes. La turbulence est, et restera encore longtemps, une difficulté majeure pour la mécanique des fluides. Les modèles de turbulence, développés concomitamment aux méthodes numériques depuis les années 1960, ont fait leurs preuves mais ont aussi montré leurs limites intrinsèques. Une bonne partie d'entre eux a été intégrée dans les outils de production du secteur industriel, en acceptant ces limites. Les progrès les plus significatifs qui ont été obtenus durant les dix dernières années ont porté sur l'amélioration des schémas de discrétisation numérique et la possibilité de traiter des domaines de calcul avec une résolution toujours améliorée. Ces avancées n'ont de sens que si elles permettent d'améliorer la compréhension réelle des phénomènes physiques, plutôt que de seulement démontrer une capacité à représenter mieux une physique complexe.

Il est également impératif de s'orienter vers l'étude des phénomènes physiques complexes qui s'appuient simultanément sur plusieurs champs disciplinaires. Les milieux fluides réactifs sont une illustration immédiate de ce caractère multiphysique, mais la complexité est partout. La modélisation des fluides biologiques (circulation sanguine dans le corps humain, système respiratoire, etc.) fait appel à de la mécanique des fluides et des solides, de la biochimie, de la thermodynamique, de la biologie et sans doute d'autres disciplines. La compréhension des multiples interactions et la capacité de les simuler numériquement représentent un défi majeur pour la santé humaine.

L'autre domaine qui a été évoqué a trait à l'environnement et au climat. Il peut être abordé sous son aspect le plus global (modélisation du changement climatique) ou sous un angle beaucoup plus local, comme par exemple pour représenter la dispersion de polluants à l'échelle d'une région ou d'une agglomération. Les récents épisodes de pics de pollution ont démontré les lacunes actuelles pour les prévoir à l'avance et permettre ainsi des contre-mesures par anticipation.

Au niveau des modélisations du climat, les attentes portent d'une part sur la puissance des ordinateurs, qui permettent la réalisation dans des temps raisonnables de calcul couplés à une précision suffisante. Il est sûr qu'aujourd'hui, la puissance informatique (taille et rapidité) est encore en deçà des besoins de modélisations sur des temps significatifs à l'échelle du climat. Néanmoins, les modèles physiques ont sans cesse besoin de progresser sur des mécanismes aussi complexes que la chimie atmosphérique, la prise en compte des aérosols, les comportements des gaz dans la haute atmosphère ou les mécanismes de transfert des gaz à effet de serre.

3.16.4. Les verrous scientifiques et technologiques à lever

Il reste aujourd'hui encore de nombreux verrous à lever pour aboutir à la résolution de l'ensemble des problèmes de la mécanique des fluides au sein d'un environnement beaucoup plus large que cette seule discipline. Néanmoins, avant d'en faire une liste qui ne saurait être exhaustive, il convient de replacer ces problèmes dans leur contexte :

- la connaissance (compréhension de la physique et développement des modèles mathématiques qui la représentent) des lois de comportement ;
- la résolution des équations représentant ces modèles. À ce niveau, la validation se fait par comparaison *a posteriori* avec des situations réelles pour lesquelles les valeurs expérimentales ont été mesurées (mais on peut aussi s'interroger sur la fiabilité des mesures !) ;
- au-delà de cette vérification *ex post*, il est envisageable d'appliquer ces modèles à des situations inconnues (ou inaccessibles à la vérification expérimentale), à des fins prédictives, comme par exemple l'astrophysique pour la connaissance de l'Univers ou le comportement des plasmas dans un tokamak (comme nouvelle source d'énergie) ;
- un autre champ de prédiction concerne des géométries ou des conditions d'écoulement à explorer. Ce peut être par exemple l'aérodynamique d'un véhicule, les performances d'un échangeur thermique ou les écoulements sanguins dans le corps humain ;
- on peut également utiliser ces modèles pour la prévision. Ce sera par exemple le cas des problèmes de météorologie et de climatologie, qui sont essentiellement des suites temporelles.

La résolution des problèmes de mécanique des fluides s'appuie donc sur la connaissance de modèles physiques éprouvés, couplés à des méthodes de calcul précises et robustes, utilisant des ordinateurs à très haute performance.

Ces conditions étant réunies, il est possible d'accéder à la connaissance d'écoulements complexes, tant par leur géométrie que par leurs conditions physiques. Il est également possible d'entrevoir le futur, sous réserve de bien appréhender les composantes déterministes et chaotiques du comportement des fluides, soumis aux non-linéarités (turbulence).

Les progrès effectués durant les cinquante dernières années sont considérables, en particulier grâce à l'évolution des technologies, mais sont encore loin d'être suffisants. Les principaux verrous scientifiques et technologiques relèvent encore aujourd'hui de la faiblesse des modèles, du manque d'intégration dans des chaînes complètes de réalité virtuelle et des limites des moyens informatiques (puissance, disponibilité).

3.16.4.1. Modèles multiphysiques

Au niveau des modèles, quelques briques de base sont maintenant bien éprouvées (les équations de Navier-Stokes, la turbulence à grande échelle, le couplage

fluide/structure en faibles déformations, la combustion et la propagation de flammes, l'aéroacoustique, etc.). Le principal défi pour l'avenir reste néanmoins les problèmes multiphysiques. Certains sont déjà correctement maîtrisés, mais la majorité d'entre eux restent au cœur des activités de recherche et impliquent une très forte dimension d'interdisciplinarité. La prise en compte de la chimie atmosphérique, avec le multiphasique, le rayonnement et les couplages océan/atmosphère ou terre/atmosphère, voire glace/atmosphère, représentent un grand défi pour la climatologie. Les situations physiques sont tellement complexes (d'autant plus qu'elles dépendent aussi des activités humaines) qu'il n'est pas possible d'obtenir une simulation raisonnable du futur. On travaille plutôt sur des scénarios plausibles de l'évolution du climat, via des études que l'on peut qualifier de paramétriques. Ce n'est alors qu'en explorant ces espaces paramétriques que l'on peut compenser le faible déterminisme des problèmes.

Il en va de même pour les activités en mécanique des fluides dans l'ingénierie, où on compense la faiblesse des modèles multiphysiques par un recours systématique aux explorations paramétriques, avec l'ambition d'en faire ainsi une méthode d'optimisation.

Sur les aspects plus « physiques », beaucoup de progrès restent à faire également dans le domaine des fluides biologiques. La circulation sanguine n'est pas seulement un problème de mécanique des fluides, mais doit prendre en compte la dimension chimique et biologique du sang, la complexité rhéologique, les phénomènes de changement de phase, les problèmes d'interface et porosité, et le comportement adaptatif déformable des circuits sanguins (artères, veines, vaisseaux, etc.). Il est clair que la circulation sanguine ne regroupe pas toute la complexité de la mécanique des fluides pour la santé humaine. Ainsi les flux respiratoires présentent sans doute également un certain nombre d'analogies au niveau des verrous à lever.

Un autre champ disciplinaire voisin est celui des plasmas. Voisin car même s'il est plus directement régi par les équations de Maxwell et Vlasov, il concerne néanmoins le comportement des fluides hors équilibre. Les résultats expérimentaux qui ont pu être obtenus (JET, TORE-SUPRA) ne permettent pas de caler suffisamment les modèles physiques nécessaires à la construction du réacteur ITER, par exemple, et la simulation numérique reste le principal outil contribuant à la phase de conception du futur réacteur (IFERC).

3.16.4.2. Intégration des modèles dans des outils de réalité virtuelle

Un autre défi a trait à l'intégration des programmes de résolution des équations de la physique dans des chaînes de traitement numérique intégrées et disposant d'interfaces Homme/machine suffisamment performantes pour permettre l'analyse fine et la compréhension des résultats de modélisation.

L'industrie aéronautique a été précurseur dans le développement de « maquettes numériques » par analogie avec les études expérimentales. En particulier, Dassault Systèmes a été le premier à intégrer complètement cette maquette numérique dans son processus de conception pour les avions Falcon-7x et Rafale. Cette approche s'est bien sûr généralisée et on trouve des ateliers de conception collaborative (et distribuée) dans tous les grands secteurs des industries manufacturières.

Il en va autrement dans les laboratoires de recherche, pour lesquels les différentes phases de l'activité de modélisation restent segmentées. Il s'agit d'une part de la partie préparatoire, qui consiste essentiellement à générer les maillages (informations géométriques) et préparer les champs de valeurs initiales (ou de reprise) pour les écoulements. Dès cette étape, une prise en compte explicite de l'architecture de la machine de calcul est nécessaire pour l'optimisation des ressources (parallélisation). C'est également dès cette étape que les interfaces de couplage peuvent devoir être explicitées, pour les problèmes multimatériaux par exemple. De même, certains problèmes multiphysiques peuvent s'appuyer sur des machines d'architectures différentes et les mécanismes de communication doivent également être définis a priori (par exemple, une cinétique chimique traitée par Monte Carlo sur des machines à parallélisme fin, avec une dynamique sur des machines à parallélisme plus grossier).

Ensuite, vient la phase de simulation proprement dite, qui fait appel au cœur des ressources du calcul à haute performance (nombre d'heures/processeurs, nombre de processeurs, etc.).

Les résultats sont alors enregistrés à la fin du calcul (ou durant son déroulement pour les calculs instationnaires).

La visualisation et l'analyse des résultats se fait ensuite à partir de ces fichiers de résultats, au travers de programmes graphiques dédiés, tournant sur des machines spécialisées et optimisées pour la représentation visuelle des données.

Néanmoins, cette étape d'analyse souffre encore d'être réalisée avec des technologies « rudimentaires ». Alors que les environnements immersifs « CAVE™ » de réalité virtuelle ont vu le jour dans les années 1990, ils n'ont pas été déployés dans la recherche publique, à l'exception peut-être de quelques rares laboratoires (plus proches de l'informatique que de la mécanique). L'interface physique pour l'analyse des données n'a pas dépassé aujourd'hui l'écran d'ordinateur, avec des outils manuels d'exploration (rotation, translation, zoom, couleurs) mis à la disposition de l'utilisateur de logiciels graphiques du commerce (ParaView, Visit, Mayavi, AVS, etc.).

Pour les simulations instationnaires à haute résolution, la production d'animations est devenue un exercice très fastidieux et souvent irréalisable en raison des énormes volumes de stockage requis si elle s'effectue en phase de post-traitement dans tout le domaine de calcul. Ce point est un frein pour la compréhension de mécanismes physiques, qui réclame inévitablement une analyse spatio-temporelle. Pour surmonter cette difficulté, il serait très avantageux de réaliser les animations à la volée pendant le déroulement de la simulation. Une telle stratégie nécessite un couplage entre le code de simulation et le logiciel de visualisation. Dans le contexte exigeant du calcul massivement parallèle, un important effort dans cette direction reste à produire afin de mieux valoriser les plus grosses simulations.

Il manque à ce jour une gestion collective des géométries (maillages), qui dispenserait le chercheur de ce travail assez lourd de génération de maillage. Disposer de telles bases de données serait certainement un bénéfice au niveau de l'exploitation et de l'analyse, et permettrait une plus grande mutualisation des outils de post-traitement.

Les freins à cette mise en commun dans les laboratoires de recherche publique tiennent bien sûr à la spécificité des travaux de chaque laboratoire, voire de chaque chercheur…

Force est néanmoins de constater que malgré les nombres vertigineux d'heures de calcul passées à simuler des écoulements turbulents (même dans des géométries académiques simples), il n'existe pas de dépôt (« *repository* ») pour mettre les résultats à la disposition des chercheurs (pour valider des modèles physiques par exemple). À un moment où tant de discussions ont lieu au sein de la communauté scientifique sur les « *Big Data* », l'« *Open Access* » et l'interopérabilité des données, on peut avoir le sentiment que la recherche publique est soumise au même niveau de protection des données que l'industrie, ce qui n'est certainement pas représentatif de la réalité.

Il ne fait guère de doute aujourd'hui, que ce soit pour l'immersion 3D ou le travail collaboratif, que les environnements industriels sont bien plus avancés que les ressources des laboratoires de recherche publique.

3.16.4.3. Puissance de calcul

Malgré les progrès considérables effectués depuis le début de la résolution numérique des problèmes de mécanique des fluides, la puissance de calcul reste une condition essentielle pour le succès d'une simulation exploratoire. Les avancées successives depuis le mégaflops[5] jusqu'au pétaflops[6] (l'exaflops[7] est annoncé à l'horizon 2018) ont été capitales pour l'amélioration des prévisions s'appuyant sur la mécanique des fluides numérique à travers la capacité à prendre en compte un nombre de degrés de liberté toujours plus élevé.

La connaissance et la compréhension de la physique ont évidemment énormément progressé, tout particulièrement à partir du moment où la simulation numérique directe de la turbulence a commencé à se substituer à la résolution des formes statistiques des équations. On peut admettre que la simulation numérique a atteint une phase de stabilité et de reconnaissance, propice à un approfondissement des connaissances sur des points ciblés. Néanmoins, il subsiste des limites au possible d'aujourd'hui. Les longues séries temporelles, surtout si elles doivent être complétées par des études paramétriques (climatologie), restent excessivement tributaires des contingences de puissance informatiques. De même, en ingénierie, les plus fines échelles de la turbulence (Kolmogorov) sont encore hors de portée pour la simulation directe d'écoulements d'intérêt pratique (à grand et très grand nombres de Reynolds).

De même que pour l'intégration dans des chaînes de réalité virtuelle, des progrès sont encore espérés pour la puissance des ordinateurs, afin de permettre le traitement d'un plus grand nombre de problèmes d'intérêt pratique.

[5] 1 mégaflops = 1 million d'opérations en virgule flottante par seconde.
[6] 1 pétaflops = 1 milliard de mégaflops.
[7] 1 exaflops = 1 000 pétaflops.

3.16.5. Les laboratoires concernés

Parmi les laboratoires concernés par le calcul scientifique en mécanique des fluides, il y a ceux qui appartiennent aux grands organismes de recherche comme le CNRS, l'INRIA et le CEA, mais aussi ceux comme Météo-France, l'ONERA ou le CERFACS. Ces laboratoires sont répartis un peu partout en France (Paris, Rouen, Toulouse, Poitiers, Nantes, Nice, Grenoble, Lyon, Lille, Strasbourg, Bordeaux, Marseille, Montpellier, Orléans, Perpignan, etc.). Leurs domaines de compétences couvrent un large spectre d'applications académiques et industrielles allant du transport aéronautique et spatial jusqu'à l'automobile, en passant par l'énergie (nucléaire, éolienne ou solaire) et l'environnement.

Ces laboratoires font de plus en plus appel aux moyens de calcul nationaux (GENCI), européens (PRACE) ou régionaux (mésocentres).

3.16.6. Les enjeux industriels et sociétaux par domaines d'application

L'effort principal pour pousser à l'obtention de solutions des équations de la mécanique des fluides a été principalement motivé par le développement industriel à partir des années 1970 (transports, aéronautique, énergie, etc.). Sans considérer que toutes ces finalités ont été traitées, on peut néanmoins admettre que d'énormes progrès ont été faits dans ces différents secteurs industriels, en partie grâce à l'avancée des connaissances en mécanique des fluides et en informatique.

Néanmoins, ces progrès ont été générateurs de nouveaux problèmes, en particulier au niveau environnemental, auxquels il convient de faire face aujourd'hui. Par ailleurs, la performance et l'adaptabilité des outils développés pour la résolution des problèmes de mécanique des fluides permettent également de s'intéresser à des problèmes inaccessibles précédemment, notamment dans le domaine des sciences de la vie.

On peut ainsi regrouper les enjeux et défis industriels et sociétaux en cinq thématiques (par ordre alphabétique) :

- **énergie** : la thermohydraulique des réacteurs dans les centrales électriques a atteint aujourd'hui un bon niveau de maturité. Il reste néanmoins de gros progrès à faire pour la sécurisation des dispositifs (fonctionnement des échangeurs par exemple) en situations accidentelles. Dans un domaine voisin, la modélisation des plasmas (tokamak) doit encore faire d'énormes progrès, en accompagnement du développement de la fusion nucléaire comme future source potentielle d'énergie ;
- **environnement** : le développement économique a un impact direct sur l'environnement et les implications de la mécanique des fluides se retrouvent à différents niveaux : prédictions météorologiques, modélisation des accidents de pollution, évolution globale du climat (via le GIEC par exemple), cycles du carbone, etc. Pour tous ces sujets, les outils de simulation ont un rôle capital à jouer, à la fois pour améliorer les connaissances et élaborer

des scénarios prédictifs qui sont indispensables à l'élaboration des politiques publiques ;

- **ingénierie** : la mécanique des fluides est au cœur des défis de très nombreux secteurs de l'ingénierie (génie des procédés, industrie agroalimentaire) et l'amélioration des outils de production est nécessaire à la fois dans une optique de croissance de la demande et d'une meilleure intégration des produits dans la société (efficacité, sûreté de fonctionnement, coûts) ;
- **santé et sciences de la vie** : la capacité des outils de simulation à grande échelle à s'adapter aux problématiques de santé est une opportunité à ne pas manquer. D'une part, une meilleure compréhension des circulations fluides dans le corps humain permet à la fois de mieux comprendre et prévenir les maladies cardio-vasculaires tout comme les accidents cérébraux. Par ailleurs, il est possible également de développer des palliatifs à des affections ou déficiences du corps. Le cœur artificiel de la société Carmat en est une bonne illustration ;
- **transport** : il reste encore beaucoup de chemin à parcourir pour réduire l'impact environnemental du transport. Cela passe d'une part par la maîtrise de la dépense énergétique des véhicules (le moteur qui consomme 2 L/100 km est l'une des 34 priorités affichées du gouvernement), mais aussi par une réduction de la production des polluants, ou encore la réduction de l'impact sonore. La sécurité des transports aériens est également un enjeu majeur dans la perspective de la densification des mouvements d'avion à proximité des places portuaires. Dans une vision plus globale, la propulsion spatiale s'appuie bien sûr sur les progrès de la mécanique des fluides, y compris dans les futures évolutions des lanceurs à propulsion solide (Ariane 6) ou des organes de propulsion des satellites.

