LIVRE BLANC

LES COMPOSITES À MATRICE CÉRAMIQUE : UN DOMAINE D'EXCELLENCE EN FRANCE

DÉCEMBRE 2023

Pour que la France reste un leader mondial dans le domaine des Composites Céramiques

A la fin des années 50, la décision du général de Gaulle de constituer une force de dissuasion nucléaire nationale va produire, en France, un élan décisif aux innovations technologiques. De là, une démarche d'envergure de développement de propulseurs à ergols liquides et à ergols solides va être entreprise. Ces nouvelles technologies vont être rapidement mises à profit pour la construction de lanceurs civils, le premier d'entre eux étant la fusée DIAMANT, lancée à Hammaguir en novembre 1965. Celle-ci n'était en fait qu'un dérivé de l'engin militaire TOPAZE. Par la suite, le développement et le déploiement de missiles balistiques se mettront en place et l'histoire de l'Europe spatiale suivra.

Ce contexte a motivé le développement des matériaux Composites à Matrice Céramique [CMCs] au début des années 70, en France. Encore aujourd'hui, notre pays est un leader de la recherche, du développement et de l'industrialisation de cette technologie.

Un matériau céramique résulte de l'association de filaments céramiques et de matrices céramiques. Ainsi on obtient un matériau multiphasique, capable de résister à des températures bien plus élevées que les meilleurs alliages métalliques, tout en possédant des densités bien plus faibles, et sans présenter le caractère fragile des céramiques monolithiques. Suivant la nature des constituants, l'architecture du renfort filamentaire et la taille de l'unité structurale, d'autres propriétés spécifiques peuvent être avantageusement optimisées. On peut ainsi améliorer la résistance à l'ablation, le comportement à l'usure, la conductivité thermique, la résistance neutronique, la réponse électromagnétique et/ou infrarouge…

L'histoire du développement de ces nouveaux matériaux, en France, commence probablement par l'identification, à la fin des années 60, d'un matériau de la société américaine Union Carbide, qui synthétise, à très petite échelle, des composés dit « carbone-carbone ». Pour les spécialistes français de la conception/fabrication de tuyères de propulseur à ergol solide, l'alternative au matériau de col de tuyère à l'époque des métaux hautement réfractaires, semble évidente : un matériau de densité dix fois inférieure à celle du tungstène et capable de résister aux très hauts flux thermiques, avec un niveau de résilience supprimant tout effet de rupture catastrophique.
D'un début de recherche et de développement guidé par la « francisation » de quelques technologies américaines, assez rapidement, plusieurs innovations majeures vont être opérées en France. Pour ne citer que quelques exemples : les matériaux carbone-carbone renforcés par des constructions multidirectionnelles dites « 4D » (1974) ou par des textures aiguilletées de carbone (fin des années 70), les matériaux à matrice de carbure de silicium synthétisés par un procédé d'infiltration chimique par voie gazeuse (années 80), la mise au point de matrices dites « auto-cicatrisantes » par ce même procédé (début des années 90), la mise au point du tissage 3D-multicouches (fin des années 90), la mise au point de CMC oxyde utilisant une matrice originale de polyphosphosialate (fin des années 2010).

En parallèle, et dès la fin des années 70, un support de recherche académique va se mettre en place pour explorer de nouveaux concepts de CMC et de nouveaux procédés d'élaboration, ainsi que pour apprendre à caractériser ces nouveaux matériaux, loin des standards métalliques. L'enjeu est de comprendre leurs propriétés principales et leurs modes de ruine afin de proposer des premiers outils de dimensionnement, associés à des critères de rupture. On notera, comme élément marquant, la création, en 1988, du Laboratoire des Composites Thermo-Structuraux, sur le domaine universitaire de Bordeaux.

Encore aujourd'hui, cette unité mixte de recherche (CNRS – Université de Bordeaux – Safran - CEA), associant des chercheurs des différentes tutelles, constitue un exemple unique de laboratoire de recherche, en ce sens qu'il regroupe les disciplines spécifiques majeures à la technologie des CMC, au sein d'une même entité. Et plus récemment, en 2019, l'ensemble des acteurs académiques, institutionnels et industriels ont proposé, au CNRS, la création d'un Groupement de Recherche « Composites Céramiques, Conception, Modélisation Caractérisation » (le GDR CMC2), dont le but est de promouvoir et structurer les échanges techniques et scientifiques à l'échelle française.

