



Fondation
de Recherche
pour l' Aéronautique
& l' Espace

AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE
ANR

Appel à projets générique - FRAE/ANR 2014

AEROACOUSTIQUE : Caractérisation multidisciplinaire des systèmes tournants

Positionnement dans la liste des défis, axes et sous-axes :

Défi 2 - Energie, propre, sûre et efficace

- Concepts innovants pour le captage et la transformation des énergies renouvelables
 - Autres ressources renouvelables (air, eau)
- Efficacité énergétique des procédés et des systèmes
 - Efficacité énergétique des procédés et des systèmes

Défi 3 – Stimuler le renouveau industriel

- Sciences et technologies de production, l'usine numérique
 - Nouvelles technologies numériques au service des produits et usines du futur
- Produits (conception, procédés et matériaux)
 - Tous sous-axes

Défi 6 - Mobilité et systèmes urbains durables

- Mobilité durable et systèmes de transport
 - Véhicules à grande efficacité énergétique et faible impact environnemental

Défi 10 – Défi de tous les savoirs

Positionnement dans la liste des champs et sous champs du panel ERC (Europe) :

- **SH3 Environnement, Space and Population** : SH3_8 Mobility, tourism, transportation and logistics,
- **PE1 Mathematics** : PE1_18 Scientific computing and data processing, PE1_19 Control theory and optimization, PE1_21 Application of mathematics in industry and society
- **PE2 Fundamental Constituents of Matter** : PE2_12 Acoustics, PE2_17 Metrology and measurement

- **PE5 Synthetic Chemistry and Materials** : PE5_1 Structural properties of materials, PE5_6 New materials: oxides, alloys, composite, organic-inorganic hybrid, nanoparticles, PE5_8 Intelligent materials – self assembled materials
- **PE6 Computer Science and Informatics** : PE6_3 Software engineering, operating systems, computer languages, PE6_12 Scientific computing, simulation and modelling tools
- **PE8 Products and Processes Engineering** : PE8_1 Aerospace engineering, PE8_4 Computational engineering, PE8_5 Fluid mechanics, hydraulic-, turbo-, and piston engines, PE8_6 Energy systems (production, distribution, application), PE8_8 Mechanical and manufacturing engineering (shaping, mounting, joining, separation), PE8_9 Materials engineering (biomaterials, metals, ceramics, polymers, composites...).

Contexte

Les systèmes tournants sont à la base de la plupart des dispositifs de production et de transformation d'énergie. Qu'il s'agisse d'éoliennes, de ventilateurs, de turbines ou de compresseurs, la maîtrise et l'amélioration de ces systèmes participent tant de la compétitivité des industries nationales que de l'amélioration du cadre de vie de nos concitoyens. Dans le cadre de cet appel à projets, la FRAE privilégie les systèmes tournants que sont les dispositifs de conditionnement d'air et de propulsion.

Analyse des besoins

Les systèmes mécaniques en rotation sont à l'origine de nombreux phénomènes physiques couplés dont la compréhension fine requiert souvent une approche multidisciplinaire : Il peut s'agir par exemple de la microstructure des matériaux constituant ces systèmes, qui impacte leurs performances mécaniques, ou leurs comportements vibratoire ou aérodynamique qui conditionnent leur rayonnement acoustique.

Dans tous les cas, la prédiction de ces phénomènes couplés nécessite la mise en œuvre de méthodes numériques reposant sur des modèles complexes, délicats à implémenter et dans tous les cas coûteux en temps de calcul.

En marge de ces méthodes numériques fondées sur la résolution couplée des équations microscopiques constitutives, il existe de nombreuses méthodes approchées, permettant d'obtenir des tendances ou de justifier des dimensionnements. Ces méthodes semi-empiriques sont généralement recalées sur les méthodes « exactes » par des procédés d'interpolation ou d'extrapolation. Leur domaine de validité est donc souvent limité par les hypothèses qui les sous-tendent ou par les capacités pratiques que l'on a de les confronter à des méthodes plus exactes ou à des résultats expérimentaux.

L'avancement des connaissances en la matière requiert donc un triple effort. Il implique d'une part d'élargir le domaine de validité des méthodes semi-empiriques, les seules actuellement à même de permettre des études paramétriques rapides et significatives mais aussi d'y incorporer une physique plus riche permettant la prise en compte de phénomènes physiques ou de couplages que seules les méthodes lourdes traitent aujourd'hui.