3.16.7. Les liens et concertations nécessaires avec les autres disciplines

De très nombreuses disciplines sont concernées par les défis/enjeux de la mécanique des fluides. Parmi les plus significatives, il faut bien sûr citer les sciences de la vie, l'environnement, le génie des procédés, l'énergie et la physique. Ces concertations sont indispensables d'une part pour l'élaboration des modèles physiques connexes (multiphysiques et multimatériaux), et d'autre part pour la résolution des problèmes complexes pour lesquels une démarche strictement monodisciplinaire est vouée à l'échec.

Tous les progrès attendus d'une meilleure compréhension de la mécanique des fluides et de la capacité à simuler sont à la croisée de disciplines scientifiques. Ils exigent une ambition forte d'interdisciplinarité, mais également un partage des informations et données scientifiques qui sont aujourd'hui au cœur des problématiques globales débattues dans le cadre de l'innovation ou des datamasses (« *Big Data* »).

3.16.8. La position française par rapport à l'international

L'activité du calcul scientifique dans les laboratoires de recherche français a connu un développement important ces cinq dernières années. Ainsi, de nombreux laboratoires se sont dotés de moyens (matériels et humains) pour accompagner l'émergence de cette thématique et faire face à la demande croissante de projets numériques, aussi bien sur le plan académique qu'industriel. Cela est visible sur plusieurs plans : i) renforcement de la stratégie scientifique des laboratoires vis-à-vis du numérique, par une volonté de mettre en avant les projets de simulation, considérés comme « innovants », lors des évaluations AERES (HCERES) ou à travers des actions internationales ou européennes ; ii) contributions de plus en plus importantes des projets numériques dans les différentes demandes de financement (CPER, ANR, chaires, projets industriels et contrats européens – il n'y a aujourd'hui pratiquement aucun projet en mécanique des fluides qui n'inclut pas un aspect numérique !). Cela a pour conséquence de faire exploser les demandes d'heures de calculs sur les centres nationaux et européens.

Un autre indicateur plus factuel est celui lié à la valorisation scientifique ; le nombre de publications des laboratoires français dans les journaux de mécanique des fluides numérique a considérablement augmenté ces dernières années. La France est bien visible dans ce domaine, comme en témoigne les nombreuses publications apparues dans des journaux comme : *Journal of Computational Physics*, *Journal of Scientific Computing*, *Computer and Fluids*, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, pour ne citer que les journaux spécifiques au calcul scientifique.

Sur le plan national, la communauté « calcul » s'est organisée autour d'actions concrètes, comme par exemple la création d'un GDR CNRS (3275) pour les aspects scientifiques du calcul (mathématique et informatique), la **création d'un réseau technologique soutenu par la MRCT (Mission ressources et compétences technologiques) pour les aspects technologiques (programmation, optimisation, architectures, etc.).** Également, l'émergence de la communauté du calcul intensif numérique s'est illustrée au travers de la Maison de la simulation créée par le CNRS et le CEA. D'autres projets de valorisation de l'activité de développement au sein des laboratoires de recherche ont vu le jour, comme le projet Plume/Relier.

Par ailleurs, la création de forums de discussions et d'échanges de savoir-faire et de pratiques numériques (comme la liste calcul calcul@listes.math.cnrs.fr) a permis de favoriser l'émergence d'une « vraie » vie de communauté de calcul scientifique en France.

L'ANR s'est aussi fortement mobilisée sur les aspects numériques à travers, notamment, les appels à projets thématiques comme l'ANR MN (Modèle numérique).

Sur le plan des grosses infrastructures HPC, la France (pour ne citer que le CEA, l'IDRIS et le CINES) a gagné en visibilité ces dernières années dans le classement top 500 des machines les plus puissantes, en passant (en moyenne) du 77^{e} rang en 2005 au 20^{e} rang en 2013.

3.16.9. Recommandations et perspectives

La mécanique des fluides a profité à nombre de progrès accomplis en informatique et en réseau. De nombreuses avancées ont ainsi été possibles pour accroître les connaissances et améliorer la capacité à représenter et prédire les phénomènes.

De grandes disparités subsistent néanmoins entre recherche publique et applications finalisées. Les moyens de calcul les plus puissants sont aujourd'hui accessibles à la recherche publique (en particulier via le GENCI, mais également via les mésocentres supportés aussi par les collectivités locales). Néanmoins, les outils de pré- et post-traitement des résultats de simulation sont essentiellement cantonnés à des interfaces Homme/machine simples (écran d'ordinateur).

À l'inverse, les environnements industriels ont beaucoup investi sur l'intégration des outils de simulation dans des chaînes complètes de traitement (réalité virtuelle, systèmes immersifs, etc.)

Il serait souhaitable de rééquilibrer cette répartition des ressources à la disposition des acteurs.

Les architectures informatiques toujours en évolution nécessitent un effort permanent d'adaptation des codes de simulation avec une tendance à l'hyperspécialisation pour assurer une bonne optimisation. Les développements à mener sont devenus tellement pointus qu'ils ne sont plus envisageables autrement que dans le cadre d'une approche pluridisciplinaire physique/informatique. La haute technicité de la pratique du calcul haute performance impose le développement des métiers de soutien à la recherche en simulation numérique, pour qu'elle puisse rester compétitive en France tout en se fédérant mieux autour d'outils de calcul partagés.

La croissance très rapide des moyens informatiques a permis à la recherche publique de profiter des outils de simulation les plus performants, grâce à une politique volontariste du gouvernement et de l'Union Européenne pour le calcul à haute performance. Cela n'empêche pas que la compétition au niveau mondial soit rude. Les premières entrées du classement mondial des machines HPC sont occupées par des systèmes chinois et américains, et le premier système français est celui d'un industriel. L'effort fait via GENCI ne doit donc pas faiblir pour maintenir la communauté à même de faire face à la compétition mondiale.

Sur le plan de la formation par la recherche, il est important d'adapter les cursus universitaires à des parcours plus spécialisés en modélisation et en calcul scientifique, permettant de former les futurs ingénieurs en science de la simulation.

Les problèmes environnementaux et de santé humaine sont au cœur des enjeux sociétaux. La mécanique des fluides peut/doit contribuer à l'amélioration des connaissances, la maîtrise des risques et la prospective, qui sont à la base de l'élaboration des politiques publiques. Dans le domaine de la santé, la résolution des problèmes complexes et pluridisciplinaires peut contribuer à une médecine préventive et curative efficace, tant au niveau de la biologie que de la médecine. Dans le domaine de l'environnement, la capacité de simulation en temps réel est un outil nécessaire à la gestion de crise (accidents industriels par exemple) ou la prévention des conséquences sur la santé (seuil d'alerte de la pollution).

3.17. Mécatronique

3.17.1. Descriptif de la thématique

Le domaine de la mécatronique, qui a émergé dans les années 1970, consiste en l'intégration synergique de domaines de l'ingénierie distincts que sont l'ingénierie mécanique, l'ingénierie électrique et électronique, et l'ingénierie informatique et ce, dans toutes les phases de conception des systèmes. Une multitude de définitions et de représentations de la mécatronique montre la variété des approches. Elles représentent différents points de vue faisant apparaître aussi bien des interactions physiques que logicielles avec des niveaux de détail variables allant de la couche physique des systèmes jusqu'aux couches supérieures de conception.

En effet, la mécatronique n'est pas seulement la combinaison de différentes disciplines mais aussi la mise en place d'une véritable méthodologie de conception associée. Les spécificités des systèmes mécatroniques impliquent donc un besoin de nouveaux développements.

1) Les systèmes mécatroniques étant multidomaines, différents outils, langages et méthodologies de conception sont utilisés et sont généralement incompatibles : ils ne peuvent pas échanger automatiquement de données, ce qui interrompt la chaîne de conception et appauvrit l'interaction nécessaire à la conception d'un système mécatronique. Il est donc nécessaire de développer de nouveaux outils permettant d'optimiser globalement la conception du système mécatronique. Un champ de recherche actuel concerne donc le développement de nouvelles méthodologies de conception et de nouveaux outils et langages de modélisation permettant de prendre en compte ces contraintes multiphysiques et multimétiers.

2) Un autre aspect de l'intégration dans les systèmes mécatroniques concerne l'intégration physique de différentes technologies dans les systèmes de taille macroscopique. Cela implique une nécessaire miniaturisation des composants (capteurs, actionneurs, fonctions électroniques) et, à ce titre, les techniques de microfabrication deviennent incontournables, pour augmenter la densité de fonctions dans un espace toujours plus restreint. Cela conduit à des composants voire des systèmes hybrides, en partie fabriqués par des techniques conventionnelles et en partie en utilisant les techniques de microfabrication, dans lesquels une prise en compte de divers domaines de la physique mis en jeu devient nécessaire pour évaluer les effets d'influence sur les différentes parties du système.

Dans l'industrie, la mécatronique a pour objectif l'amélioration de fonctions existantes ou l'intégration de nouvelles fonctions, aussi bien dans les composants que les systèmes. Son utilisation a démarré dans l'aéronautique, l'industrie automobile l'a généralisée à une grande échelle et son application s'élargit maintenant à la majorité des secteurs industriels (médical, énergie…).

3.17.2. Un état de l'art s'appuyant sur des états de conjoncture ou avis récents

L'état de l'art s'oriente vers les différentes directions de développement des systèmes mécatroniques.

3.17.2.1. Intégration physique

Les articles s'intéressant à améliorer l'intégration physique des systèmes s'orientent de plus en plus vers les technologies MEMS[8] ou MOEMS[9], ainsi que le développement et l'utilisation de matériaux actifs. Les polymères électroactifs sont par exemple actuellement très étudiés du point de vue de leur formulation, mais également du point de vue de leur commande lorsqu'ils jouent le rôle de capteurs ou d'actionneurs. Par ailleurs, afin de favoriser l'intégration physique, plusieurs concepts de microactionnement sont proposés : des méthodes d'actionnement minimalistes basés sur les possibilités offertes par les microtechniques (exactitude de fabrication), des méthodes sans capteur ou encore des principes limitant la connectique dans les systèmes. Ces derniers sont parfois regroupés sous le terme de « *wireless mechatronic systems* ». Dans ce domaine, nous trouvons par exemple les réseaux de capteurs sans fil, les systèmes de récupération d'énergie ou les moyens de mesure et de commande basés sur l'interaction de champs (principes optiques, magnétiques...).

3.17.2.2. Méthodes et outils pour la conception mécatronique et l'ingénierie système

Le développement de méthodes et outils pour la conception de systèmes mécatroniques est également très présent dans la littérature. Il convient de prendre en considération les besoins liés à l'intégration des modélisations physiques (mécanique, thermique, optique, vibration, etc.), des modélisations métier ou disciplinaires (mécanique, électronique, automatique, informatique embarquée) ou des modélisations de systèmes (exigences fonctionnelles, logiques, classes de composants, physiques, instances de composants). Toutes ces modélisations nécessitent une forte structuration méthodologique afin d'exploiter au mieux et d'intégrer l'ensemble des informations et données manipulées par les concepteurs. Un lien important entre méthodes et outils est tout naturel afin de décrire au mieux du 0D au 3D les exigences, les fonctions, les concepts et les solutions proposés par les équipes de conception. Un besoin incontournable en matière d'outils porte aussi sur les nouvelles approches de modélisation et simulation système (MBSE) à coupler avec les méthodes d'analyse de structure, thermique ou vibratoire par exemple. Enfin, l'interopérabilité de l'ensemble des modélisations et outils (CAO mécanique et CAO électronique dans le routage 3D, cohérence des vues fonctionnelles, logiques et physiques, etc.) est désormais une évidence.

3.17.2.3. Méthodes et outils pour la commande

La complexité des systèmes mécatroniques nécessite la synthèse de lois de commande adaptées. Le développement de lois de commande pour les systèmes fortement non linéaires, la commande robuste ou encore la commande sans capteur profite donc de manière significative au développement des systèmes mécatroniques

[8] *Micro Electro-Mechanical Systems.*
[9] *Micro Optical Electro-Mechanical Systems.*

et la littérature montre de nombreuses références bibliographiques adaptant ce type de lois de commande aussi bien pour des systèmes d'actionnement aéronautique que des microsystèmes par exemple à actionnement piézoélectrique ou basés sur des alliages à mémoire de forme.

3.17.2.4. Méthodes pédagogiques

Il existe enfin de nombreuses références bibliographiques proposant des méthodes pédagogiques pour enseigner la mécatronique. En effet, les étudiants des filières mécatroniques sont initialement issus de filières mécanique (conception) ou électronique (génie électrique, EEA) ou informatique (contrôle commande, système embarqué) et le challenge est réel pour les ouvrir aux autres disciplines de la mécatronique et les préparer aux méthodes de travail collaboratives nécessaires dans ce contexte de conception de systèmes ou produits.

3.17.3. Les orientations scientifiques nécessaires en fonction des enjeux

- Gestion de l'énergie dans les systèmes mécatroniques : il est nécessaire d'améliorer l'autonomie des systèmes mécatroniques en étudiant des moyens d'apport, de récupération et de stockage d'énergie, mais aussi en développant des stratégies d'actionnement et de mesure à faible consommation énergétique (systèmes « sobres »).
- Développement de nouveaux matériaux actifs.
- Amélioration de la robustesse et de la fiabilité des systèmes mécatroniques.
- Méthodes de conception dédiées (ingénierie système).
- Développement de nouvelles fonctions logicielles (par exemple : surveillance, pilotage automatique, lissage de puissance…).

3.17.4. Les verrous scientifiques et technologiques à lever

Les orientations scientifiques proposées ci-dessus sont actuellement limitées par des verrous scientifiques qu'il conviendra de lever et des problématiques technologiques qu'il faudra traiter.

- Les limites à l'intégration sont fixées par l'échauffement des composants du fait de leur consommation et par les perturbations de l'environnement (CEM, humidité, vibration…).
- Les difficultés de stockage de l'énergie sur batteries ou condensateurs est également une limite actuelle pour l'autonomie des systèmes (ratio capacité / dimension des accumulateurs).
- Le rendement des systèmes à récupération d'énergie dans une transmission de puissance est encore faible.

– Les matériaux actifs à fort rendement présentent des problèmes de disponibilité et sont encore peu exploitables.
– La fabrication 3D et la grande exactitude à l'échelle microscopique avec un rapport d'aspect identique dans les trois dimensions de l'espace sont à développer car elle présente encore des limites.
– Les difficultés de compatibilité de données de conception ainsi que d'interopérabilité des outils et applications d'aide à l'ingénierie sont à résoudre.
– Des problèmes persistent dans la fiabilité des composants, ainsi que dans leurs modes de fabrication et leur intégration physique, et aussi en liaison avec la sûreté de fonctionnement des systèmes mécatroniques.

3.17.5. Les laboratoires concernés

Laboratoire Ampère à Lyon (ECL, INSA, UCBL), Laboratoire d'ingénierie des systèmes mécaniques et des matériaux (LISMMA) – Supméca Saint-Ouen, laboratoire Roberval – université de technologie de Compiègne (UTC), Institut XLIM – Limoges (université de Limoges, ENSIL), Institut FEMTO ST – Besançon (UFC, ENSMM, UTBM), Laboratoire d'ingénierie des systèmes de Versailles (LISV) – université de Versailles - Saint-Quentin (UVSQ), laboratoire Mécatronique, méthodes, modèles, métiers (M3M) – université de technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM), laboratoire Systèmes et matériaux pour la mécatronique (SYMME) – Annecy (Polytech Annecy-Chambéry), Institut de recherche en communications et cybernétique de Nantes (IRCCyN) – ECN, EMN et université de Nantes, Institut Clément-Ader à Toulouse (EMAC, INSA, ISEA, UPS), Institut des systèmes intelligents et de robotique (ISIR) à Paris (UPMC)…

Plusieurs groupements de recherche académiques se sont formés autour de la mécatronique :
à l'international :

– IOREM (International Organization on Research and Education in Mechatronics) ;
– EUJO-LIMMS (Europe-Japan Opening of LIMMS) : issu du LIMMS (Laboratory for Integrated Micro Mechatronic Systems), une unité mixte internationale entre le CNRS et l'université de Tokyo dans les domaines des micro- et nanotechnologies appliquées à l'ingénierie et à la biologie ;

en France :

– GT SYSME (Systèmes mécatroniques) dans le GDR « MACS » ;
– GT conception innovante et mécatronique dans le GDR « Robotique ».