Outre la mise en application des CMC pour la conception des tuyères de propulseur à propergol solide et autres pièces de missiles, très vite, ce nouveau savoir français va s'étendre à d'autres domaines. On peut citer le développement sans précédent des composites carbone-carbone pour le freinage des avions, mené en France à partir de 1972, qui a conduit à une première qualification en 1979 et à placer depuis Safran comme leader mondial du freinage aéronautique. On peut également mentionner le col des boosters de la fusée Ariane 5 (et prochainement Ariane 6) qui reste la plus grande pièce massive en CMC jamais produite, et les grands divergents des moteurs à ergols liquides des fusées américaines Delta et Atlas, encore produits, aujourd'hui, à Bordeaux. Début des années 90, la France fut le premier pays à qualifier un composant CMC sur un moteur d'avion : il s'agit des volets de la tuyère d'éjection des turboréacteurs de l'avion Rafale. Dans les années 90, les CMC se sont imposés dans les missiles tactiques. Dès 1994, des matériaux CMC à base de matrice vitrocéramique ont fait leur apparition dans la compétition automobile, notamment pour des protections thermiques autour des systèmes de freinage, des lignes d'échappement et des turbos des voitures de Formule 1. Au milieu des années 2010, deux premières mondiales sont également au bénéfice du secteur français du domaine des CMC : la première rotation d'une roue de turbine basse pression sur un moteur CFM56 et la première obtention d'une certification EASA, pour l'arrière-corps du CFM56, sur un avion de ligne Air France. Ces deux dernières démonstrations ont donné un réel crédit à la mise en application des CMC pour le secteur de l'aéronautique civil, marché de très grande envergure, se comptant en plusieurs centaines de milliers de pièces par an, et particulièrement concurrentiel.

Cet essaimage, par « secteur d'application », est celui d'une stratégie de valorisation conçue à partir de capacités technologiques démontrées et maintenant disponibles pour de nouveaux développements, plus rapides et moins risqués que les percées initiales.

Les enjeux actuels et futurs militent pour la poursuite et l'amplification de la position dominante française sur ces technologies duales. Citons notamment la souveraineté militaire et énergétique, l'indépendance de l'accès à l'espace, la désensibilisation aux « minerais de conflits », la mutation du transport et de l'industrie en lien avec la décarbonation, la prise en compte des exigences environnementales, …

Cette position de leader, construite en France, a besoin d'être soutenue par une forte activité de recherche fondamentale et d'innovation technologique nationales, de renforcement de l'indépendance de la chaîne d'approvisionnement et de développement d'outils de production.

Cet effort, inscrit dans la durée, doit être renforcé dans le contexte qui se dessine actuellement. Une réflexion a donc été conduite par un groupe de travail réunissant acteurs industriels et académiques français. Elle a notamment permis d'identifier des recommandations concertées, jugées essentielles pour consolider et renforcer ce secteur d'activité.

TABLE DES MATIÈRES

1 Introduction 4
2 Les composites à matrice céramique (CMC) 7
2.1 Qu'est-ce qu'un CMC ? 7
2.2 Domaines d'applications actuels et futurs 9
2.2.1 Domaine spatial 9
2.2.2 Domaine aéronautique 10
2.2.3 Domaine de la défense 13
2.2.4 Domaine de l'industrie nucléaire 14
2.2.5 Autres domaines industriels 15
2.2.6 Domaine de la compétition automobile 16
2.2.7 Domaine des nouvelles mobilités 16
2.2.8 Exemples de marchés actuels et potentiels 17
3 Contextes international et national 18
3.1 Environnement international 18
3.2 Filière française 21
3.2.1 Académiques (enseignement et recherche) 21
3.2.2 Carte des principaux acteurs nationaux du domaine 22
3.2.3 Donneurs d'ordre publics et sources de financement 23
3.2.4 Forces et faiblesses 23
4 Enjeux sociétaux et stratégiques : rôle des CMC 24
4.1 Enjeux sociétaux 24
4.2 Enjeux stratégiques 25
5 Verrous scientifiques et technologiques à instruire 26
5.1 Améliorer la performance de ces matériaux 26
5.2 Assurer la production à des coûts acceptables 27
5.3 Justifier et certifier plus facilement des pièces en CMC 28
5.4 Développer la culture des CMC 28
6 Bilan et plan d'actions 29
6.1 Bilan 29
6.2 Quatre recommandations 30
Annexe 1 32