Il suppose d'autre part que lesdites méthodes lourdes soient mieux intégrées dans des suites logicielles repensées dans une logique centrée sur l'échange de données plutôt que sur la

logique de codes qui prévaut actuellement : c'est de l'interopérabilité accrue des codes et de méthodes et donc de leurs échanges que l'on tirera une compréhension plus fines des phénomènes et de leurs interactions. Cette problématique ne relève pas simplement du génie logiciel mais englobe la réflexion du physicien sur la définition et sur la conformation du jeu pertinent d'observables à même de constituer la base des entrées/sorties entre codes.

Il requiert enfin de développer des approches expérimentales permettant d'affiner notre compréhension des phénomènes et d'enrichir les bases de données afférentes.

Thématiques proposées :

Dans le cadre du présent appel, qui concerne tant les systèmes guidés que les systèmes ouverts et qui couvre tous les régimes de Mach, les projets retenus se déclineront préférentiellement sur les trois points précédemment mentionnés et plus précisément sur :

- La caractérisation des sources aéroacoustiques et vibroacoustiques. Plusieurs objectifs sont ici recherchés :
 - Approfondir la compréhension des mécanismes à l'origine des sources acoustiques et vibratoires,
 - Améliorer les méthodes de calcul intensif et les outils associés, ou leurs chaînages, afin de permettre une meilleure capacité de prédictions du rayonnement de sources perturbées par des écoulements fluides complexes ou par des obstacles solides,
 - Développer des stratégies de contrôle de l'ensemble des sources et de la propagation du bruit.
- Les effets de propagation dans des milieux fortement perturbés tels que les écoulements à fort taux de rotation, ou en présence de conditions aux limites non triviales telles que celles imposées par des matériaux absorbants. On visera en particulier au développement ou à l'amélioration des méthodes semi-empiriques existantes ou d'autres méthodes légères telles que les méthodes modales et les problèmes de raccordement modal dans ces conditions. On travaillera également à affiner la modélisation des parois et des matériaux en tant que conditions aux limites.
- La conception ou l'optimisation de matériaux innovants ou de systèmes actifs permettant de réduire les vibrations ou les émissions acoustiques des machines tournantes et des systèmes associés en présence d'écoulement.

Appel à projets générique - FRAE/ANR 2014

MATERIAUX

Positionnement dans la liste des défis, axes et sous-axes :

Défi 3 – Stimuler le renouveau industriel

- Sciences et technologies de production, l'usine numérique
- Produits (conception, procédés et matériaux)
- Chimie durable, génie chimique et biotechnologie
- Apport des nanosciences et nanotechnologies aux matériaux fonctionnels et biotechnologies

Défi 10 – Défi de tous les savoirs

Positionnement dans la liste des champs et sous champs du panel ERC (Europe) :

- **PE1 Mathematics** : PE1_14 Statistics, PE1_17 Numerical analysis, PE1_19 Control theory and optimization, PE1_20 Application of mathematics in sciences, PE1_21 Application of mathematics in industry and society.
- **PE6 Computer Sciences and informatics** : PE6_12 Scientific computing, simulation and modelling tools
- **PE8 Products and Processes Engineering** : PE8_1 Aerospace engineering, PE8_2 Chemical engineering, technical chemistry, PE8_4 Computational engineering, PE8_7 Micro (system) engineering, PE8_8 Mechanical and manufacturing engineering, PE8_9 Materials engineering, PE8_10 Production technology, process engineering, PE8_11 Industrial design, PE8_12 Sustainable design, PE8_13 Lightweight construction, textile technology

Les matériaux sont un secteur clé de l'industrie aéronautique, pour lesquels les enjeux concernent aujourd'hui plus que jamais leur gain en masse, leur production et mise en forme à moindre coût, leur adaptation aux exigences environnementales, notamment REACH et leur fonctionnalisation. Des projets de recherche ambitieux avec pour application

potentielle les matériaux pour l'aéronautique, présentant des ruptures qualitatives, pourront être soumis dans le nouvel appel à projets ANR 2013 – Défi 3 « Stimuler le renouveau industriel ».