Il existe également des organisations tournées vers les industriels qui s'orientent vers le domaine de la mécatronique :

– Thésame, centre de ressources en mécatronique, gestion industrielle et management de l'innovation, fournit des services en technologies ;
– Artema, le syndicat des industriels de la mécatronique ;

– le CETIM, Centre technique des industries mécaniques avec son pôle mécatronique ;
– l'Institut de mécatronique, basé à l'université de technologie de Compiègne (UTC).

3.17.6. Les enjeux industriels et sociétaux par domaines d'application

La mécatronique est affichée comme une technologie clé pour le ministère (horizon 2015) et également comme une technologie prioritaire pour le CETIM. Elle touche tous les secteurs et domaines d'application (transports, médical, énergie, matériaux…). Bon nombre d'industriels, ceux des industries automobile et aéronautique en premier lieu, s'orientent vers le développement de produits dits « mécatroniques » avec des degrés de maturité divers liés au **niveau d'intégration** des différentes technologies (séparés, joints, inclus, fusionnés). Les objectifs des industriels sont des gains de poids et de volume, menant à une minimisation de la consommation d'énergie, une amélioration des performances et de la productivité, et donc globalement à une réduction des coûts.

Dans le même temps, plus le niveau d'intégration augmente, plus se pose le problème de la **fiabilité** des *process* et des produits conçus. Pour cela, il est nécessaire de développer de nouveaux **processus de conception** et de nouveau moyens de **simulations** multiphysiques et multimétiers, en plus d'analyses spécifiques pour déterminer les durées de vie des composants, systèmes ou produits.

La mécatronique est également un moyen d'intégrer des fonctions additionnelles dans les systèmes afin d'effectuer des autodiagnostics, comme par exemple réaliser des tâches avec plus de précision, de communiquer… Ces fonctions additionnelles ont un coût énergétique qu'il convient de minimiser et, dans ce sens, les nouvelles démarches développées s'orientent vers la **performance énergétique** en prenant en compte la conception des systèmes et produits, leur mise en œuvre et leur maintenance. Le concept de « *smart* mécatronique » fait partie de l'usine du futur (industrie 4.0) et rejoint également la mouvance des objets connectés et interactifs. L'approche « *Cyber Physical Systems* » devra aussi être prise en considération pour faire évoluer les méthodes de conception mécatronique.

3.17.7. Les liens et concertations nécessaires avec les autres disciplines

La mécatronique doit tout naturellement prendre en considération les besoins, les évolutions et les perspectives d'autres disciplines et domaines d'application. Mentionnons entre autres :

1. la conception de produits ;
2. l'ingénierie système ;
3. l'automatique, la robotique ;
4. l'électronique, les capteurs ;

5. l'informatique ;
6. les matériaux actifs ;
7. la fiabilité et la sûreté de fonctionnement.

Les défis de l'intégration et l'approche système doivent permettre de faire converger les disciplines et les métiers pour offrir une réponse aux besoins et aux défis de la mécatronique. Une meilleure gestion de complexité permettra certainement aussi un lien plus étroit entre les métiers et les expertises à mobiliser pour la conception de systèmes mécatroniques.

3.17.8. La position française par rapport à l'international

Au niveau international, la mécatronique est présente dans de nombreux pays. Elle est souvent vue comme un moyen d'amélioration et d'évolution des systèmes robotiques, comme par exemple au Japon, où le terme mécatronique a été défini. L'Allemagne est également très présente dans ce domaine, notamment pour l'optimisation des systèmes et les systèmes adaptatifs (adaptronique). Il faut aussi être attentif aux développements en cours aux États-Unis et en Chine en matière de mécatronique.

Dans les laboratoires de recherche, la France est présente dans les différentes orientations de la mécatronique, mais revendique finalement très peu le terme de mécatronique car il n'est pas toujours clairement identifié par les secteurs disciplinaires du Conseil national des universités (CNU) et les sections du Comité national de la recherche scientifique.

Au niveau normatif, la France préside le groupe mécatronique ISO TC184 / SC5 / WG7.

3.17.9. Recommandations et perspectives

Au-delà du développement des fondamentaux disciplinaires de la mécatronique et de l'intégration physique des systèmes, il convient de s'intéresser à l'élaboration de nouveaux principes fonctionnels et technologiques capables d'être plus performants, plus compacts, plus sobres énergétiquement, plus fiables et plus intégrés. Une plus large prise en compte des applications des *Cyber-Physical Systems* ou encore des *Smart Systems* conduira tout naturellement à mettre en œuvre des nouveaux concepts pour la transmission et le stockage d'énergie, la communication intersystème, le développement de lois de commandes assurant une autonomie plus large, le traitement et la fusion des données issues des capteurs, la miniaturisation des composants et des systèmes.

Concernant les méthodes et outils dédiés à la conception de systèmes mécatroniques, les perspectives de développement porteront principalement sur une meilleure convergence des démarches de conception disciplinaire avec les approches d'ingénierie système. Il faudra aussi tenir compte des enjeux liés au couplage des modélisations et simulations 0D/1D et 2D/3D, et liés aussi à l'interopérabilité des outils et des logiciels permettant une conception réellement intégrée des systèmes

mécatroniques dans un environnement de développement toujours plus rapide et contraint en termes d'exigences et de performances à atteindre.

3.17.10. Bibliographie

[1] Tomizuka M., Mechatronics : From the 20th to 21st century, *Control Engineering Practice*, vol. 10, p. 877–886, 2002.

[2] Shetty D., Kolk R.A., Mechatronics system design, *in* : *Mechatronics System Design : SI*, p. 1–40, 2010.

[3] Kelly L., De Silva C.W., *Mechatronics : An Integrated Approach*, CRC Press, 2004.

[4] Thramboulidis K., Model-integrated mechatronics – Toward a new paradigm in the development of manufacturing systems, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 1, p. 54–61, 2005.

[5] Lefèvre J., Charles S., Bosch-Mauchand M., Eynard B., Padiolleau E., Multidisciplinary Modelling and Simulation for Mechatronic Design, *Journal of Design Research*, vol. 12, n° 1–2, p. 127–144, 2014.

[6] Hehenberger P., Poltschak F., Zeman K., Amrhein W., Hierarchical design models in the mechatronic product development process of synchronous machines, *Mechatronics*, vol. 20, p. 864–875, 2010.

[7] Chen Z., Bricogne M., Le Duigou J., Eynard B., Survey on Mechatronic Engineering : A Focus on Design Methods and Product Models, *Advanced Engineering Informatics*, vol. 28, n° 3, p. 241–257, 2014.

[8] Mhenni F., Choley J.Y., Penas O., Plateaux R., Hammadi M., A SysML-based methodology for mechatronic systems architectural design, *Advanced Engineering Informatics*, vol. 28, n° 3, p. 218–231, 2014.

[9] Plateaux R., Penas O., Choley J.Y., Mhenni F., Rivière A., Méthodologie de conception d'un produit mécatronique, *Mécanique et industries*, vol. 11, n° 5, p. 401–406, 2010.

[10] Petit L., Prelle C., Doré E., Lamarque F., Bigerelle M., Four discrete positions electromagnetic actuator : Modelling and experimentation, *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, vol. 15, n° 1, p. 88–96, 2010.

[11] Zaidi S., Lamarque F., Favergeon J., Carton O., Prelle C., Wavelength selective shape memory alloy for wireless micro-actuation of a bistable curved-beam, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 58, n° 12, p. 5288–5295, 2011.

4 Concevoir et produire autrement

Concevoir et produire autrement un objet mécanique, concevoir un processus de fabrication, un système de production, des services de maintenance et d'inspection, c'est innover en apportant une valeur supplémentaire à ce qui existe.

L'innovation ne peut naître sans que les défis scientifiques exposés précédemment soient levés, car elle se nourrit des nouvelles connaissances scientifiques.

Sont abordés ici les principales approches et les défis scientifiques et techniques associés, qui se traduisent par des méthodes et outils indispensables à la démarche d'innovation en mécanique. Il ne s'agit pas d'imaginer le futur mais d'aborder les approches qui devraient permettre de le construire.

4.1. Conception des produits

4.1.1. Descriptif de la thématique

Depuis les années 1990, la thématique de la **conception intégrée** continue de se développer, notamment sous la double poussée des avancées dans le domaine des outils numériques et de la généralisation des approches transversales par projets. On entend par conception intégrée tout ensemble d'activités concourant à l'ingénierie d'un produit impliquant les acteurs du cycle de vie du produit, acteurs de disciplines différentes, et nécessitant de construire une convergence à travers des outils et des organisations. Cette intégration peut prendre la forme d'une intégration des points de vue (afin de créer une synthèse et d'arriver à construire des compromis basés sur les connaissances métiers) ou la forme d'une mise en réseau d'acteurs (afin de créer les conditions de collaboration entre acteurs distants). Depuis toujours, cette thématique tire profit du caractère interdisciplinaire. La notion d'intégration peut être déclinée à plusieurs niveaux. On peut parler d'intégration des outils par des approches d'interopérabilité par exemple, l"intégration des modèles par des approches de type SysML, mais on peut aussi adopter des approches centrées sur les acteurs et parler d'organisation et de coopération, l'intégration s'effectue alors par les Hommes. On peut ainsi retrouver des approches contradictoires qui s'opposent, adopter une vision constructiviste ou une vision positiviste des phénomènes observés. Quoi qu'il en soit, la nécessité d'intégrer un nombre de plus en plus important d'acteurs et une variété de plus en plus grande

d'approches reste valable. En effet, on ne peut plus considérer que la conception se réduit à l'ingénierie d'un produit réalisée dans un bureau d'études par des ingénieurs. Considérer que la conception est uniquement liée à des phases en amont créatives coupées des dimensions industrielles est aussi une erreur. Le spectre des acteurs s'est depuis longtemps élargi. C'est bien la chaîne complète (*design chain*) qu'il convient d'intégrer depuis les phases de design et de marketing jusqu'aux phases d'industrialisation, d'usage et de recyclage. De même, la complexité grandissante des organisations nécessite de penser l'intégration des fournisseurs et des partenaires externes aux entreprises donneurs d'ordres.

Au-delà de la conception « routinière » qui relève du domaine de connaissance de l'entreprise, la « **conception innovante** » expose l'entreprise plus largement au risque financier de l'échec, impose souvent de naviguer vers l'inconnu afin de créer de la valeur. Les ressorts de la conception innovante doivent être mus à la fois par de solides fondations théoriques et des outils et méthodes visant à sa mise en pratique. On parlera alors de méthodes innovantes de conception (ou plus exactement de méthodes pour concevoir de façon innovante).

On est ainsi à la frontière des sciences humaines et sociales, des sciences économiques et des sciences pour l'ingénieur. Enfin, les récentes avancées technologiques dans le domaine des TIC ou des interfaces Homme/machine, par exemple, laissent penser que cette thématique de l'intégration et de la collaboration est une thématique d'avenir.

L'écoconception consiste à concevoir des produits ou des services qui auront un impact le plus réduit possible sur l'environnement et la santé afin de préserver les ressources et de minimiser les pollutions. Pour concevoir écologiquement un produit ou un service, il est impératif d'avoir une approche globale qui prend en compte tous les impacts environnementaux (eau, air, sol, bruit, déchets, matières premières, énergie…) sur l'ensemble des étapes du cycle de vie incluant son élaboration, son usage, son traitement en fin de vie, sans oublier la logistique à toutes les étapes. Cette approche doit conduire à une réduction des impacts environnementaux sans les déplacer d'une étape du cycle à une autre, et sans créer de nouveaux impacts, notamment sans transfert de pollution. Aujourd'hui, on utilise de plus en plus l'éco-innovation afin de développer des produits ou systèmes présentant une réduction radicale des impacts environnementaux.

Associée à la recherche de solutions économiquement viables et socialement acceptables, l'écoconception contribue au concept de développement durable.

La prise en compte des **variations géométriques** s'inscrit dans une approche globale *Product Lifecycle Management*, depuis la conception jusqu'à la fabrication et l'inspection, garantissant l'assemblage, le fonctionnement et les fonctionnalités des produits manufacturés. La spécification géométrique des produits vise à « limiter » les variations géométriques afin de garantir un niveau probable de performance de la solution. Il ne suffit plus aujourd'hui de concevoir des modèles numériques en CAO représentant une géométrie idéale. Il devient de plus en plus crucial de simuler de manière réaliste et dans une vue tridimensionnelle l'ensemble des comportements, des produits, des processus de fabrication, d'assemblage, de démontage et de contrôle. Enfin, aucun modèle ne pouvant être validé sans une confrontation au réel, les importants développements actuels de la métrologie dimensionnelle devront être mis à contribution pour identifier les

paramètres de défauts générés par le processus de production. Les caves de simulation virtuelles ou les écrans 3D holographiques sont prometteurs pour le développement de ces modèles tridimensionnels.

4.1.2. État de l'art

4.1.2.1. Conception intégrée

Basée sur le modèle de conception développé dans le cadre du consortium PRIMECA (liens entre modèles, moteurs et bases de données), le concept de conception intégrée est né d'une discussion grenobloise entre mécaniciens du laboratoire 3S et sociologues du CRISTO, permettant d'ajouter la dimension humaine dans ce modèle. Le groupe de recherche conception intégrée de 3S a donné naissance en 2004 à un réseau d'excellence européen (Virtual Research Lab for a Knowledge Community in Production), lui-même transformé en l'association internationale EMIRAcle. Cette association a développé un module de formation en ligne iDesigner (pour *integrated design*), référence mondiale utilisée par plus de 40 établissements et proposant une certification européenne.

4.1.2.2. Conception innovante

La théorie CK est née de la volonté du centre de recherche en gestion de l'École des mines de Paris de généraliser des concepts mathématiques issus de la théorie des ensembles à la créativité et aux tâches de conception en R&D industrielle. Cette théorie repose sur la modélisation de deux éléments « concepts (C) » et « connaissances (K) », ainsi que de leurs interactions. Ces dernières sont censées provoquer l'émergence de nouvelles connaissances et engendrer des ruptures produites par des expansions dans de nouvelles zones préalablement inconnues des utilisateurs. En ce sens, elle prétend systématiser le processus créatif en permettant de vaincre la fixation qui, au contraire, l'inhiberait.

La représentation FBS émane de l'équipe de recherche dirigée par John Gero en conception du laboratoire d'informatique de l'université de Sydney, qui a développé un modèle générique de conception dans lequel les notions de fonction, comportement et la structure d'objets jouent un rôle central. Gero a envisagé la conception comme un processus par lequel les concepteurs transforment des fonctions imaginées de façon descriptive pour les transférer dans un modèle théorique donnant naissance à un artefact qui pourrait remplir ces fonctions.

La méthode TRIZ n'a été accompagnée de réflexions théoriques que très tard après ses déclinaisons méthodologiques (ARIZ, Analyse substances-champ et bases d'effets physiques, matrice et principes inventifs). Ce qui relève théoriquement de la TRIZ, c'est entrevoir l'acte d'invention d'un artefact comme devant nécessairement résoudre une contradiction physique et technique, tout en restant en accord avec une ou plusieurs des neuf lois d'évolution objectives génériques à tout artefact. Cela impose une part très importante d'investigation de la situation initiale, l'identification des contradictions bloquantes et l'usage des éléments de synthèse des connaissances universelles que les Russes aux origines de la TRIZ ont commencé à compiler et modéliser. À la différence des

deux précédentes approches, la diffusion de la TRIZ dans l'industrie s'étend de façon grandissante.

4.1.2.3. Écoconception

La prise en compte des aspects environnementaux en conception de produit apporte un point de vue supplémentaire dans les équipes de conception. Afin de pouvoir intégrer ce point de vue, les équipes ont pu intégrer de nouveaux experts, se former pour répondre à de nouveaux enjeux ou utiliser des outils spécifiques permettant de considérer les nouveaux indicateurs cibles. Ainsi, plusieurs méthodes et outils ont vu le jour, afin de faciliter la prise en compte de nouveaux objectifs en conception. Quelles que soient les approches retenues en entreprise, on a pu constater une meilleure prise en compte de la dimension environnementale avec un effet d'apprentissage chez l'ensemble des acteurs des projets. Cela contribue bien entendu à une meilleure intégration, d'autant plus nécessaire que l'environnement concerne tous les secteurs de l'entreprise.