1 INTRODUCTION

Développés à l'origine pour améliorer les performances des propulseurs de la Force de Dissuasion Nucléaire, les matériaux Composites à Matrice Céramique (CMC) sont une famille de matériaux uniques qui conservent des propriétés mécaniques élevées même à très haute température tout en étant plus réfractaires et plus légers que les métaux et moins fragiles que les céramiques monolithiques.
D'abord à l'initiative des sociétés Aérospatiale et SEP (aujourd'hui Ariane Group et Safran) vers les années 70, la France est parvenue à une position de leader dans le développement et la production de cette famille de matériaux, avec l'implication d'organismes comme l'ONERA et le CEA et un soutien croissant de la recherche académique (CNRS), à partir des années 80.

Table 1 : Développement des CMC - Les réussites mondiales françaises

1970

1972 : Premier col de tuyère en CMC, testé sur un missile balistique.

1979 : 1ère utilisation d'un CMC sur un lanceur civil (Ariane 1).
1979 : Invention du procédé d'Infiltration Chimique en phase Vapeur (CVI) de Carbure de Silicium (SiC) permettant de fabriquer des CMC moins sensibles à l'oxydation.

1980

1980 : Premier essai en vol d'un objet stratégique avec un col en carbone - carbone.

1983 : Qualification de freins CMC pour l'aviation Civile. Aujourd'hui la France avec Safran Landing System est le premier producteur mondial de freins d'avions en CMC.
1984 : Alain Prost remporte le Grand Prix de Formule 1 du Brésil avec des freins en carbone/carbone français.

1990

1993 : Qualification du Moteur à Propergol Solide d'Ariane 5 doté d'un col en CMC qui reste encore aujourd'hui la plus grande pièce massive (~100kg) en CMC jamais fabriquée à ce jour.

1995 : Qualification des volets de la tuyère d'éjection des moteurs SNECMA-M88 de l'avion Rafale, premier composant CMC sur une aéro-turbine.

2000

2000 : Premières démonstrations (essais au sol en environnement réel) d'une structure multifonctionnelle MBDA de moteur en CMC refroidi activement par le combustible.

2007 : Premières applications Formule 1 d'isolation de turbos et systèmes de freinages en CMC fibre SiC et matrice vitrocéramique aluminosilicate.

2010

2010 : Premières rotations d'une roue de turbine basse pression, entièrement en CMC, sur un moteur CFM56.

2012 : Essai en vol d'une tuyère CMC sur un hélicoptère de combat Tigre.
2013 : Développement des 1eres applications Défense du PyroXide CMC à matrice polyphosphosialate et renfort alumine, notamment pour des applications type radomes de missiles.

2015 : Première certification EASA, pour une mise en service opérationnel de l'arrière-corps en CMC du CFM56, sur un avion de ligne Air France, pour une durée de deux ans.
2015 : 1er Divergent CMC, de technologie française, équipant la tuyère de l'avion F16, dépassant 1500 heures de vol en service opérationnel.

2020

2022 : 1er essai d'endurance d'un anneau CMC de turbine haute pression, sur moteur M88 équipant le Rafale.
2022 : Un divergent CMC français participe à la propulsion du vaisseau ORION vers le lune.
2023 : Fabrication d'un divergent pour propulsion spatiale qui est, à ce jour, la plus grande pièce CMC monobloc jamais fabriquée au monde.

2030

Aujourd'hui, les marchés faisant appel aux composites céramiques, outre les applications des fonctions régaliennes françaises, de première importance mais d'expansion très limitée, sont ceux du domaine du freinage aéronautique (plusieurs centaines de tonnes de freins CMC produites par an), et dans une moindre mesure, les lanceurs spatiaux.

Concernant cette technologie particulière, le maintien des compétences et l'amélioration des performances techniques pour **garantir notre souveraineté technologique dans le domaine militaire** (missiles balistiques et hypervéloces), pour **maintenir et développer une filière industrielle compétitive,** avec un très fort potentiel de **production de masse dans l'aéronautique civile** et pour répondre à des marchés futurs (optique spatiale, nucléaire, médical, industrie, automobile, ...), nécessite un très haut niveau d'investissement, inscrit dans la durée. C'est cette démarche qui permettra, à la France, de garder une position de leader pour répondre aux futurs enjeux sociétaux et stratégiques majeurs tels que :