Pour lever les verrous technologiques récurrents, il faudra des avancées notables dans des recherches se plaçant au carrefour des domaines de la physique, de la chimie, de la science des matériaux, de la mécanique, de la technologie numérique et du calcul scientifique. Des thématiques de recherche prioritaires ont été identifiées :

La fonctionnalisation des matériaux et des surfaces. La rhéologie des agrégats, le greffage ou l'assemblage de nanoparticules, la durabilité de la fonctionnalisation ou des revêtements peuvent faire partie des actions à mener dans ce cadre. La fonctionnalisation a par exemple pour objectifs l'amélioration des conductivités électriques ou thermiques, l'anti-corrosion, la prévention du givrage, la quantification de chocs, la détection de défauts, l'auto-nettoyage, ...

Les matériaux à gradients. Parmi les problèmes adressés, la caractérisation expérimentale et la modélisation du comportement mécanique qui nécessitent souvent la prise en compte d'interphases diffuses avec pour but le dimensionnement structural ; mais aussi la mise en œuvre de matériaux présentant des gradients de composition largement conditionnés par les procédés et pouvant déboucher sur l'élaboration de matériaux « à la carte ».

Les matériaux architecturés, nanostructurés ou structurés à plusieurs échelles qui améliorent les propriétés mécaniques, acoustiques, thermiques, électromagnétiques... Le contrôle, la caractérisation, la modélisation multi-échelle des (micro)structures pouvant être évolutives jouent ici un rôle primordial. Le développement des outils de simulation performants intégrant des techniques avancées d'optimisation topologique seront nécessaires. **Les méta-matériaux** auront notamment pour finalité le contrôle ou l'absorption d'ondes avec pour applications la furtivité aux ondes électromagnétiques ou l'absorption d'ondes de choc ou de vibration.

Le comportement mécanique ou dynamique des multi-matériaux et des assemblages innovants. Une attention spéciale sera portée au comportement à l'interface et aux problèmes associés à la discontinuité des propriétés (mécanique, thermique...) à différentes échelles tels la transition endommagement / rupture à travers les différentes échelles. Un des objectifs prioritaires est de développer les approches par "essais virtuels".

Le développement et la caractérisation de **matériaux alternatifs biosourcés** présentant potentiellement des performances compatibles avec une utilisation dans l'aéronautique.

Le vieillissement et la **durabilité** fonctionnelle des matériaux aéronautiques en conditions extrêmes ou sous rayonnement atmosphérique et spatial. Expérimentation et simulation numérique de la tenue au feu des composites, stratégies « bulk » et revêtement.

La Surveillance de la santé matériau et **le contrôle actif / non destructif** aussi bien pendant l'élaboration des matériaux qu'en service seront basés sur la simulation de modèles thermomécaniques décrits et résolus avec toute leur richesse. La contribution des nanotechnologies sera également à considérer. Cette thématique devrait aussi permettre l'apport des compétences de la communauté du contrôle et de l'automatique autour des problématiques matériaux.

Transversalement et pour toutes ces thématiques, le développement de **nouvelles méthodes ou méthodologies numériques** au travers de modélisations multi-échelles et multiphysiques couplées appliquées aux matériaux aéronautiques font partie des recherches motivant la FRAE.

Appel à projets générique - FRAE/ANR 2014

MODELISATION - SIMULATION CFD¹

Positionnement dans la liste des défis, axes et sous-axes :

Défi 2 - Energie, propre, sûre et efficace

- Efficacité énergétique des procédés et des systèmes

Défi 6 - Mobilité et systèmes urbains durables

- Mobilité durable et systèmes de transport
 - Mobilités et systèmes de transport et Véhicules à grande efficacité énergétique et faible impact environnemental

Défi 7 - Société de l'information et de la communication

- Sciences et technologies logicielles, Interactions des mondes physiques et Données massives, calcul haute performance et simulation numérique

Défi 10 – Défi de tous les savoirs

Positionnement dans la liste des champs et sous champs du panel ERC (Europe) :