Néanmoins, de nouveaux enjeux environnementaux sont posés aujourd'hui, compte tenu des connaissances qui ont évolué concernant l'épuisement des ressources naturelles, énergétiques et des effets de nos rejets sur l'environnement. Force est de constater que les approches classiques d'écoconception ne permettront pas d'atteindre ces nouveaux objectifs et qu'il faut dès à présent repenser de manière plus large les solutions visant à préserver l'environnement. Bien entendu, l'écoconception doit toujours s'appuyer sur des méthodes d'évaluation environnementale et continuer à développer des indicateurs/outils/méthodes pour la conception, mais il faut mettre en place de nouveaux outils et indicateurs permettant de basculer dans un changement de paradigme vers une société de consommation différente. Consommer des produits remanufacturés, utiliser des services partagés sont des solutions qui doivent permettre de modifier significativement nos impacts environnementaux à l'avenir.

4.1.2.4. Spécification géométrique des produits

Les domaines d'activités et de recherche en spécification et vérification géométriques des produits peuvent être résumés ainsi :

- la spécification des produits. Ce domaine s'attache à définir des modèles géométriques pour les produits avec défauts, dans le but de construire un langage univoque d'expression des limites tolérées pour l'ensemble des acteurs concernés par la maîtrise des variations géométriques. Ce travail est généralement réalisé pour mieux structurer les normes en vigueur et les standards d'échanges entre systèmes XAO. Le second volet de cette activité est la détermination des spécifications des assemblages et des pièces à partir des conditions d'aptitude à l'emploi qui se déclinent en exigences fonctionnelles sur les produits. Il vise également la détermination des spécifications de fabrication à partir des spécifications fonctionnelles des pièces. Cette activité est appelée synthèse des spécifications, ou encore synthèse qualitative ;
- la simulation des comportements géométriques des assemblages avec défauts. Ce domaine s'intéresse à la recherche de modèles de transfert de

spécifications, à la mise au point de méthodes et d'outils d'analyse des défauts et de leurs conséquences. Deux types de problèmes sont considérés, le problème direct si l'on étudie les conséquences des valeurs des défauts influents sur une spécification (analyse des tolérances) ou le problème inverse si l'on traite la répartition de la valeur de la spécification sur les défauts influents (synthèse quantitative des tolérances). Ces outils répondent généralement à trois objectifs :

- simuler le montage du produit en évaluant les conséquences des défauts des pièces sur la montabilité et la robustesse de l'assemblage ;
- simuler le fonctionnement du produit en condition d'usage pour déterminer son aptitude à l'emploi ;
- simuler les processus de fabrication pour vérifier la faisabilité des spécifications fonctionnelles et pour déterminer les spécifications de réglage ;
- la vérification des spécifications ou métrologie. Ce domaine de recherche consiste à trouver des moyens matériels de mesure et les algorithmes de traitement pour le réglage et la surveillance des moyens de fabrication ou d'assemblage ; pour la déclaration de la conformité des produits au regard des spécifications, en accord avec les normes en vigueur ; pour la validation des modèles de simulation. Ces moyens doivent donner des indications conformes à la réalité assorties de leurs incertitudes.

La représentation tridimensionnelle des données a fait l'objet récent d'investissements européens avec la création d'une infrastructure spécifique VISIONAIR, regroupant 24 laboratoires européens, pilotée par le laboratoire G-SCOP.

4.1.3. Les orientations nécessaires en fonction des enjeux

4.1.3.1. Conception intégrée

Les éléments ci-dessous constituent un ensemble de balises importantes en termes d'enjeux et d'opportunités vers lesquels il convient de s'orienter :

- une plus grande intégration des données et des connaissances relatives au produit tout au long du cycle de vie. La conception est une activité cognitive collective et mobilisant des acteurs de domaines techniques et conceptuels très variés ;
- une plus grande intégration des technologies dans une complexification des produits ;
- des outils de manipulation et d'interaction avec les objets numériques de plus en plus accessibles (immersion 3D, retour d'efforts, ultra-haute définition, surfaces tactiles, etc.) ;
- une présence de plus en plus forte des enjeux sociétaux (responsabilité sociale des entreprises) et des enjeux environnementaux qui pèsent sur les produits et les systèmes de production ;
- des procédés de prototypage rapide en pleine expansion ;

– une nécessaire intégration des acteurs en amont venant d'univers non techniques ;
– une présence de plus en plus forte des utilisateurs dans l'univers des concepteurs (*user-centered design*) ;
– une utilisation des réseaux sociaux et du web pour capter les besoins et les idées (*open innovation*) ;
– une plus grande disponibilité et une utilisation accrue des outils de collaboration à distance ou en présentiel.

4.1.3.2. Conception innovante

On constate une faible pénétration des milieux industriels en regard des méthodologies : C-K, TRIZ et FBS qui ont toutes trois utilisé de façon expérimentale (pour C-K chez Renault ou Thales) ou déployé de façon homogène (pour TRIZ chez Samsung ou Posco). Nous trouvons de façon plus abondante dans la littérature des articles scientifiques (revues et congrès) plus que des éléments de vulgarisation permettant une plus large diffusion.

4.1.3.3. Écoconception

Comme pour la mise en place d'une démarche qualité dans une structure, il est nécessaire que la volonté de mise en place d'une démarche d'écoconception soit soutenue par tous les acteurs et qu'elle soit intégrée dans la stratégie de l'entreprise. Pour cela, on doit imaginer des stratégies d'intégration différentes selon son niveau de maturité par rapport à la prise en compte des contraintes environnementales (connaissances, expertise, culture, outils…). On a ainsi deux axes de développement possibles et qui sont complémentaires :

– développer/intégrer de nouvelles expertises visant la diminution des impacts environnementaux (conception de nouveaux matériaux durables, optimisation des consommations énergétiques, compréhension du métier de recycleur…). Cet axe de travail vise l'obtention de solutions écoefficientes, c'est-à-dire des solutions dont les impacts écologiques, les consommations de matières premières et les besoins en énergie sont réduits tout au long du cycle de vie. Il permet à l'entreprise de continuer à s'approprier les concepts d'écoconception sans transformer radicalement son corps de métier ;
– élargir les points de vue des équipes de concepteurs afin de concevoir des systèmes innovants présentant une réduction radicale des impacts environnementaux. Ces nouveaux produits et services à développer nécessitent une prise en compte approfondie des utilisateurs (sociologie, gestion) pour des usages écoresponsables, un renouvellement des *business models* (marketing, économie…), des produits plus robustes et intelligents (mécaniques, mécatroniques, nouveaux matériaux…) et utilisant des matériaux plus valorisables (recyclabilité, nouveaux matériaux…). Cette seconde approche peut conduire à des changements assez importants au niveau des solutions et modifier ainsi l'organisation même de l'entreprise.

4.1.3.4. Spécification géométrique des produits

La communication des tolérances demeure une difficulté qui freine le développement des produits. Les limites du langage graphique normalisé et la lenteur dans l'évolution des normes ne permettent pas d'imaginer une réponse à court terme. Pour une meilleure maîtrise des variations géométriques dès la conception préliminaire, des méthodes intégrées doivent être développées et offrir aux concepteurs les moyens d'évaluer simplement la robustesse de leurs solutions. La simulation tridimensionnelle des variations géométriques en conception, fabrication, assemblage et métrologie nécessite des modèles complets et cohérents. La vérification métrologique des écarts sur les pièces et sur les assemblages réclame des méthodes de traitement unifiées et des méthodes de calcul des incertitudes. Vouloir tolérancer toutes les caractéristiques de définition pour maîtriser les aspects fonctionnels et toutes les caractéristiques de fabrication pour mieux piloter les moyens de production conduit à un nombre de spécifications ingérables par l'Homme et non acceptable économiquement par les industriels. Dans une approche intégrée, il est nécessaire de hiérarchiser les caractéristiques en prenant en compte les risques encourus et les coûts.

4.1.4. Les verrous technologiques à lever

4.1.4.1. Conception intégrée

Les verrous à lever sont de plusieurs natures et multi-niveaux. Sur le plan technologique, on note les tendances suivantes :

- outils de modélisation du produit intégrant une réelle dimension multivues et multimétiers. Mettre les outils au service de l'activité des concepteurs en reconnaissant les spécificités des langages techniques et des modèles spécifiques à chaque acteur ;
- les technologies d'interaction autour de la maquette numérique intuitive et maquettage virtuel et physique. Aujourd'hui, des possibilités de plus en plus incroyables s'offrent à nous en ce qui concerne les interfaces Homme/machine. Très souvent favorisés par l'industrie du jeu vidéo ou du cinéma, ces outils permettent d'imaginer de nouvelles possibilités d'interaction entre le monde virtuel et le monde physique des concepteurs ou des utilisateurs. Les enjeux majeurs consistent à concevoir des environnements permettant aux concepteurs de transformer leurs pratiques ;
- des outils de collaboration centrés sur les échanges argumentatifs, la coconception, la construction du compromis et la prise de décisions… ;
- des outils d'optimisation globaux permettant une conception robuste et multiphysique... ;
- des systèmes d'information PLM (*Product Lifecycle Management*) intégrant les processus de validation, gestion des configurations intégrées aux processus d'entreprise... ;
- la conception PSS (produits/systèmes/services)… ;
- des processus et des pratiques de conception intégrant les dimensions responsables.

Enfin, une réelle reconnaissance des sciences de la conception comme un levier majeur de compétitivité, comme Herbert Simon l'avait appelé de ses vœux dans les années 1990. Cela, les entreprises allemandes ou nord-européennes l'ont bien compris : la conception en tant que science permet de penser les processus complexes de création et d'industrialisation des produits, des services et fournit des outils de pensée pour développer des approches créatives et des organisations intégrées apportant un levier de croissance par une approche systématique des problèmes. L'une des premières conséquences serait une meilleure intégration du design (au sens de la création) et de l'ingénierie (au sens de la conception et de l'industrialisation des produits) dans une approche articulée reconnaissant les apports et les forces respectives de chacun. Les grands succès en termes de produits (Apple, Google, Swatch, etc.) et services se sont réalisés ces dernières années au confluent d'une très bonne perception des tendances sociétales (anticipant les besoins et les usages) et d'une excellente maîtrise de l'ingénierie et de l'industrialisation des produits.

4.1.4.2. Conception innovante

- Dépasser les définitions théoriques pour aboutir à des outils et des méthodes applicatives permettant leur utilisation par un large public.
- Pallier l'absence de métriques pour estimer l'apport de ces approches dans la performance globale de l'activité de conception (construction d'indicateurs, réflexions sur les niveaux d'inventivité gagnés suite à l'intégration d'une telle approche).
- Trouver des techniques permettant d'utiliser le flux permanent et exponentiellement grandissant de données disponibles sur le web, en manager ses contenus (volume, mise à jour, filtrages) pour mieux servir la pertinence de ce que délivre la méthode.
- Lier ou combiner l'approche à d'autres théories, d'autres outils, d'autres méthodes déjà présents dans l'entreprise (ou les communautés scientifiques) en travaillant sur les complémentarités utiles entre ces dernières.

4.1.4.3. Écoconception

Les verrous à lever pour le développement de l'écoconception portent sur :

- la volonté politique des entreprises. Comment évaluer les bénéfices environnementaux et économiques liés à la mise en place d'une démarche d'écoconception, comment intégrer les fournisseurs dans la démarche car partie prenante du résultat final… ;
- la multidisciplinarité. En effet, la prise en compte des aspects environnementaux implique des champs de compétences très variés, éloignés de ceux actuellement pris en compte en conception. Les acteurs à impliquer sont issus de cultures différentes. Il s'agit donc de travailler de nouveau à l'interface des métiers pour rendre compréhensibles les règles métier de chacun ;

– l'écoconception ne doit pas être vue comme un ensemble de contraintes supplémentaires venant alourdir le cahier des charges, mais comme un vecteur d'innovation. L'intégration doit conduire à une meilleure prise en compte de cette dimension.

Dans la construction/formalisation d'expertises, de nombreuses connaissances restent à acquérir : des bases de données d'analyse de cycle de vie doivent être consolidées, la compréhension et la formalisation des contraintes de nouveaux métiers, tels que les désassembleurs, les remanufactureurs, doivent être menées…

La formation des ingénieurs doit contribuer à une meilleure acceptation de la dimension environnementale (voire durable) au sein des projets.

4.1.4.4. Spécification géométrique des produits

– Réduire la complexité et garantir la complétude des modèles de spécifications.
– Garantir la performance des simulations : les modèles devenant de plus en plus détaillés (très grand nombre de paramètres), l'analyse des tolérances peut très vite s'avérer prohibitive en temps de calcul, en particulier la prise en compte des jeux entre pièces dans le cas de systèmes hyperstatiques, des déformées des composants, des comportements multiphysiques ; maîtriser les incertitudes de modèles au regard des performances évaluées.
– Mieux intégrer les techniques de simulation géométrique des assemblages réalistes avec les autres techniques de simulation (structures, fluide, thermique…).
– Réduire la complexité d'évaluations des performances : caractérisation des performances des systèmes de production (caractérisation des lois de probabilité…), caractérisation des performances d'une activité de spécification géométrique, identification des coûts…

4.1.5. Les enjeux industriels et sociétaux par domaines d'application

Peut-on construire une industrie qui soit socialement responsable et qui réalise une croissance économique ?

Peut-on transformer les produits et les services de demain de manière à obtenir une plus grande implication des usagers, des produits moins intrusifs et des technologies plus douces et respectueuses de l'environnement ? Il s'agit de :

– concilier innovation et développement durable, systématisation des productions innovantes et importance de l'empreinte laissée sur la planète. Une piste serait de faire comprendre à tous que l'innovation, c'est aussi trouver des solutions à des problèmes, y compris en allant dans le sens de produire moins d'objets mais multifonctionnels, de réduire les émissions de CO_2, ou accompagner les mutations des filières vers des productions « vertes » ;

– réduire les cycles de conception (diminution des temps de développement en réduisant les essais et validations physiques) ;
– adapter des produits au plus grand nombre (*mass customization*), la modularité (*modular design*), la variété (*design for variety*), assurer l'interchangeabilité et l'adaptabilité des modules ;
– optimiser les procédés industriels (réduction des rebuts, amélioration des actions de maintenance, assurer une bonne traduction des besoins des clients) ;
– permettre d'estimer les risques et les coûts avant toute prise de décision ;
– développer des systèmes « plus électriques », hybrides, de nouvelles mobilités, de nouvelles énergies.

La prise en compte de l'environnement dans la conception des produits constitue l'un des objectifs de la stratégie nationale du développement durable, adoptée en 2003, renforcée par la mise en place du Grenelle de l'environnement. Ces politiques se sont traduites par des textes réglementaires comme en témoigne la directive cadre sur l'écoconception des produits consommateurs d'énergie datant déjà de mai 2005. Au niveau des industriels, de nombreux groupes, tant en France qu'à l'étranger (Europe, États-Unis, Japon…) ont mis en œuvre des démarches d'écoconception, en général dans le cadre d'une politique de développement durable. L'écoconception est d'ailleurs de moins en moins considérée comme une contrainte supplémentaire dans la conception d'un système, mais bien comme une opportunité, pour une meilleure maîtrise des coûts.

La formation des formateurs : les nouvelles compétences à acquérir doivent être dispensées par des formateurs performants, avec une bonne maîtrise des pratiques et utilisant une pédagogie adaptée.

4.1.6. Les liens et concertations nécessaires avec les autres disciplines

La conception se positionne comme une approche complexe et comporte des dimensions humaines, économiques, organisationnelles et techniques, donc doit associer des disciplines variées :

– informatique, intelligence artificielle, simulation ;
– génie industriel ;
– sciences de gestion ;
– sociologie ;
– ergonomie et psychologie cognitive ;
– sciences de l'éducation ;
– métrologie (dimension, qualification interne, capteurs, traitement des signaux…).

Tous les points identifiés ne sont pas de même nature et la science ne peut les aborder qu'avec un ensemble de partenaires venant d'horizons disciplinaires complémentaires. Il est nécessaire de s'appuyer sur cette diversité d'expertises complémentaires pour les mettre en synergie dans une vision commune et partagée.

Ils ne peuvent aussi être abordés de manière isolée tant ils ne font sens que tous ensemble. Seule une approche système permet d'appréhender la complexité de la conception. La pensée « cycle de vie » doit irriguer la recherche pour proposer des solutions durables satisfaisant toutes les parties prenantes.

4.1.7. La position française par rapport à l'international

La France est très bien représentée dans les principales communautés scientifiques internationales autour de l'*engineering design* (Design Society (http://www.designsociety.org/), CIRP (http://www.cirp.net/), ASME (https://www.asme.org/). L'organisation de conférences ou la participation aux comités scientifiques s'est fortement améliorée ces dix dernières années. L'organisation de la conférence mondiale de la Design Society à Paris en 2007 a été le point de départ du développement de la présence française dans cette société. Le nombre de collègues membres de comités éditoriaux des grandes revues du domaine augmente (*Journal of Design Research*, *Research in Engineering Design*, *Journal of Mechanical Design*, etc.). La France pilote les associations et infrastructures EMIRAcle et VISIONAIR.