- la réduction de l'empreinte carbone des moteurs d'avions consommant moins grâce à l'emploi des CMC permettant d'augmenter leur température de fonctionnement ;
- l'indépendance de l'accès à l'espace avec des lanceurs spatiaux plus compétitifs et réutilisables grâce aux gains de performance et de masse liés à l'utilisation des CMC ;
- la réduction de la dépendance aux « minerais de conflits » car la plupart des CMC n'utilisent que des matières premières abondantes et non soumises à des contraintes géopolitiques fortes ;
- l'indépendance énergétique pour la construction de réacteurs nucléaires encore plus résilients grâce à l'utilisation de CMC comme matériaux de gainage du combustible nucléaire ;
- l'optimisation des solutions de stockage des déchets radioactifs sur de longues périodes grâce à des composants en CMC et à leur comportement inerte (non soumis à la corrosion) au lieu de l'acier.

Poursuivre et renforcer le développement des composites céramiques, nécessaires à l'émergence de ces nouveaux défis nécessite des **efforts de R&D conséquents** et la **structuration d'une chaîne d'approvisionnement** (supply chain) française efficiente et résiliente, qu'il faudra aussi accompagner par **l'amplification de la culture des CMC**, de l'amont à l'aval : enseignement supérieur, bureaux d'études, instances de certification, ateliers des utilisateurs finaux (end-users).

Outre le besoin d'un fort niveau d'investissement, la réussite d'un plan d'envergure long terme passe également par **l'intensification d'une collaboration et d'une coopération plus étroite** entre toutes les parties prenantes françaises (industrielles, académiques et institutionnelles) et ainsi maintenir et renforcer notre position de leader.
Un premier pas a été franchi en 2019 quand, sous l'impulsion de Safran, le GDR CNRS 2065 « $(CMC)^2$ » a été créé. Ce GDR a permis de structurer, pour la première fois en France, une communauté des CMC regroupant, en plus des académiques, les principaux acteurs de cette filière, des fabricants de matières premières et matériaux CMC aux end-users.
Pour aller plus loin dans la démarche, une réflexion a été conduite par un groupe de spécialistes du domaine, tous rassemblés autour d'un même objectif : le développement de la filière CMC en France.
Les discussions et échanges techniques entre partenaires ont rapidement conduit à identifier des sujets de préoccupation communs et à faire émerger une vision partagée d'une politique de R&D concertée et d'une stratégie de la filière industrielle.
Ce livre blanc synthétise cette vision après avoir, au préalable pour les premières parties du document :
- Décrit les CMC et leurs domaines d'application actuels ainsi que les contextes national et international associés (chapitre 3) ;
- Développé les enjeux sociétaux et stratégiques liés au développement de la filière CMC (chapitre 4) ;
- Identifié les verrous scientifiques et technologiques en lien avec les enjeux précédents (chapitre 5).

Ce livre blanc, rédigé par un ensemble d'experts des acteurs industriels et académiques français représentatifs des composites céramiques, propose des recommandations ciblées et priorisées pour consolider et développer la capacité de la France à relever les défis souverains que sous-tend cette filière.

2 LES COMPOSITES A MATRICE CERAMIQUE (CMC)

2.1 Qu'est-ce qu'un CMC ?

Maintenant bien connus du secteur industriel, les Composites à Matrice Organique (CMO) se sont imposés dans de nombreux secteurs de la vie économique (aérospatiale, aéronautique, défense, transport, industrie, sport, etc...). Ils sont aujourd'hui présents dans notre environnement quotidien, avec une intégration sociétale remarquable. Pour autant, le domaine des applications en température (au-delà de 200°C) reste réservé aux alliages métalliques, des plus conventionnels (base acier) aux plus sophistiqués (bases nickel et cobalt). Cependant, malgré leur très haut niveau de performances mécaniques, ils restent limités par deux caractéristiques intrinsèques : leur densité, générant des composants à masse élevée, et une limite d'utilisation en température, malgré les meilleurs systèmes de refroidissement que l'on ait pu développer.
Les céramiques monolithiques sont également bien connues dans différents secteurs de l'industrie, pour leur très haute capacité de tenue en température. Mais ces dernières souffrent d'un comportement rédhibitoire pour envisager leur utilisation en environnement mécanique sévère : il s'agit de leur fragilité, particulièrement marquée dans des conditions de gradient thermique élevé. Les composites céramiques se proposent en tant que solution optimale à ces problèmes de cahier des charges mécanique, thermique et environnemental à haute température (figure 1).