- **PE1 Mathematics** : PE1_17 Numerical analysis, PE1_18 Scientific computing and data processing, PE1_19 Control theory and optimization, PE1_20 Application of mathematics in sciences, PE1_21 Application of mathematics in industry and society
- **PE2 Fundamental Constituents of Matter** : PE2_12 Acoustics, PE2_14 Thermodynamics
- **PE3 Condensed Matter Physics** : PE3_14 Fluid dynamics (physics)
- **PE6 Computer Science and Informatics** : PE6_12 Scientific computing, simulation and modelling tools
- **PE7 Systems and Communication Engineering** : PE7_1 Control engineering, PE7_3 Simulation engineering and modelling
- **PE8 Products and Processes Engineering** : PE8_1 Aerospace engineering, PE8_4 Computational engineering, PE8_5 Fluid mechanics, hydraulic-, turbo-, and piston engines

¹ Computational Fluid Dynamics

Enjeux industriels :

La capacité à modéliser fidèlement et à simuler efficacement les écoulements complexes et leurs interactions avec les composants de cellule ou de moteurs est au cœur de la compétitivité des industriels de l'aéronautique et du spatial. Il s'agit :

- De concevoir bien du premier coup pour maîtriser les délais et coûts ;
- D'explorer des espaces de conception plus larges pour identifier les optima et adresser les couplages multi-physiques ;
- De concevoir des composants ou aérostructures plus chargés et plus tolérants pour réduire les masses ;
- D'être capable d'évaluer des solutions novatrices avant de les tester au banc et en vol.

En CFD des progrès sont attendus plus spécifiquement sur les aspects suivants :

- **Qualité des prédictions des modélisations en phase de conception**
 - Rendre accessibles au concepteur les modélisations avancées (URANS, LES , ...)
 - Généraliser les modélisations 3D aérothermiques en conception (stabilisé, transitoire)
 - Intégrer la conception robuste au processus de conception (prise en compte des tolérances, et des incertitudes) et généraliser l'optimisation multi-disciplinaire
- **Traduction d'une idée d'ingénieur en un système de CAO « intelligent »**
 - Génération automatique du maillage, optimisé par le solveur CFD
 - Rationalisation des outils CFD au travers d'une architecture modulaire et évolutive
- **Productivité et portabilité des simulations**
 - Généralisation des schémas de calcul parallèle
- **Traitement des résultats**
 - Aide à l'exploitation de grosses simulations CFD 3D transitoires, capture de l'information pertinente, conditionnement des résultats sous forme de modèles réduits.

Les thématiques de recherche concernées sont :

- **Modélisation physique pour CFD**
 - Turbulence, Ecoulements proche paroi, Transition, Contrôle d'écoulements
 - Gaz réels, Changement de phase, Ablation
 - Ecoulements réactifs (e.g. combustion, plasmas)
 - Convection naturelle
- **Couplage multi-physique et multi-échelle**
 - Aérothermique, Aéroélasticité, Aeroacoustique, Atomisation, Multi-matériaux
 - Multi-maillage (e.g. structuré/octree-hybride)
 - Multi-échelle (e.g. RANS/LB, RANS/LES...)
- **Méthodes numériques et HPC**
 - Optimisation, Etat adjoint, Sensibilités, Conception robuste, Contrôle
 - Schémas (e.g. haute précision, instationnaire, transitoire)
 - Aspects logiciels et numériques des couplages, Codes modulaires
 - Fusion / assimilation
 - Algorithmique // (new hardware, new solver), parallélisation, scalabilité
- **Pré-post traitement**
 - Validation, Quantification et propagation d'incertitudes
 - Intégration CAO, CAO-Maillage, Maillage
 - Traitement de gros volumes de données, Réduction de données



Fondation
de Recherche
pour l' Aéronautique
& l' Espace

AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE
ANR

Appel à projets générique - FRAE/ANR 2014

NOUVELLES ENERGIES

Positionnement dans la liste des défis, axes et sous-axes :

Défi 2 - Energie, propre, sûre et efficace

- Transformation et inter-conversion énergétique
 - Conversion thermochimique et Vecteur hydrogène et piles à combustible
- Gestion des variabilités spatio-temporelles des énergies
 - Accumulateurs électrochimiques et supercapacités
- Efficacité énergétique des procédés et systèmes
 - Efficacité énergétique des procédés et systèmes, Gestion de la chaleur fatale et Réseaux
- Approches socio-économiques de l'usage de l'énergie et de l'impact des nouvelles technologies de l'énergie

Défi 10 – Défi de tous les savoirs

Positionnement dans la liste des champs et sous champs du panel ERC (Europe) :

- **PE8 Products and Processes Engineering** : PE8_1 Aerospace engineering, PE8_2 Chemical engineering, PE8_6 Energy production, PE8_6 Energy systems et PE8_9 Material engineering.