Au niveau de la conception innovante, certains pays ont reconnu les sciences de la conception comme une science à part entière. On trouve ainsi parfois des universités entières qui la mettent en avant stratégiquement, à la fois en recherche et en enseignement. En Allemagne, on peut citer « Wissenschaft » comme un axe scientifique reconnu. La Chine opère une forte percée dans les productions scientifiques. La France occupe une position de choix puisque concernant la théorie C-K, l'École des mines de Paris en est à l'origine et, concernant la méthode TRIZ, l'INSA Strasbourg reste leader européen.

Les apports de la communauté française dans le domaine du tolérancement sont mesurables par leur forte implication au niveau de la communauté internationale (CIRP, groupe « Tolerancing ») et la participation au comité scientifique du colloque international (CIRP, Conference on Computer Aided Tolerancing). Ainsi le modèle GeoSpelling, développé à partir des travaux des équipes françaises, a été intégré aux normes internationales.

4.1.8. Recommandations et perspectives

Au-delà de la conception intégrée, la France doit pleinement reconnaître la place des sciences de la conception dans les cursus des écoles d'ingénieurs, des universités et permettre aux entreprises – petites et grandes – de construire des outils et des organisations intégrées, communicantes décloisonnées depuis les phases en amont et prospectives jusqu'à l'industrialisation. La connaissance et la maîtrise nécessaires à chaque étape sont cruciales pour le succès de toute l'entreprise.

En conception innovante, la France ne pourra garder le leadership pris (sur C-K et sur TRIZ) qu'avec le soutien au développement de réflexions théoriques, des méthodes et des outils inclus dans son périmètre.

Face aux enjeux sociétaux et économiques actuels, il y a une réelle nécessité à mettre en place des actions sur le long terme visant à un meilleur respect de notre environnement. L'écoconception et l'éco-innovation sont des leviers qui

permettront d'agir dans ce sens. Il devient indispensable de former tous les futurs techniciens et ingénieurs dans ce sens.

La variété des domaines liés à la complexité des problématiques et la grande variabilité des paramètres manipulés nécessitent le développement de modèles plus réalistes, multiphysiques, multiniveaux permettant à la fois de prendre en compte les aspects technologiques, logistiques, économiques, sociétaux afin de proposer des solutions robustes assurant un déploiement des résultats au niveau industriel.

4.1.9. Les laboratoires concernés

G-SCOP (Grenoble), IRCCyN (Nantes), LURPA (ENS Cachan), Institut Pascal (Clermont-Ferrand), LSIS (Arts et Métiers, Aix), LCFC (Arts et Métiers, Metz), Institut Pascal (Arts et Métiers, Paris), LGI (Centrale Paris), LASMIS (UTT, Troyes), CGS Mines ParisTech, Roberval (UTC, Compiègne), LGéCo (Strasbourg), M3M (UTBM, Belfort), ERPI (université de Lorraine, Nancy), LEPS/STOICA (INSA Lyon), I2M-IMS (Bordeaux), Supméca (Saint-Ouen, Toulon), FEMTO-ST (Besançon).

Communautés scientifiques : réseau national AIP-Primeca, groupe de recherche en tolérancement, réseau EcoSD.

4.1.10. Bibliographie

[1] Simon H. (1996) *The Sciences of the Artificial*, The MIT Press, 3rd Edition, Cambridge, Massachusetts.

[2] McKinsey France (2013) Industrie 2.0 : 5 pistes pour permettre aux industriels français de tirer parti de la mondialisation.

[3] Villeneuve F., Mathieu L. (Editors) (2010) *Geometric Tolerancing of Products*, ISTE, Wiley, ISBN : 978-1-84821-118-6.

[4] Mathieu L., Villeneuve F. (sous la direction de) (2007) *Tolérancement géométrique des produits*, collection IC2-Productique, Hermes, Lavoisier, ISBN : 978-2-7464-1509-2.

[5] Tichkiewitch S., Brissaud D. (Editors) (2004) *Methods and Tools for Cooperative and Integrated Design*, Kluwer, Academic Publishers, 488 pages, ISBN : 1-4020-1889-4.

[6] Brissaud D., Tichkiewitch S., Zwolinski P. (Editors) (2006) *Innovation in Life Cycle Engineering and Sustainable Development*, Springer, 465 pages, ISBN : 1-4020-4601-4.

[7] Tichkiewitch S., Tollenaere M., Ray P. (Editors) (2007), *Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering II*, Springer, 546 pages, ISBN : 978-1-4020-6760-0.

[8] Bernard A., Tichkiewitch S. (Editors) (2008) *Methods and Tools for Effective Knowledge Life-Cycle Management*, Springer, 620 pages, ISBN : 978-3-540-78340-2.

[9] Niemann J., Tichkiewitch S., Weskämper E. (Editors) (2008) *Design of Sustainable Product Life Cycles*, Springer, 209 pages, ISBN : 978-3-540-79081-5.

[10] Norme NF E 01-005 : Produits mécaniques – Méthodologie d'éco-conception.

[11] Norme ISO 14062 : Intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit.
[12] Appel à projet de R&D en écoconception, ADEME, http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc ?cid=96&m=3&id=87685&p1=1
[13] Le pôle écoconception http://www.eco-conception.fr/
[14] Innover en mécanique, l'écoconception, CETIM, http://www.cetim.fr/Prestations/Toutes-nos-prestations/Conception-et-simulation/Integration-de-parametres-specifiques/Eco-conception

4.2. Procédés de fabrication

4.2.1. Descriptif de la thématique

4.2.1.1. Nouveaux procédés

Afin de répondre aux objectifs d'amélioration des performances et de variabilité des produits, de diminution des intervalles de tolérance des pièces produites pour de grandes cadences de production, de réduction des temps et des coûts de fabrication, de réponse aux enjeux écologiques de nouveaux procédés, d'évolution des matériaux, à une maîtrise des phénomènes mis en jeu et aux capabilités des moyens de production et des outillages, de nouveaux procédés doivent être mis en place ou bien les procédés plus classiques doivent être plus performants.

Les procédés de mise en forme par grandes déformations irréversibles (plastiques, viscoplastiques…) permettent d'obtenir une forme finale plus ou moins complexe à partir d'une forme simple qui peut être une tôle (formage de structures minces, formage incrémental, découpage adiabatique), un tube (hydroformage), un lopin massif (forgeage *near net shape* (près des côtes) ou *net shape* (aux côtes)…), une pièce massive à partir de poudres (compactage à grande vitesse, fabrication additive), de métal en fusion (fonderie) ou en état semi-solide (thixoformage), mais également d'assemblage par tous les procédés (soudage, fixations, rivetage, collage…). Pour les matériaux non métalliques, cela peut concerner l'obtention de pièces complexes à partir d'ingrédients comme des fibres, des étoffes, etc., noyés dans une matrice semi-solide.

Les procédés d'usinage à grande vitesse ou de superfinition (rodage, polissage, rectification, galetage…) assurent la réalisation de produits de haute précision, à haute valeur ajoutée et à haut niveau de fiabilité (aéronautique, nucléaire, énergie, prothèses médicales, etc.).

La fabrication additive permet de concevoir différemment (formes « libres » et complexes, pièces à gradient de matériaux ou à propriétés mécaniques évolutives) et de fabriquer des produits avec une vitesse et une qualité inimaginable il y a encore quelques années. Il est désormais possible de réaliser des pièces fonctionnelles unitaires ou en petite série dans des matériaux à forte valeur ajoutée.

La microfabrication couvre les différentes techniques associées à la réalisation de composants microtechniques (pièces de liaison, de structure et d'outillage en

petites dimensions) qui peuvent être classées en deux catégories : les techniques de « salle blanche » (procédés principalement chimiques issus de la microélectronique) et de « salle grise » (procédés plus conventionnels à échelle réduite). Trois axes principaux émergent : le micro-usinage, la micro-réplication et le micro-assemblage.

L'utilisation d'une lumière laser de forte puissance concentrée sur une surface d'interaction réduite (typiquement de 10 µm à 1 mm) permet de transformer la matière sous différentes formes : soudage, découpe, traitements de surface à l'état solide (trempe), matériau à l'état liquide (glaçage/refusion de surface) ou ablatif (choc/laser), en passant par les techniques de fabrication additive de pièces complexes par interaction laser/poudre, macro- ou micro-usinage, permettant de prototyper une structure par un enlèvement de matière contrôlé.

L'optimisation des structures dans les différents secteurs industriels (automobile, naval, ferroviaire, aéronautique et spatial) conduit à une utilisation accrue des assemblages multimatériaux et permet ainsi de répondre à des contraintes nouvelles en termes de performance mécanique, d'allégement des structures, d'intégration de fonctions.

4.2.1.2. Modélisation et simulation numérique (dont assemblage)

La simulation numérique joue un rôle central et permet des progrès colossaux dans le domaine de l'optimisation des procédés de fabrication et de mise en forme, non seulement pour obtenir des pièces conformes aux cahiers des charges, mais également pour réduire les coûts de fabrication ainsi que l'impact des procédés de fabrication sur l'environnement. Elle permet d'éviter l'usage des méthodes purement expérimentales très coûteuses d'essais/correction, en recherchant la gamme de fabrication « optimale » basée exclusivement sur la simulation numérique : « formage ou fabrication virtuelle ». Ainsi, l'ingénieur ne passe à la réalisation d'un essai physique du procédé réel que lorsque le procédé virtuel est satisfaisant. Pour accélérer « la vitesse de convergence » vers le procédé optimal, la méthodologie de formage virtuel doit être à fortes capacités prédictives. Cela implique que la méthodologie de formage virtuel doit reposer sur :

- une modélisation à fort potentiel prédictif sous forme d'équations de mouvement représentatives du procédé et des phénomènes physiques qui s'y développent ;
- des modélisations mono- ou multiéchelles ;
- des méthodes numériques robustes et adaptées à la nature des équations de mouvement (elliptiques, hyperboliques ou paraboliques) pour la résolution globale du problème et à la nature des équations d'évolution des phénomènes dissipatifs ;
- des schémas adaptatifs de discrétisation de l'espace 3D par éléments finis (EF) ou par des méthodes sans maillage (*meshless*) ;
- des « plates-formes » de formage virtuel qui permettent de simuler numériquement toutes sortes de procédés de mise en forme et de fabrication par grandes déformations. Elles doivent permettre de combiner : (i) des modèles discrétisés, (ii) des méthodes numériques appropriées, (iii) des

résultats expérimentaux de validation et (iv) des schémas numériques d'optimisation pour minimiser des fonctionnelles afin de déterminer des paramètres de la modélisation par comparaison avec une base de données de référence (expérimentales) ou pour résoudre un problème de minimisation sous contraintes.

4.2.1.3. Efficacité énergétique

Les procédés de fabrication classiques industriels ont un impact environnemental non négligeable, dû en particulier à leur consommation d'énergie et de matière, ainsi qu'aux effluents et déchets générés. Selon l'Agence internationale de l'énergie, la consommation d'énergie dans l'industrie s'élevait, en 2008, à 27,8 % de la consommation totale d'énergie dans le monde. Un rapport de l'OCDE mettait en évidence dès 1999 qu'il était nécessaire de devenir au moins dix fois plus efficace en termes de matières et d'énergies utilisées par les processus de fabrication d'ici 2050. La recherche de l'efficience énergétique est d'autant plus importante qu'elle fait appel aux objectifs des pouvoirs publics de diminuer les émissions de gaz à effet de serre et doit tenir compte des coûts croissants de l'énergie. Il est donc indispensable que les procédés de fabrication, traditionnels ou innovants, soient analysés de ce point de vue et atteignent cet objectif de forte réduction énergétique.

Quatre stratégies principales sont envisageables afin d'optimiser les performances énergétiques des procédés de fabrication :

- conserver le procédé de fabrication existant en intégrant des contraintes liées à la réduction des consommations énergétiques du système de production, par exemple au niveau des composants ou du processus de fabrication ;
- développer un procédé innovant à partir d'un procédé « traditionnel » basé sur l'enlèvement ou la déformation de matière : suppression de la lubrification et de post-traitement de la pièce et des déchets, découpage et formage *net shape*, assemblage multimatériau… ;
- utiliser des procédés de fabrication alternatifs à ceux traditionnellement employés dans le système de production, par exemple les procédés de fabrication additive ;
- reconcevoir la pièce en tenant compte de la gestion globale du cycle de vie (cf. chapitre « Conception de produits »).

4.2.2. État de l'art

4.2.2.1. Procédés avancés

Pour la fabrication additive, le haut niveau technique et la maturité scientifique indispensables à l'utilisation de ces procédés sont encore des freins à son développement. L'intégration numérique de la fabrication directe dans un contexte moderne multiprocédé est aussi essentielle pour son acceptation et son positionnement dans l'usine de demain.

Pour les procédés laser, on peut distinguer quelques grandes catégories d'applications industrielles :

- les procédés, maîtrisés et largement répandus (marquage laser ou découpe faible épaisseur), pour lesquels peu de recherches sont en cours ;
- la grande majorité des procédés laser, utilisés industriellement, mais dont la physique complexe n'est pas encore complètement décrite et modélisée (soudage laser, découpe forte épaisseur, perçage laser, traitement de surface) ;
- la fabrication additive, qui prend une place grandissante dans les fabrications mécaniques et nécessite encore de nombreux développements pour orienter les choix sur la technologie la mieux appropriée en fonction des applications ;
- des procédés d'origine plus récente (compactage grande vitesse, micro-usinage par impulsions brèves, fusion sélective par laser), dont les développements industriels sont en cours et la physique associée plus embryonnaire ;
- certains procédés, qui ont pu être à un moment donné en avance de phase par rapport au développement des sources laser, comme le renforcement de surface par ondes de choc/laser, dont les principes physiques ont été établis dans les années 1970, mais dont les premières applications aéronautiques (chez GE aux États-Unis) datent de 1996.

4.2.2.2. Modélisation et simulation numérique (dont assemblage)

De nombreux logiciels industriels dédiés à la simulation numérique des procédés de mise en forme sont proposés actuellement. Ils permettent de modéliser et de simuler des procédés 3D : mise en forme de structures métalliques minces ou massives par grandes déformations, usinage par enlèvement de copeaux ou moulage par fonderie, etc. La grande majorité de ces logiciels sont basés sur la MEF et permettent des représentations 3D des procédés avec analyses adaptatives. Quelques logiciels proposent même des résolutions par des méthodes sans maillage (*meshless*). Cependant, les équations de mouvement et de comportement utilisées dans ces logiciels sont à faible pouvoir prédictif et ne permettent pas une représentation fine des nombreux phénomènes physiques et de leurs interactions mutuelles. La tendance qui se développe vise à proposer des logiciels basés sur des modélisations plus fines, et donc plus prédictives, s'appuyant sur les avancées récentes dans de nombreux domaines : sciences des matériaux, mécanique des solides et des structures, analyse numérique.

4.2.2.3. Efficacité énergétique

Une partie non négligeable de l'énergie nécessaire à une machine de production ne s'applique pas entièrement à la réalisation du produit. Cette énergie consommée dépend de l'énergie minimum théorique nécessaire, des rendements et des besoins en alimentation des éléments auxiliaires. On parle alors d'énergie directe et indirecte. L'énergie indirecte est utilisée pour alimenter des fonctions annexes telles que les pompes de refroidissement, les lubrificateurs, les pompes hydrauliques, le changement d'outil, les broches, la commande numérique…

Une autre part importante de l'énergie est également utilisée lors de la phase de mise en route et pour maintenir la machine en état « *ready* », c'est-à-dire avec des conditions optimales pour la production. Dans ce sens, il est important de considérer l'organisation de la production (pièces uniques, petites séries, grandes séries) comme un élément important pour améliorer les consommations énergétiques. Les stratégies opératoires mises en œuvre influencent également la consommation énergétique. L'influence des contraintes imposées (procédé spécifique, configuration) par la conception du produit en fabrication n'est encore que rarement prise en compte dans l'influence des consommations énergétiques. L'efficacité énergétique des procédés passe donc également par des actions sur la conception du produit.

4.2.3. Les orientations nécessaires en fonction des enjeux

4.2.3.1. Procédés avancés

La réalisation de pièces par formage incrémental conduit souvent à des formes très éloignées de leur modèle CAO, en particulier du fait des effets du retour élastique. La majorité des travaux sur le sujet a pour but de prédire la forme finale par des analyses par éléments finis. De plus, il s'agit de modifier les trajectoires de l'outil pour que la pièce finale soit conforme au modèle CAO. Par rapport à l'emboutissage, les étapes de réalisation sont plus flexibles et le réglage des différents paramètres induit des coûts plus faibles, aussi le formage incrémental s'intègre-t-il très bien dans un environnement de production distribué avec des produits hautement personnalisés.

L'un des enjeux majeurs des procédés avancés d'usinage consiste à développer des modélisations des procédés (à plusieurs échelles), de leurs enchaînements/interactions et de leurs conséquences environnementales et fonctionnelles sur les produits. L'utilisation toujours plus grande de matériaux à hautes performances (composite, superalliages, revêtements, etc.), dont l'usinabilité catastrophique impose le développement de nouveaux procédés d'usinage, implique éventuellement la mise en œuvre d'assistances spécifiques (vibrations, cryogénie, laser, etc.), tout en étant respectueux de l'impact environnemental.

L'enjeu primordial de la fabrication additive est la maîtrise complète du procédé et tous les aspects multiphysiques (thermiques, mécaniques…) mis en jeu lors de la fabrication, et cela avec une signature environnementale minimale.

En microfabrication, on cherche à adapter les techniques connues au niveau macro aux échelles micrométriques et prenant en compte les effets d'échelle qui deviennent prépondérants. Les procédés sont alors investigués séparément, mais l'enchaînement et l'hybridation de ces techniques constituent un axe d'amélioration à très fort potentiel. De plus, la miniaturisation des composants produits amènent parfois à une miniaturisation des procédés (notion de micro-usine).

Pour les procédés laser, les enjeux scientifiques portent sur :

– la modélisation numérique multiphysique (perçage et soudage en régime de *key-hole*, fusion sélective d'un lit de poudre), qui mettent en jeu des gradients considérables de température, de pression ou de vitesse ;

– l'étude des phénomènes métallurgiques hors équilibre induits lors de l'interaction laser/matière ;
– la fabrication additive d'architectures complexes et/ou de matériaux à gradients ;
– la fonctionnalisation des surfaces.

Par ailleurs, le laser peut également être utilisé comme une simple source de chaleur très bien maîtrisée, permettant de simuler des cinétiques thermiques locales associées à d'autres champs thématiques ou procédés.

Le développement des nouvelles technologies d'assemblage est limité par un certain nombre de verrous scientifiques :

– la modélisation fiable du comportement de l'assemblage hétérogène en service ;
– la modélisation des assemblages collés et de leur tenue en service ;
– la prise en compte de l'écoconception avec des contraintes de démontage pour recyclage.

4.2.3.2. Modélisation et simulation numérique (dont assemblage)

De nombreux verrous scientifiques s'opposent encore aux développements du formage virtuel :

– s'orienter vers des schémas de modélisation qui dépassent le cadre de la mécanique des milieux continus matériellement simples ;
– mettre plus de physique dans les modèles ;
– disposer de modèles fins indispensables pour développer des structures fortement hétérogènes à architectures contrôlées ;
– déterminer des valeurs des nombreux paramètres intervenant dans les équations de mouvement et dans les modèles de comportement volumiques ou surfaciques ;
– prendre en compte des incertitudes à tous les niveaux de la modélisation : expérimentale, théorique, numérique et même d'utilisation ;
– effectuer des parallélisations massives et mettre en œuvre des méthodes de réduction des modèles ;
– pratiquer des couplages de codes spécialisés pour réaliser des simulations à couplage faible ou chaînage de codes spécialisés.

De plus, concernant la mise en œuvre des méthodes numériques subsistent des verrous de :

– formulation variationnelle de problèmes à grand nombre de fonctionnelles de différentes natures ;
– discrétisation spatiale par éléments finis compatibles avec la description CAO des pièces ;
– traitement numérique des conditions de contact aux interfaces de contact ;
– développement de méthodes d'approximation nodales 3D des champs d'inconnues par EF ou par méthode sans maillage ;

– développement de méthodes robustes de résolution des problèmes de valeurs initiales et aux limites (PVIL) à grand nombre d'inconnues.

4.2.3.3. Efficacité énergétique

Les principaux verrous à lever sont :

– la formalisation des connaissances sur les procédés de fabrication d'un point de vue environnemental, en vue d'optimiser le système de production et la conception du produit. Il est nécessaire de quantifier la consommation énergétique de ces technologies, pour une gestion intelligente du procédé. Dans le cadre des procédés alternatifs, il faut également formaliser l'expertise métier relative à ces technologies afin de repenser la conception du produit, pour permettre au concepteur d'intégrer les contraintes environnementales issues de ces technologies ;
– le développement d'une méthodologie de conception des produits et des systèmes de production innovants, mais il n'existe actuellement pas de moyen pour déterminer a priori la plus pertinente. De plus, dans le cadre des procédés alternatifs, il est souvent supposé que ces procédés ont un impact environnemental réduit, comparés aux procédés traditionnels, mais il est nécessaire d'évaluer plus précisément cet impact, afin de confirmer ou d'infirmer ces alternatives de production ;
– la prise en compte des aspects environnementaux, et plus spécifiquement la consommation énergétique, dans les outils métier de fabrication dédiés, tels que TopCam, Forge, Moldflow, FAO CATIA…, alors que dans d'autres domaines en amont cela est déjà le cas, à l'instar des outils de conception (*solidworks sustainability*), de choix de matériaux (CES EcoAudit) ou d'innovation (Eco-TRIZ). Si l'on fait le parallèle avec les analyses environnementales du cycle de vie, la phase de fabrication est bien souvent négligée, alors que les consommations énergétiques peuvent être importantes dans certains domaines, notamment dans les industries lourdes.

4.2.4. Les verrous technologiques à lever

L'objectif est de disposer de modèles interopérables et d'outils de formage virtuel complets, prédictifs et conviviaux permettant, dans une même analyse adaptative et en fonction de l'état d'avancement, de :

– simuler itérativement un procédé de fabrication jusqu'à l'obtention du procédé optimal validé expérimentalement ;
– optimiser le procédé de fabrication par référence à de nombreux critères : obtenir une forme idéale (sans défaut), minimiser la quantité de matière utilisée, minimiser le nombre de passes (donc le nombre d'outillage) nécessaires à l'obtention de la pièce voulue, maximiser la durée de vie des outillages de fabrication. Tout cela contribue à la recherche d'une gamme de fabrication à faible coût (coût de revient, coût carbone…) ;

– maximiser la durée de vie en service des pièces fabriquées, en fonction des champs mécaniques résiduels dans la pièce en fin du procédé de fabrication. Cela revient à tenir compte de l'histoire des procédés de fabrication des pièces et de son incidence sur leur tenue en service ;
– utiliser des méthodologies et outils de formage virtuel couplant plusieurs logiciels performants pour traiter des problèmes multiphysiques qui peuvent être d'une grande utilité industrielle ;
– créer des plates-formes de formage virtuel à utilisation industrielle conviviales.

4.2.5. Les enjeux industriels et sociétaux par domaines d'application

La mise en forme par emboutissage trouve principalement son champ d'applications dans les productions en grandes séries. Le formage incrémental constitue une alternative pertinente pour les pièces unitaires ou de petite série. Le découpage adiabatique permet quant à lui d'obtenir une qualité proche du découpage fin avec une cadence plus élevée.

Le forgeage *net shape* apporte une réponse à un raccourcissement significatif de la gamme de fabrication d'un produit et lui permet également de limiter sa trace carbone.

Le compactage à grande vitesse est également une voie qui permet de fabriquer des pièces à gradients de propriétés avec un outillage simple.

La fabrication additive constitue une réelle opportunité pour les pièces en petites séries, de formes complexes, qui permet en outre de mixer différents matériaux pour obtenir des pièces à gradients de propriétés dans un délai très court, du fait qu'elle ne nécessite pas d'outillage.

Les enjeux sociétaux de la microfabrication concernent la miniaturisation des produits et la diffusion de produits intelligents capables d'adapter leurs performances à leurs conditions d'utilisation. Les objectifs sont donc la compacité et l'adaptabilité des produits, la limitation des consommations de matières premières et d'énergie, et enfin le développement de produits à très forte valeur ajoutée (comme par exemple des MEMS) pour les domaines de pointe technologiquement et économiquement (transports terrestre, aérien et spatial, médical, luxe, télécommunication, compétition sportive, loisirs électroniques, etc.).

4.2.6. Les liens et concertations nécessaires avec les autres disciplines

Les procédés de fabrication mobilisent des connaissances scientifiques de différents domaines avec une vision multiprocédé, multiphysique et multiéchelle, afin de répondre à des problématiques et de lever les verrous technologiques associés :

– science des matériaux, métallurgie physique, solidification rapide (laser) ;
– thermique et mécanique des fluides (laser, soudage) ;

– mécanique des solides et des structures : milieux continus généralisés, thermodynamique physique, modélisation des structures mécaniques ;
– mathématiques : algèbre et analyse tensorielle, EDO et EDP ;
– mathématiques appliquées : méthodes numériques pour la résolution des EDP et EDO, algorithmie géométrique ;
– modélisation géométrique et CAO ;
– conception de produits : règles et méthodologies de conception, conception des machines ;
– automatisation, surveillance, systèmes adaptatifs.

4.2.7. La position française par rapport à l'international

4.2.7.1. Procédés avancés

La fabrication additive est un procédé jeune (milieu des années 1980) qui s'est principalement développé en Allemagne, en Grande-Bretagne et aux États-Unis. Ces pays gardent une avance technologique dans le domaine de la conception/fabrication et vente de machines de fabrication additive. Dans le domaine de la recherche, trois pôles se détachent : les États-Unis, l'Europe et l'Asie. L'Europe se distingue principalement par ses travaux de recherche sur les poudres métalliques. Depuis une dizaine d'années, plusieurs laboratoires français ont investi cette thématique avec une complémentarité qui devrait être, si une structuration est mise en place, un point fort dans la décennie à venir.

En microfabrication, la concurrence internationale est surtout japonaise, américaine, danoise et plus récemment chinoise. FEMTO-ST possède et développe une plate-forme alliant salle blanche et salle grise unique en Europe. La communauté française est depuis peu bien positionnée dans les réseaux I2M2 (États-Unis/Japon) et 4M (Europe).

Pour ce qui est des constructeurs de lasers de puissance, et en particulier des lasers continus, l'Allemagne fait actuellement figure de leader (Haas-Trumpf, Rofin-Sinar), même si la France est assez bien positionnée sur des marchés de niche (cas des lasers impulsionnels nanoseconde : Thales Optronique, Quantel, Amplitude). Les procédés laser connaissent une progression régulière sur le territoire français depuis une vingtaine d'années, qui évolue au gré des innovations technologiques et des demandes industrielles. Toutefois, et même si les thématiques sont riches et les enjeux industriels réels, le nombre de personnes concernées, le volume des études/recherches menées sur le sujet et le nombre d'applications industrielles recensées est loin d'atteindre celui de nos voisins allemands, en particulier à travers le support des instituts Fraunhofer, et des constructeurs de sources laser.

4.2.7.2. Modélisation et simulation numérique (dont assemblage)

La communauté française de formage virtuel, bien que relativement petite, est très active et très présente sur la scène internationale. Elle est très impliquée dans l'organisation de nombreuses conférences internationales dédiées aux procédés de fabrication et de mise forme en général, et à la simulation numérique de ces

procédés, telles que ESAFORM, NUMIFORM, NUMISHEET, IDDRG, ICTP, Metal Forming. Elle est également très impliquée dans le journal lié à ESAFORM et intitulé *International Journal of Material Forming*, ISSN 1960-6206 (Elsevier).

Les chercheurs français dans le domaine de la modélisation et de la simulation numérique des procédés de fabrication et de mise en forme sont à l'origine de nombreux développements scientifiques majeurs dans le domaine : modèles de comportement avancés macro et micro/macro en transformations finies, méthodes numériques adaptées aux grandes déformations, maillage adaptatif des structures subissant de grands changements géométriques, développement de logiciels entiers dédiés à la simulation des procédés de mise en forme comme FORGE, PAM/STAMP, etc., ou de routines dans le cadre de plates-formes généralistes (ABAQUS, LS-DYNA, DEFORM…).

4.2.7.3. Efficacité énergétique

Des travaux de recherche sont actuellement menés par le groupe de travail du CIRP « Energy and Resource Efficiency & Effectiveness » qui associe 25 partenaires universitaires et industriels dans le monde afin de proposer une base de données.

4.2.8. Recommandations et perspectives

4.2.8.1. Procédés avancés

En formage incrémental, il est nécessaire de développer des méthodes et des techniques permettant d'optimiser les performances du procédé afin d'assurer l'intégrité des tôles formées (parcours d'outil, paramètres de programmation…).

Pour les procédés de mise en forme *net shape*, l'objectif est de maîtriser les nouveaux procédés afin d'obtenir des pièces précises tout en élargissant le spectre des matériaux mis en forme : thixoforgeage, forgeage multimatériau, emboutissage à mi-chaud, découpage adiabatique, moulage de poudre par injection, moulage/forgeage. Une seconde voie concerne la diminution des coûts de fabrication par la réduction de l'engagement matière par le forgeage en continu, par le laminage transversal… mais aussi la limitation de l'utilisation de lubrifiant durant les opérations de mise en forme. Une troisième voie se concentre sur l'interaction produit/processus de fabrication, poursuivant ainsi l'évolution des industries de la mécanique allant d'entreprises de sous-traitance vers des entreprises de cotraitance. Cette évolution s'accompagne de méthodologies de conception de produits faisant émerger la réalisation de corps creux ou encore l'assemblage/forgeage. La dernière voie concerne la mise en place de processus mixtes, c'est-à-dire le couplage de procédés de mise en forme à chaud puis à froid, ou encore l'insertion d'une opération d'usinage au sein de gammes de forgeage pour augmenter les propriétés d'emplois des produits finis.

En ce qui concerne la fabrication additive, les travaux de recherche et développement à entreprendre portent principalement sur :

– les matériaux utilisés : poudres ou fils (qualification en regard de l'application : forme, dimension, composition) ;

– les principes physiques : interaction laser/matière (relation paramètres procédé/matériaux/géométrie) ;
– les produits obtenus : structure mono- ou multimatériau (qualifications métallurgiques et mécaniques des produits) ;
– le pilotage numérique de la fabrication (normalisation, trajectoires de dépose, insertion dans un concept numérique global).

En ce qui concerne la microfabrication, les verrous technologiques portent principalement sur :

– la réalisation de géométries à haut facteur de forme ;
– le respect et la caractérisation de tolérances très serrées ;
– l'assemblage des microcomposants ;
– les mesures de caractérisation ou de surveillance à haute sensibilité et haute fréquence ;
– le développement d'outils et de stratégies adaptés aux opérations ;
– l'utilisation combinée de différents procédés (hybridation) ;
– le développement de moyens de production et de simulation transférables industriellement.

4.2.8.2. Modélisation et simulation numérique (dont assemblage)

– Favoriser une véritable transversalité des recherches en renforçant les collaborations entre les communautés des sciences des matériaux, de mécanique des matériaux, de mécanique des solides et des structures, de mathématiques appliquées, de CAO, etc., indispensable moteur à l'innovation scientifique et technologique.
– Chercher le bon équilibre entre développements scientifiques fondamentaux et développements applicatifs en favorisant le transfert des technologies innovantes au profit des industries de la mise en forme.
– Encourager la communauté industrielle de la mise en forme à utiliser des méthodologies innovantes de formage virtuel, en mettant à sa disposition des plates-formes intégrant les tout derniers développements scientifiques.
– Donner les moyens humains et matériels aux chercheurs français pour qu'ils soient force de propositions innovantes dans ce domaine.
– Entretenir et renforcer la présence de la communauté française sur la scène internationale par une participation accrue dans des comités et consortium européens et internationaux.

4.2.9. Les laboratoires concernés

Procédés avancés : G-SCOP (Grenoble), IRCCyN (Nantes), LURPA (ENS Cachan), Institut Pascal (Clermont-Ferrand), LSIS (Arts et Métiers, Aix), LCFC (Arts et Métiers, Metz), LCPI (Arts et Métiers, Paris), LGI (Centrale Paris), LASMIS (UTT, Troyes), COSTECH (UTC, Compiègne), LGéCo (Strasbourg), M3M (UTBM,

Belfort), ERPI (université de Lorraine, Nancy), LEM3 (Arts et Métiers, Metz/université de Lorraine), LEMTA/université de Nancy, LaMCoS (Lyon), LEPS/STOICA (INSA Lyon), LaBoMaP (Arts et Métiers, Cluny/ECAM), LISMMA (Aix-Marseille), SYMME (Annecy), Supméca (Saint-Ouen/Toulon), FEMTO-ST (Besançon), Institut P' (Poitiers), LAMPA (Arts et Métiers, Angers), Institut Clément-Ader (Toulouse), IM2 (Bordeaux), IFREMER (Brest), LBMS (Brest/ENSIETA), LGP/ENIT (Tarbes), PIMM (Arts et Métiers, Paris), Centre des matériaux (Mines Paris), Navier (Marne-la-Vallée), LCPO (Bordeaux), IMP (INSA Lyon), LPIM (Mulhouse), ICMMO (Orsay), PPMD (Paris), CIRIMAT (Toulouse), ONERA (Paris), LMT (ENS Cachan), Rescoll, LERMPS (UTBM), DIPI à l'ENISE (Saint-Étienne), CETIM, Institut de soudure, PEP, IRPHE (Marseille), LOMA (Bordeaux), IREPA-Laser (Illkirch), ICB-LTM (Le Creusot).

Les seize laboratoires français impliqués dans le procédé d'usinage de ces enjeux sont structurés au sein du consortium Manufacturing 21.