Piles à combustible SOFC

Alimentée en H2

- Gestion et optimisation des cycles démarrage - arrêt
- Objectif de réduction de la température de fonctionnement (< 600°C)
- Nouveaux matériaux aptes à résister aux cyclages thermiques multiples

- Architectures innovantes à haute densité de puissance, notamment facilitant les démarrages/arrêt

Utilisant les carburants aéronautiques

- Alimentation directe en kérosène, ou autre carburant

Piles à combustible à membrane PEMFC

- Amélioration de la densité de puissance en visant 2kW/kg ou plus : allègement de la structure, optimisation de la charge en catalyseur, ...
- Optimisation du système dans des conditions de fonctionnement aéronautique (température, pression) en intégrant les auxiliaires...
- Amélioration de la durée de vie des piles : phénomène de dégradation aux électrodes
- Augmentation des performances des PEMFC, notamment en augmentant les températures de fonctionnement

Production d'hydrogène à bord à partir des carburants aéronautiques, stockage

- Nouvelles technologies de stockages solides de l'hydrogène
- Evaluation du stockage cryogénique dans des conditions aéronautiques
- Amélioration du rendement et des performances du reformage
 - o Intensification du procédé de reformage catalytique pour la conception de reformeur miniaturisé, intégration des technologies à membrane notamment
 - o Optimisation du catalyseur et du substrat
- Amélioration du rendement des technologies de reformage à basse température, basées par exemple sur des plasmas.

Analyse systémique

- Analyse systémique prenant en compte : la chaîne de génération et/ou stockage du combustible, l'exploitation des effluents de la pile à combustible (effluents gazeux et liquide, chaleurs), les dispositifs de gestion électrique : optimisation thermique et électrique.
- Cogénération de la chaleur :
 - o en vue sa conversion en électricité (PEMFC et SOFC)
 - o réutilisation directe dans le système (pile SOFC)
- Analyse du cycle de vie de l'intégration d'APU basés sur les piles à combustible comparé aux filières classiques

Intégration électrique d'une source de puissance basée sur les piles à combustible

- Adaptation des dispositifs d'électronique de puissance et de stockage électrique aux contraintes aéronautiques (masse, augmentation des températures internes, stratégies de refroidissement des composants optimisées, packaging,..)
- Architectures système innovantes intégrant pile à combustible et stockage électrique,
- Stratégies d'hybridation
- Amélioration de l'efficacité énergétiques des actionneurs (moteurs, actionneurs)



Fondation
de Recherche
pour l' Aéronautique
& l' Espace

AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE
ANR

Appel à projets générique - FRAE/ANR 2014

PROCÉDÉS : AVANCÉES INNOVANTES

Positionnement dans la liste des défis, axes et sous-axes :

Défi 3 : Stimuler renouveau industriel

- Produits (conception, procédés et matériaux)

Défi 10 – Défi de tous les savoirs

Positionnement dans la liste des champs et sous champs du panel ERC (Europe) :

- **PE8 Products and Processes Engineering** : PE8_1 Aerospace engineering, PE8_4 Computational engineering, PE8_8 Mechanical and manufacturing engineering (shaping, mounting, joining, separation), PE8_9 Materials engineering, PE8_10 Production technology, process engineering, PE8_13 Lightweight construction, textile technology

L'industrie aéronautique cherche à améliorer, optimiser et développer les procédés (mise en forme, assemblage, traitements de surface, ...) afin de gagner en compétitivité et mieux répondre aux exigences environnementales. Toute action s'intégrant dans ces objectifs sera soutenue et une attention particulière pourra être donnée aux thèmes listés ci-dessous.