Modélisation et simulation numérique : CEMEF Mines ParisTech, LASMIS UTT, Roberval UTC, ENSAM ParisTech Paris et Angers, FEMTO-ST Besançon, GeM Nantes, LMT Cachan, CdM Mines ParisTech, LTDS site de Saint-Étienne, LEM3 Metz, LaMCoS INSA Lyon, URCA Reims, TEMPO Valenciennes.

4.2.10. Bibliographie

Procédés *net shape*

Dean T. A., The net-shape forming of gears, *Materials & Design*, vol. 21, p. 271–278, 2000.

Bigot R., Becker E., Langlois L., Some approaches on industrialization of steel thixoforging processes, *Solid State Phenomena*, vol. 192–193, p. 521–526, 2013.

Hirt G., Khizhnakova L., Baadjou R., Knauf F., Kopp R., Semi-solid forging aluminium and steel, Introduction and overview, in *Thixoforming : Semi-solid Metal Processing*, Ed. by G. Hirt and R. Kopp, published by Wiley, p. 1–27, 2009.

Modélisation et simulation numérique (dont assemblage)

Wagoner R.H., Chenot J.L., *Metal Forming Analysis*, Cambridge University Press, Cambridge, 2001.

Dixit P.M., Dixit U.S., *Modeling of Metal Forming and Machining Processes by Finite Element and Soft Computing Methods*, Springer-Verlag, London, 2008.

Chinesta F., Cescotto S., Cueto E., Lorong P., *La méthode des éléments naturels en calcul des structures et simulation des procédés*, Hermes, Paris. 2009.

Saanouni K., *Modélisation et simulation numériques en formage virtuel*, Hermes, Paris, 2012.

Efficacité énergétique

http://www.iea.org/stats/index.asp

Energy, the Next Fifty Years, OECD, 1999.

Gutowski T., Dahmus J., Thiriez A., Electrical energy requirements for manufacturing processes, 13th CIRP International Conference of Life Cycle Engineering, Lueven, May 31st–June 2nd, 2006.

4.3. Production mécanique

4.3.1. Descriptif de la thématique

L'objectif est la réalisation de produits physiques vendus à des clients et répondant à des besoins en termes de performances, de service, de qualité, de quantité, de délai, de réactivité, de coût (achat, exploitation, fin de vie). Ces produits sont généralement constitués d'ensembles, de sous-ensembles, de composants de matériaux diversifiés, possédant une géométrie, une morphologie et des dimensions préalablement définies (complètement ou partiellement). Cette fabrication de produit met en œuvre des procédés physiques, mécaniques, thermiques, chimiques qui modifient la forme et les propriétés du produit en volume ou en surface suivant un processus (suite ordonnée d'opérations) et mettant en œuvre des ressources (machines, outillage…) dédiées ou possédant des fonctionnalités plus universelles. La qualification (mesure, indicateurs) des produits réalisés, en cours et en fin de fabrication, est indispensable afin de répondre aux exigences préalablement définies.

Un point important est la prise en compte de l'Homme, à la fois par ses connaissances, compétences, savoir-faire et son interaction directe avec les équipements de production.

4.3.2. État de l'art

4.3.2.1. Développement de nouveaux procédés, maîtrise des procédés

Les recherches scientifiques sur les procédés traditionnels (usinage, fonderie, déformation plastique, traitement de surface, assemblage) comme sur de nouveaux procédés appliqués à de nouveaux produits (composites, électronique...) ont permis de mieux maîtriser les procédés et de maîtriser les technologies de production (diminution de la variabilité, diminution de l'engagement matière, réponse aux besoins de qualité ou d'évolution des produits plus difficiles à mettre en œuvre.

L'industrialisation de procédés nouveaux porte soit sur des améliorations incrémentales de procédés existants afin d'en augmenter les performances (par exemple usinage huit axes, soudage hybride, etc.), soit sur des procédés nouveaux, issus des travaux de R&D de laboratoires publics ou privés (par exemple friction *stir welding*, découpage à très grande vitesse, etc.).

4.3.2.2. Les connaissances en industrialisation de produits et procédés implémentées dans les logiciels de préparation et de simulation (virtual manufacturing)

Les connaissances sur les procédés (bases de données, modèles de comportement, domaines de validité), leurs conditions de mise en œuvre, le comportement des équipements ont permis de développer des outils logiciels de préparation du travail (FAO, usinage par exemple), de prédiction de la qualité des pièces réalisées (simulation procédé de mise en forme, fonderie) afin d'assister le concepteur (*design for manufacturing*) pour la conception du produit et pour l'industrialisation des produits (*Computer Aided Manufacturing*, *Computer Aided Engineering*).

Il fallait formaliser des connaissances métier liées implicites, imprécises et incertaines tout en prenant en compte les connaissances plus formelles scientifiques et technologiques. Il s'agit de prendre en compte simultanément les contraintes technologiques, économiques, logistiques, environnementales. Les outils utilisés actuellement restent dédiés. L'approche plus globale (produit, ressources, procédé, processus...) est apportée par l'expertise de l'utilisateur.

4.3.2.2.1. Optimisation de l'ingénierie et de la production

Cet aspect porte à la fois sur les outils et méthodes de conception, de validation, de mise en œuvre à différents niveaux : conception produit et systèmes de production, pilotage de la production, collaboration entre acteurs (services, entreprises…) mettant en œuvre les modèles méthodes et outils d'optimisation.

L'exploitation de ces données nécessite la mise en œuvre de méthodes et outils d'optimisation pour la prise de décision, l'établissement des données de conduite de la production, le pilotage des flux de produits, la prédiction de la qualité et des performances des produits et moyens de production.

4.3.2.2.2. Développement de nouveaux moyens de production et d'implantation des systèmes de production

Le passage, plus ou moins rapide selon les secteurs d'activité, d'un modèle de production de masse vers des systèmes flexibles adaptés à la production de multiples versions d'un produit a conduit au développement de moyens de production et de leur implantation assurant une plus grande réactivité et variété de produits (îlots de fabrication, ligne flexible...) avec une intervention humaine réduite (automatisation des tâches de production), assistée (identification de composants en fonction des produits, interfaces Homme/machine, virtualisation d'opérations…).

L'utilisation des robots industriels concernent les chargement et déchargement des machines, le soudage par points ou le soudage continu, la peinture, l'assemblage et l'usinage dans un certain nombre de cas.

Au niveau des équipements, la réduction des effets mécaniques, thermiques, vibratoires, etc., sur la qualité des pièces comme des performances des équipements (vitesse, précision, machine à grande vitesse…) conduit au développement de nouveaux composants ou de nouvelles architectures de machines (architecture parallèle), de nouveaux matériaux (bâti béton…).

4.3.2.2.3. Automatisation des machines

Les moyens de production ont évolué vers plus d'automatisation et de flexibilité au niveau des machines (machine à commande numérique, robot, lignes de fabrication pilotées par automates programmables, îlot de fabrication flexible...), des moyens de manutention (chariots filoguidés, robots…). Ces moyens ont suivi les évolutions technologiques en mécanique, électrique, hydraulique, pneumatique, électronique, informatique… Une plus grande instrumentation des équipements afin de contrôler (adaptation des conditions opératoires en fonction des mesures d'effort, de puissance, de vibration en temps réel) la qualité en temps réel (éventuellement à distance) s'est développée. Ainsi, dans le domaine du contrôle/commande, on est passé ces vingt dernières années des armoires de commande entièrement électromécaniques aux automates programmables, du câblage filaire classique aux réseaux industriels, des boutons poussoirs et autres sélecteurs manuels à des écrans tactiles… Une autre évolution concerne l'utilisation des NTIC appliquée au domaine de la conduite ou de la maintenance des équipements de travail (télémaintenance, vidéo assistée, réalité augmentée…).

4.3.2.2.4. Augmentation des contrôles/commandes en cours de fabrication

Les points, procédures et moyens de contrôle (contrôlabilité des procédés, équipements, des flux de produits) en cours et en fin de fabrication, de façon à réduire les rebus, à réagir le plus tôt possible, à diminuer la variabilité des produits, se sont développés (*Statistical Process Control*, *Failure Modes*, *Effects and Criticality Analysis*…), ou afin d'optimiser plus globalement la production en fonction des contraintes et des besoins et d'assurer la traçabilité des produits et des processus. Le pilotage de la fabrication ou la simulation pour la prise de décision à partir de ces informations est alors possible en fonction des informations disponibles (« *intelligent products* ») afin d'augmenter l'agilité du système de production. L'intervention à distance sur les équipements en vue de la maintenance, du changement de programme de fabrication, etc., est possible (augmentation de la contrôlabilité).

4.3.2.3. Interaction entre l'Homme et la machine, outils de virtualisation

On constate le développement de la réalité virtuelle ou augmentée disposant d'interfaces visuelles, haptiques, etc., afin d'étudier les interactions (physiques, cognitives…) entre l'Homme immergé dans son environnement de travail et les équipements.

L'un des grands objectifs des années 1980 était l'usine sans Homme suite à des projets vitrines japonais. Force est de constater que cette idée ne s'est pas développée, compte tenu de la complexité (multiplicité des interactions) et de la contextualisation des problèmes de fabrication, de l'importance des savoir-faire, de la diversité des compétences et connaissances. La prise en compte des facteurs humains restent encore insuffisante, notamment dans la définition des interactions Homme/machine. Elle constitue un enjeu important vis-à-vis de la prévention des risques professionnels (progression rapide des TMS, du stress au travail, du vieillissement de la population active…).

La diversité de qualification des opérateurs et l'évolution permanente des produits et des technologies imposent l'adaptation constante du poste de travail.

La tendance s'est donc orientée vers une plus grande convivialité des interfaces et la maîtrise de l'interaction Homme/machine en gardant le niveau de sécurité (intégration des robots en production, coopération Homme/robot, robot d'assistance physique).

4.3.3. Les orientations nécessaires en fonction des enjeux

Les entreprises et les systèmes de production sont pris dans un nouveau contexte, encore plus complexe qu'auparavant, où contraintes et objectifs se déclinent différemment, voire sont nouveaux :

- les notions de performance et d'efficacité se sont élargies. Cette performance doit être assurée dans un environnement où les incertitudes et les variabilités techniques, économiques, sociétales, humaines n'ont jamais été aussi importantes ;
- le rythme de l'évolution des technologies et des connaissances scientifiques associées, ainsi que leur diffusion massive sont des sources permanentes d'innovation ;
- le renforcement des phénomènes de mise en réseau des firmes et l'éclatement géographique des activités, sont à la fois source d'efficacité, riches d'innovation, mais aussi source de fragilité et d'abandon de responsabilités locales ;
- la demande sociétale de développement durable, les exigences variées, pressantes et changeantes du client pilotent la production ;
- les ressources limitées en matière et en énergie.

Ainsi les enjeux de recherche associés, outre l'aspect maîtrise de l'interaction matériaux procédés (physique, modélisation et simulation, cf. procédés de fabrication), sont variés et portent sur :

- l'industrialisation des nouveaux procédés : intégration/conception produit et systèmes de production, procédé de fabrication, identification des domaines de fonctionnement en fonction des matériaux, des produits, interaction avec les utilisateurs ;
- les modèles les plus représentatifs du comportement réel des produits, procédés et équipements interopérables ;
- l'identification du comportement statique et dynamique des machines et robots, le développement de nouvelles cinématiques, le pilotage référencer capteur… ;
- la pertinence des modèles, avoir la bonne connaissance et sous la bonne forme au moment opportun, et élever le niveau de maturité de ces systèmes à base de connaissances ;
- les modèles multiéchelles, multipoints de vue et multiphysiques intégrant les aspects technologiques, économiques, logistiques, humains, sociétaux ;
- la variété des représentations, les outils de traitement intégrés de ces multireprésentations (analytique, numérique, topologique, exprimée dans un langage structuré ou non, imprécis…) ;

- les méthodes d'aide au choix à partir de ces multireprésentations ;
- la plus grande maîtrise des incertitudes et de la variabilité, la prise en compte des incertitudes des modèles et des informations disponibles, des domaines de validité ;
- la formalisation et la structuration des connaissances métier pour : réaliser (conception, fabrication, pilotage), décider (en conception/mise au point, en pilotage/exploitation) et créer de nouvelles connaissances (indispensables à l'innovation) ;
- la simulation numérique (fabrication virtuelle, *virtual manufacturing*) pour l'évaluation prédictive et intégrée des performances du produit et du système de fabrication mettant en œuvre des modèles représentatifs (produits, procédés, équipements...), assurant la réduction des expérimentions et de la réalisation de prototypes, la réduction des temps d'étude et d'industrialisation, des temps de montée en production, la validation du pilotage de la production, l'analyse des situations de travail, dans un contexte multivue, multiéchelle et pluridisciplinaire ;
- les mécanismes de traçabilité et de partage ;
- des systèmes Homme/machine apprenants et autoapprenants ;
- les systèmes de production agiles et adaptatifs, usines « intelligentes » ;
- les micro- et nanofabrication robustes en grande série ;
- la manipulation rapide ou fine, la cobotique, la coopération Homme/robot la robotique mobile ;
- l'intégration et l'automatisation de procédés hétérogènes, la fabrication automatisée de structures composites ;
- la manipulation et l'inspection des pièces (de très petites aux très grandes dimensions, chaudes, flexibles…) avec une très grande précision en grande série ;
- la mécatronique : machines intelligentes (monitoring, diagnostic), interaction Homme/machine, utilisation de l'ubiquité grâce aux interfaces mobiles et interactives ;
- l'intégration de fonctions cognitives (maintenance, pronostic préprogrammé, adaptation à l'environnement de l'atelier…) dans les équipements, la collaboration Homme/machine multimodale, interaction symbiotique ;
- la gestion du cycle de vie des systèmes de production.

4.3.4. Les verrous technologiques à lever

Le défi des technologies de rupture concerne tous les domaines : matériaux (nanomatériaux…), les procédés (de haute énergie comme ceux basés sur les lasers telle la texturation de surface par exemple), les machines (architecture, systèmes de contrôle/commande...), de nouveaux concepts de production (*desktop factories*, *micro-factory*, usine agile…).

Les *drivers* d'évolution des technologies sont :

- la capacité à s'adapter rapidement à l'évolution des matériaux, des technologies, des besoins, des marchés ;

- l'augmentation de la qualité et des performances (produit, procédé, système) exigées ;
- l'évolution vers une échelle plus microscopique ;
- la plus grande maîtrise des incertitudes et de la variabilité ;
- la traçabilité des produits et des processus ;
- l'augmentation de la contrôlabilité des procédés et équipements ;
- l'association de procédés ;
- l'évolution des produits : diminution du poids, pluritechnologiques (mécanique, électronique, logiciel), multi-matériaux, modularité, customisation ;
- la fabrication sans rebus, *net shape*, réduction de l'utilisation de matières premières ;
- plus grande interaction entre l'Homme et la machine ;
- réduire les expérimentations, la réalisation de prototypes, le temps d'étude et d'industrialisation, le temps de montée en production en s'appuyant sur des modèles de plus en plus représentatifs du réel ;
- l'optimisation (énergétique et environnementale) des procédés, moyens de production et processus industriels.

4.3.5. Les enjeux industriels et sociétaux par domaines d'application

Dans le contexte de la situation industrielle présentée au début de ce Livre blanc, les systèmes de production se trouvent confrontés aux tendances lourdes du monde économique : la forte croissance des pays émergents, la mondialisation de la production et des échanges, le changement climatique, et les nuisances environnementales, le vieillissement de la population.

Cela doit se traduire par l'apport de réponses aux mutations industrielles :

- une performance industrielle en phase avec les attentes de la société : sécurité d'emploi, bien-être au travail, respect de l'environnement, économie d'énergie et de matières premières ;
- l'arrivée de technologies clés génériques : maîtrise de la production (phénomènes physiques, technologie, chaîne de production), l'intelligence véhiculée par les produits eux-mêmes et par l'interaction avec l'utilisateur.

4.3.6. Les liens et concertations nécessaires avec les autres disciplines

Tous les points identifiés ne sont pas de même nature, et la science ne peut les aborder qu'avec un ensemble de partenaires venant d'horizons disciplinaires complémentaires : les sciences de l'ingénieur, les sciences et technologies de l'information et la communication doivent coopérer avec des gestionnaires, des économistes, des sociologues et des ergonomes, les industriels avec les chercheurs. Cette fragmentation en disciplines a été préjudiciable au développement d'une vision intégrée des systèmes de production. Il s'agit de s'appuyer sur cette diversité

d'expertises complémentaires pour les mettre en synergie dans une vision commune et partagée. Ils ne peuvent être abordés de manière isolée tant ils ne font sens que tous ensemble. Seule une approche système permet d'appréhender la complexité des systèmes de production. La pensée « cycle de vie » doit irriguer la recherche pour proposer des solutions durables satisfaisant toutes les parties prenantes.

Concernant les sciences de l'ingénieur, les systèmes de production associent à la fois la conception du produit et mettent en œuvre des procédés de fabrication mécanique ou physico-chimiques. Ils mobilisent les technologies de l'information et de la communication ainsi que les technologies de l'automatique (capteurs, commande).

4.3.7. La position française par rapport à l'international

La position française reste globalement en retrait au niveau international. On constate des analyses et réflexions sur les systèmes de production du futur dans tous les pays industrialisés et des actions incitatrices fortes associées.

4.3.8. Recommandations et perspectives

Pour un grand nombre de points, les tendances du passé vont se poursuivre, mais avec la prise en compte forte des contraintes liées à la disponibilité des matières premières, la réduction de la consommation énergétique, l'impact environnemental, la réduction des rebus, la prise en compte de la fin de vie des produits, l'augmentation de l'emploi industriel.

Outre les points précédents, les facteurs de rupture portent sur l'adaptation rapide au marché, la personnalisation de masse, l'économie circulaire, la servicisation et l'économie de fonctionnalité, la territorialisation de la production, la miniaturisation, les produits multitechnologiques, l'intégration des fonctions de service associées au produit, le développement de nouvelles compétences, les communautés d'acteurs à forte interopérabilité, l'innovation devenue un processus continu essentiel au positionnement concurrentiel des entreprises et à leurs performances.

Des outils de simulation virtuelle intégrant les connaissances scientifiques et technologiques de plus en plus performants et représentatifs de la réalité seront mis en œuvre.

La participation de l'Homme (*human centric manufacturing*) constitue un changement important de paradigme. Un autre aspect est le développement des moyens directs de communication entre l'opérateur et l'équipement, et qui permettent à l'opérateur de commander et de contrôler son fonctionnement dans différentes situations.

En termes de signaux faibles, l'évolution de la demande et des besoins des consommateurs (spontanée ou orientée), par exemple en fonction de la sensibilité aux facteurs écologiques, peut conduire à des infléchissements. Le besoin des personnes de rechercher des emplois proches de leur lieu d'habitation ou du travail à distance peut conduire à des évolutions et à l'adaptation des outils de production.

4.3.9. Les laboratoires concernés (production mécanique)

G'Scop (Grenoble), IRCCyN (Nantes), LURPA (ENS Cachan), Institut Pascal (Clermont-Ferrand), LSIS (Arts et Métiers, Aix), LCFC (Arts et Métiers, Metz).

4.4. L'usine du futur

4.4.1. Un nouveau concept

L'usine du futur est un concept générique d'usine idéale, qui s'inscrit dans une prise de conscience générale de l'importance de l'industrie manufacturière dans la richesse nationale. Celle-ci se traduit par une volonté politique d'avoir des usines sur le territoire afin de garantir la compétitivité des pays industrialisés de longue date. Cette réflexion est destinée à conserver et développer en France, et donc en Europe, une activité industrielle forte, innovante, exportatrice, créatrice de richesses et génératrice d'emplois.

Une quatrième révolution industrielle est en marche, fondée sur l'accroissement de la vitesse de traitement de l'information et sur le développement massif des réseaux de communication. Cette nouvelle mutation technologique se caractérise par une interconnexion totale des machines et des systèmes au sein des sites de production, entre les sites et avec l'extérieur. Une nouvelle organisation des moyens de production, aussi bien au stade de l'approvisionnement que de la fabrication et de la diffusion des produits, va se mettre en place.

Le concept repose notamment sur des critères économiques et des objectifs à atteindre pour que l'usine se développe, crée de la richesse partagée et maintienne les emplois.

Les besoins des clients évoluent : on passe d'un marché de masse à un marché de l'offre personnalisée, donc d'une production à grande échelle à une production de petite ou moyenne série, facilement reconfigurable, voire adaptative.

Le concept prend en compte les réflexions sur les critères d'acceptabilité pour les citoyens d'implantation ou de maintien d'une usine à proximité de leur habitation. Pour limiter les déplacements des personnes et réduire ainsi leur impact environnemental, l'usine du futur devra se rapprocher des lieux d'habitation et refaire partie de l'environnement quotidien des citoyens.

L'usine du futur sera encore plus respectueuse de l'environnement : moins d'énergie consommée, moins de ressources primaires utilisées, plus de ressources recyclées, moins de rejets. Elle prend en compte dès les phases de conception l'analyse du cycle de vie des produits et intègre l'ensemble des notions de l'économie circulaire.

Enfin, l'usine du futur donnera une image attractive pour les jeunes générations de l'entreprise. Le devenir des systèmes industriels et des systèmes de production, trop souvent abordé par le seul décompte des emplois supprimés et des fermetures d'usines, redevient un enjeu de développement des sociétés française et européenne.

4.4.2. Les besoins sociétaux

Le nouveau modèle d'usine est pensé pour être au cœur de son écosystème et répondre aux nouveaux besoins sociétaux :

– un nouveau modèle d'usine compétitive, performante, sûre et attractive ;
– une usine tournée vers ses clients, capable de produire les solutions complètes avec les services associés ;
– une usine centrée sur l'humain, pour mieux prendre en compte les attentes des riverains et des collaborateurs, mieux attirer les talents dont elle a besoin, mieux prendre en compte le vieillissement de la population ;
– une usine agile, disposant de modes de production flexibles et d'outils de production reconfigurables ;
– une usine capable de fournir des produits et services individualisés, durables, à des prix compétitifs, en petites et moyennes quantités ;
– une usine propre, silencieuse, impliquée dans son écosystème industriel, économe en matières premières et en énergie.

L'usine du futur est un projet majeur, moderne, emblème du renouveau industriel français.

4.4.3. Le contexte technologique

Pour répondre à ces besoins, l'usine du futur s'appuie sur un nouveau contexte technologique, avec :

- le rôle majeur des TIC qui permettront d'aller vers l'usine numérique :
  - o pour une communication continue, instantanée et intégrée,
  - o pour modéliser puis simuler le produit, le *process* et même l'usine,
  - o pour l'autodiagnostic et le contrôle en continu en production,
  - o pour la maintenance prédictive et corrective planifiée ;
- des nouveaux procédés ou modes de fabrication :
  - o fabrication additive,
  - o injection métallique,
  - o fabrication industrielle de poudres céramiques ou métalliques ;
- des robots de plus en plus coopératifs et collaboratifs ;
- des nouveaux matériaux (matériaux intelligents, nanomatériaux…) ;
- des capteurs (miniaturisés, communicants, en autonomie décisionnelle...) qui permettront de rendre intelligents les systèmes de production et les produits.

Ce sont donc les équipements conçus et fabriqués par les industriels mécaniciens qui devront eux-mêmes évoluer et porter les innovations nécessaires pour répondre aux besoins des usines du futur de tous les secteurs industriels.

Secteur transversal, les industries mécaniques sont donc des acteurs centraux de l'usine du futur.

4.4.4. Bibliographie

- Report to the President on Ensuring American Leadership in Advanced Manufacturing, Executive Office of the President, President's Council of Advisors on Science and Technology, June 2011.
- A National Strategic Plan for Advanced Manufacturing, Executive Office of the President National and Technology Council, February 2012.
- Report of the Interagency Working Group on Manufacturing R&D, Manufacturing the Future, Federal Priorities for Manufacturing R&D, National Science and Technology Council (USA), March 2008.
- Factories of the future. Strategic Multi-annual Roadmap, Industrial Advisory Group FoF, 2010, www.effra.eu.
- Consiglio Nazionale delle Ricerche, Flagship Project 2011–2013, Factory of the Future, National Manufacturing Platform (Italie).
- FUTURPROD : les systèmes de production du futur, Atelier de réflexion prospective de l'ANR, www.cluster-gospi.fr.

Annexe
Liste des laboratoires et organismes

Les listes ci-dessous ne sont pas exhaustives, elles ne concernent que les laboratoires publics et organismes cités par les auteurs qui ont contribué à la rédaction des articles de ce Livre blanc.

Il s'agit de listes élaborées à la date d'édition. Pour obtenir une liste plus récente, le lecteur est invité à se connecter au site de l'AFM www.afm.asso.fr, espace adhérents.

Laboratoire	**Organisme**	**Ville**	**Chapitres** *Livre blanc*
B2OA – UMR 7052-	Université Paris 7	Paris	3.9
Biomécanique et bio-ingénierie – UMR 7338	UTC	Compiègne	3.9
CEAT	Université de Poitiers ENSMA	Poitiers	3.5, 3.10
CEMEF – UMR 7635	CEMEF – Mines ParisTech – École des mines	Sophia Antipolis	3.7, 3.14, 3.15, 4.2
Centre des matériaux – UMR 7633	Mines ParisTech	Évry	3.4, 3.14, 3.15, 4.2
CGS	Mines ParisTech	Paris	4.1
CIRIMAT – UMR 5085	Université de Toulouse III	Toulouse	4.2
DIPI	ENISE	Saint-Étienne	4.2
DYNFLUID	ENSAM, CER	Paris	3.11
EMC2 – UPR 288	École centrale	Paris	3.11, 3.13
ENSMP	Mines ParisTech	Paris	3.6
ERPI	Université de Lorraine	Nancy	4.1
FAST – UMR 7608	École polytechnique	Palaiseau	3.2
GEM – UMR 6183	École centrale	Nantes	3.4, 3.6, 3.14, 3.15

Laboratoire	Organisme	Ville	Chapitres *Livre blanc*
Génie des systèmes mécaniques	UTC	Compiègne	3.17
G-SCOP – UMR 5272	INPG	Grenoble	4.1, 4.2, 4.3
I2M – UMR 5295	Université Bordeaux	Bordeaux	3.4, 3.10, 3.12, 3.15, 3.16, 4.1, 4.2
I3M – UMR 5149	Université Montpellier II	Montpellier	3.11
ICB-LTM – UMR 6303	Université de Bourgogne	Le Creusot	4.2
ICMMO	Université Paris-Sud	Orsay	4.2
IMFT – UMR 5502	IMFT	Toulouse	3.1
IMP – UMR 5223	INSA	Lyon	4.2
Institut Clément-Ader – EA 814	Université Toulouse III	Toulouse	3.4, 3.6, 4.2
Institut des sciences du mouvement (UMR 7287)	Aix-Marseille université	Marseille	3.9
Institut FEMTO-ST – UMR 6174	Université de Franche-Comté / ENSMM / UTBM	Besançon	3.15, 4.1, 4.2
Institut Jean-Lamour (IJL) – UMR 7198	Université de Lorraine	Nancy	3.15
Institut Jean-Le-Rond-d'Alembert (IJRA) – UMR 6174 et 7130	Université Pierre-et-Marie-Curie	Paris	3.1, 3.11
Institut Navier ENSPC – UMR 8205	École des ponts ParisTech	Marne–la-Vallee	3.2, 3.6, 4.2
Institut Pascal – UMR 6602	Université Blaise-Pascal – IFMA	Aubière	3.4, 4.1, 4.2, 4.3
Institut Pprime – UPR 3346	ENSMA Université de Poitiers	Futuroscope Chasseneuil-du-Poitou	3.6, 3.7, 3.11, 4.2
IPR – UMR 6265	Université de Rennes	Rennes	3.2
IRCCyN – UMR 6597	École centrale	Nantes	4.1, 4.2, 4.3
IRPHE – UMR 7342	Université d'Aix-Marseille	Marseille	3.1, 4.2
IUSTI – UMR 6595	Université de Marseille	Marseille	3.1
LABOMAP – EA 3633	ENSAM	Cluny	4.2

Laboratoire	Organisme	Ville	Chapitres *Livre blanc*
Laboratoire de biomécanique – EA 4494	ENSAM	Paris	3.9
LADHYX – UMR 7646	École polytechnique	Palaiseau	3.1
LAMCOS – UMR 5259	INSA de Lyon	Villeurbanne	3.7, 3.9, 3.11, 3.14, 3.15, 4.2
LAMIH – UMR8201	Université de Valenciennes	Valenciennes	3.4, 3.9
LAMPA	ENSAM	Angers	4.2
LAMSID – UMR 8193	CNRS-EDF	Clamart	3.4, 3.15
LASIE – UMR 7356	LASIE – Université de La Rochelle	La Rochelle	3.1
LASMIS – UMR 2848	Université d technologie de Troyes (UTT)	Troyes	3.15, 4.1, 4.2
LAUM – UMR 6613	Université du Maine	Le Mans	3.11
LBA – UMR T24	Université d'Aix-Marseille	Marseille	3.9
LBMS	ENSTA Bretagne	Brest	4.2
LCFC – EA 4495	ENSAM	Metz	3.4, 4.1, 4.2, 4.3
LCPI – EA 3927	ENSAM	Paris	4.1, 4.2
LCPO – UMR 5629	Université de Bordeaux	Pessac	4.2
LEGI – UMR 5519	LEGI – CNRS	Grenoble	3.1
LEM3 –UMR 7239	Université de Lorraine	Metz	3.14, 3.15, 4.2
LEMTA – UMR 7563	Université de Lorraine	Vandœuvre-lès-Nancy	3.9, 4.2
LEPS/STOICA – UMR 5600	INSA	Lyon	4.1, 4.2
LERMPS – EA7274	UTBM	Belfort	4.2
LFM – EA 4362	Université de Lorraine	Metz	3.9
LGECO – EA 3938	INSA	Strasbourg	4.1, 4.2
LGI – EA 2606	École centrale	Paris	4.1, 4.2
LGP – EA 1905	ENIT	Tarbes	4.2
LHEEA – UMR 6598	École centrale	Nantes	3.10
LIMATB	Université Bretagne-Sud	Lorient	3.15

Laboratoire	Organisme	Ville	Chapitres *Livre blanc*
LIMSI – UPR 3251	Université Paris-Sud	Orsay	3.2
LIPHY – UMR 5588	Université Joseph-Fourier – INPG	Saint-Martin-d'Hères	3.2
LISMMA – EA 2336	Supméca	Saint-Ouen	3.7, 3.11, 3.17, 4.1, 4.2
LM3 – UMR 7239	Université de Metz	Metz	3.2
LMA – UPR 7051	Université de Marseille	Marseille	3.2, 3.4, 3.6, 3.11, 3.14
LMBC, UMR_T 9406	Université Lyon 1	Lyon	3.9
LMFA – UMR 5509	École centrale de Lyon	Écully	3.1, 3.11
LMGC	IUT	Nîmes	3.15
LMGC – UMR 5508	Université Montpellier 2	Montpellier	3.9, 3.14
LML – UMR 8107	Cité scientifique	Villeneuve-d'Ascq	3.1, 3.14
LMR – EA 2640	Université François-Rabelais – Tours	Tours	3.11
LMSME – UMR 8208	Université Marne-la-Vallée	Marne-la-Vallée	3.4
LMSSM – UMR 8579	École centrale	Chatenay-Malabry	3.4
LMT – UMR 8535	ENS Cachan	Cachan	3.6, 3.14, 3.15, 4.2
LOFIMS	INSA	Rouen	3.4
LOMA – UMR 5798	Université de Bordeaux	Bordeaux	3.2, 4.2
LP – UMR 5672	ENS Lyon	Lyon	3.2
LPIM - UMR 7525	Université de Haute-Alsace	Mulhouse	4.2
LPS – UMR 8550	ENS UPMC	Paris	3.2
LSIS – UMR 7296	ENSAM	Aix-en-Provence	4.1, 4.3
LTDS – UMR 5513	EC Lyon	Écully	3.7, 3.11, 3.14, 3.15, 4.2
LURPA – EA 1385	ENS	Cachan	4.1, 4.2, 4.3
LVA – EA 677	INSA	Lyon	3.11
M2P2 – UMR 7340	IMT	Marseille	3.1
M3M – EA 3318	UTBM	Belfort	4.1, 4.2

Laboratoire	Organisme	Ville	Chapitres *Livre blanc*
MATEIS – UMR 5510	INSA	Lyon	3.6
MSC – UMR 7057	Université Paris 7	Paris	3.2
MSME – UPEC UMR 8208	Université de Marne-la-Vallée	Créteil	3.4, 3.9, 3.11
PIM – UMR 8006	ENSAM	Paris	4.2
PIMM – UMR 8006	Arts et Métiers ParisTech	Paris	3.6, 3.15
PMMH – UMR 7636	ESPCI ParisTech	Paris	3.1
POEMS – UMR 7231	ENSTA	Paris	3.11
PPMD/SIM – UMR 7615	ESPCI ParisTech	Paris	3.2, 4.2
Roberval – UMR 7337	UTC	Compiègne	3.4, 3.11, 3.14, 3.15, 4.1, 4.2
SIMaP – UMR 5266	INPG	Grenoble	3.15
SYMME – UMR 5271	Université de Savoie	Annecy	3.17
TEMPO – EA 4542	Université de Valenciennes	Valenciennes	3.15, 4.2
UME – UMR 7652	ENSTA ParisTech	Paris	3.2, 3.11, 3.15
URCA	Université de Reims	Reims	3.15, 4.2
X-LMS – UMR 7649	École des mines/École polytechnique	Palaiseau	3.2, 3.14

Liste des organismes de recherche publics et centres techniques référencés dans les articles :

BRGM, CEA, CERFACS, CETIAT, CETIM, CNRS, CSTB, IFPEN, IFSTTAR, INSIS, Institut de soudure, IFREMER, IREPA Laser, IRSTEA, ONERA, PEP.