1. Fabrication additive

- Compréhension et optimisation de la métallurgie induite par des cycles thermiques rapides (poudres, nouveaux alliages, matériaux à gradient, ...)
- Modélisation et simulation thermomécanique et métallurgique suite au cyclage thermique (contraintes résiduelles, ...)
- Optimisation de l'état de surface des pièces (diminution de la rugosité, ...)
- Développement des procédés innovants pour la réparation des pièces

2. Mise en œuvre des composites thermoplastiques et thermodurcissables

- Caractérisation et prédiction de la distribution des renforts et des défauts induits par les procédés
- Caractérisation et modélisation des relations microstructure (orientation et taux de fibres, défauts, ...)-propriétés d'emploi
- Développement des procédés pour la réparation des pièces composites
- Développement de procédés pour la mise en œuvre de composites multifonctionnels (composites conducteurs, ...)
- Développement de procédés pour la réduction des coûts (consolidation, polymérisation, techniques CND, ...)

3. Assemblage

- Optimisation et développement des procédés d'assemblage (par friction, soudage, brasage, collage, ...)
- Développement de procédés pour l'assemblage multimatériaux

4. Usinage des matériaux pour l'aéronautique

- Développement de procédés d'usinage et de perçage multimatériaux
- Maîtrise de l'usinage des métaux durs

5. Prise en compte des contraintes environnementales

- Développement de procédés facilitant la recyclabilité des matériaux
- Traitements de surface pour l'augmentation de la durée de vie
- Développement de procédés « propres » (usinage à sec, réglementation REACH...)

6. Chaînage procédés-propriétés d'emploi

- Développement de simulations multiphysiques couplées
- Optimisation simultanée du couple « Procédés-Conception » (forme de la pièce, distribution des renforts ...)
- Développement de méthodes expérimentales, théoriques et numériques pour connaître les données physiques des matériaux dans les conditions des procédés (instrumentation, méthodes inverses, ...)



Fondation
de Recherche
pour l' Aéronautique
& l' Espace

AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE
ANR

Appel à projets générique - FRAE/ANR 2014

MODELISATION ET SIMULATION DES MODELES THERMIQUES

Positionnement dans la liste des défis, axes et sous-axes :

Défi 2 - Energie, propre, sûre et efficace

- Efficacité énergétique des procédés et des systèmes
 - Efficacité énergétique des procédés et des systèmes

Défi 3 - Stimuler le renouveau industriel

- Sciences et technologies de production, l'usine numérique
 - Nouvelles technologies intelligentes, Nouvelles technologies numériques au service des produits et usines du futur, Formation et nouveaux outils de production
- Produits (conception, procédés et matériaux)
 - Concevoir des fonctionnalités plus que des produits, Produire de façon éco-efficace, Matières premières, matériaux et métaux stratégiques, Matériaux et fonctionnalités pour des produits compétitifs, Procédés optimisés et innovants

Défi 10 – Défi de tous les savoirs

Positionnement dans la liste des champs et sous champs du panel ERC (Europe) :

PE1 Mathematics : PE1_14 Statistics, PE1_17 Numerical analysis, PE1_19 Control theory and optimization, PE1_20 Application of mathematics in sciences et PE1_21 Application of mathematics in industry and society

PE6 Computer sciences : PE6_12 Scientific computing, simulation and modelling tools

PE8 Products and Processes Engineering : PE8_1 Aerospace engineering, PE8_4 Computational engineering, PE8_7 Micro (system) engineering, PE8_8 Mechanical and manufacturing engineering, PE8_9 Materials engineering , PE8_10 Production technology, process engineering, PE8_11 Industrial design, PE8_12 Sustainable design et PE8_13 Lightweight construction, textile technology.

La modélisation, simulation et analyse des systèmes thermiques sont des sujets d'intérêt majeur dans la science et l'ingénierie de matériaux, procédés et systèmes où de nombreux verrous persistent et ralentissent les développements technologiques notamment dans le secteur aérospatial.

Depuis quelques années on assiste à une évolution progressive de ce qu'on appelait « materials engineering » et « process engineering » vers les concepts plus actuels comme le sont les « engineered materials » et « engineered processes ». Ces derniers nécessitent des approches dynamiques, systémiques, on-line, ... qui ne sont pas au point à présent.

Les défis soulevés concernent l'efficacité énergétique des procédés et des systèmes, les sciences et technologies de production, l'usine numérique ainsi que les produits (conception, procédés et matériaux). D'un point de vue plus fondamental, les défis s'inscrivent dans les domaines disciplinaires des mathématiques (statistique, l'analyse numérique, le contrôle et l'optimisation et les mathématiques appliqués), de l'informatique et le calcul scientifique et surtout dans le domaine de l'ingénierie de produits et de procédés.

Des verrous persistent à plusieurs niveaux et des recherches fondamentales devront y être consacrées autour de :

- Adéquation des modèles aux grandeurs et paramètres d'intérêt. Le modèle lui même devient un élément du système, et sa finesse devra être en consonance avec les attentes visées. Les lois de comportement seront spécialement concernées.
- Des nouvelles techniques de résolution doivent être explorées dans le domaine de la thermique, comme elles l'ont été dans d'autres domaines, permettant d'allier précision et efficacité.
- La conception de systèmes nécessite des stratégies d'analyse permettant de dialoguer en ligne « online » avec l'utilisateur. Actuellement, la rapidité demandée est un des principaux points bloquants. On aura besoin d'évaluer vite, voire très vite, car l'optimisation ou l'analyse inverse nécessite l'évaluation d'un grand nombre de scénarios, et que dire du contrôle quand l'utilisation des fonctions de transfert n'est pas suffisante. L'utilisation de techniques de réduction de modèles s'avère incontournable mais elle nécessite de développements fondamentaux pour :
 - o Passer de la réduction de modèles de composants à la réduction d'un système complet (prototype numérique). Cela nécessite d'être capable de coupler des modèles réduits entre eux. Les difficultés, qui peuvent se cumuler, tiennent à :
 - la nature mathématique différente des modèles qui peuvent être différentiels (modèles d'états), algébriques, procéduraux (réseaux de neurones, automates cellulaires ...), déterministes ou stochastiques.
 - la non compatibilité géométrique des interfaces lors du raccord des modèles.
 - la nécessité de faire cohabiter des modèles aux degrés de finesse hétérogènes (du plus grossier au plus fin).
 - la technique d'obtention de ces modèles selon les acteurs.
 - au couplage de modèles réduits multi physique.
 - la possibilité de conserver et de faire évoluer le prototype numérique du stade de la pré-étude, de la conception jusqu'à l'exploitation.
 - o Etre capable de prendre en compte les phénomènes critiques impliquant de la forte localisation spatiale et temporelle, conditions qui vont sans doute demander au modèle réduit de s'adapter dynamiquement.

- Mettre au point une métrologie adaptée au système, en lien avec toutes les questions relatives à la vérification et validation.
- Intégration dans la boucle de conception les méconnaissances, les incertitudes (quantification et propagation) ainsi que les conditions limites stochastiques.
- Concevoir de nouveaux systèmes capables de réduire la traînée par des effets thermiques sur la couche limite, ou bien par un couplage thermomécanique affectant l'aérodynamique à travers de la modification géométrique. Ces systèmes devront intégrer des matériaux fonctionnels et aussi des systèmes de contrôle adéquats. De nouveaux systèmes seront conçus couplant thermique et physicochimie liée au givrage.
- A l'échelle des composants, les recherches devront porter plus particulièrement sur des systèmes performants de refroidissement comme peuvent l'être les évaporateurs capillaires miniaturisés, les condenseurs ainsi que sur l'intensification des transferts par morphing électroactif des parois d'échange ainsi que sur le couplage avec les moyens de contrôle thermique. A nouveau, les matériaux fonctionnels seront au rendez-vous.
- Des méthodologies d'analyse inverse relativement matures devront permettre la mise en place de capteurs virtuels pour accéder aux grandeurs d'intérêts dans des endroits inaccessibles aux mesures.
- Les modélisations réduites combinées avec des méthodes inverses robustes devront permettre de s'affranchir des difficultés récurrentes en matière de caractérisation de matériaux et des procédés.
- Modélisation et simulation performantes des interphases et interfaces, des couches minces et des géométries dégénérées où les effets 3D sont prépondérants malgré le caractère plate ou coque.
- Changement d'échelle en absence d'un volume élémentaire représentatif ...
- Un des objectifs de la simulation système sera de mettre en place, dans la chaîne de conception, un prototype virtuel d'un système complet. Un tel prototype doit en particulier permettre de prendre des décisions « architecturales » le plus en amont possible. Durant la phase de dimensionnement, les modèles les plus simples sont utilisés en premier. La complexité des modèles augmente avec la progression dans le cycle de mise en place du prototype virtuel.