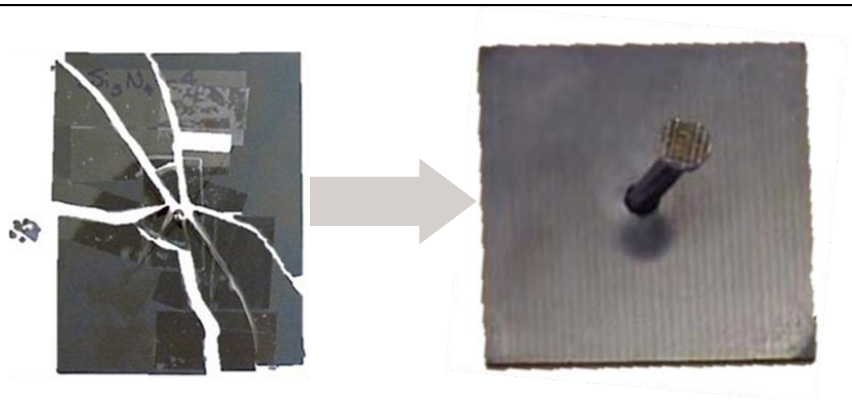

Figure 1 : Illustration du caractère non fragile des CMC par rapport à une céramique monolithique (source : Safran)

Les Composites à Matrice Céramique [CMC], de par la combinaison possible d'une large gamme de renforts textiles (fibres ou filaments, tissus, feutres, ...) et de matrices, sont conçus pour répondre à des sollicitations thermomécaniques à haute température, dans un domaine où les matériaux métalliques actuels ont atteint leur limite, tout en proposant un bénéfice de réduction de masse du fait de leur faible densité, valorisable à l'échelle de la conception des composants. Les filaments céramiques et les matrices céramiques sont intrinsèquement résistants aux températures élevées.

L'association de ces deux composants, au sein d'un CMC, permet d'aboutir à un matériau réfractaire et tolérant aux dommages, autrement dit non fragile, à condition que la modulation de la liaison filament-matrice soit correctement optimisée. Généralement, cette modulation de la force de liaison interfaciale est obtenue par l'interposition d'un troisième corps entre renfort et matrice, appelé interphase. A l'issue d'un long travail d'étude de comportement mécanique, d'analyse des forces de liaisons chimiques et d'optimisation microstructurale, le comportement « idéal » du composite céramique a pu être obtenu et maitrisé. Le triptyque de résistance en temps, température et environnement chimique a été le fil conducteur des développements successifs des CMC afin d'accéder à des concepts matériau répondant à un large spectre d'applications : de la très haute température/courte durée (cas de la propulsion à ergol solide), à la température modérée/très longue durée (cas de la propulsion aéronautique), en passant par un éventail d'autres applications nécessitant des réponses fonctionnelles spécifiques (freinage aéronautique, corps de rentrée, résistance neutronique, etc...). Par définition, les propriétés des CMC et donc les critères de dimensionnement résultants vont être dépendants, au premier ordre, du type de renfort et de matrice. Néanmoins, le choix des procédés de fabrication des CMC combinés aux règles de conception, y compris les singularités locales, sont également à prendre en compte dans la performance globale des pièces candidates. Compte tenu de l'aspect hétérogène multiphasique des CMC et des possibilités de contrôle de l'agencement du renfort fibreux, il est couramment admis que les performances d'un CMC ainsi que son aptitude à être mis en œuvre n'existent réellement qu'à travers la possibilité de concevoir et de fabriquer la pièce associée. Il s'agit là d'un principe de « conception fabricable » spécifique aux technologies composites, qui doit être entreprise pour aboutir à des pièces répondant aux exigences fonctionnelles. Cela nécessite un langage et des outils d'ingénierie optimisés entre la mécanique, la conception et l'architecture CMC, pour aboutir, après un cheminement itératif, à des pièces CMC répondant au meilleur compromis entre performance, coût et industrialisation.

La figure 2 illustre quelques cas d'applications qui montrent que, pour des temps courts, certains CMC peuvent être utilisés à de très hautes températures et qu'inversement pour des moyennes températures, les temps d'exposition pourraient être très longs. Ceci est souvent lié à l'inertie de phénomènes de dégradation et d'endommagement tels que l'oxydation, la fatigue et le fluage.

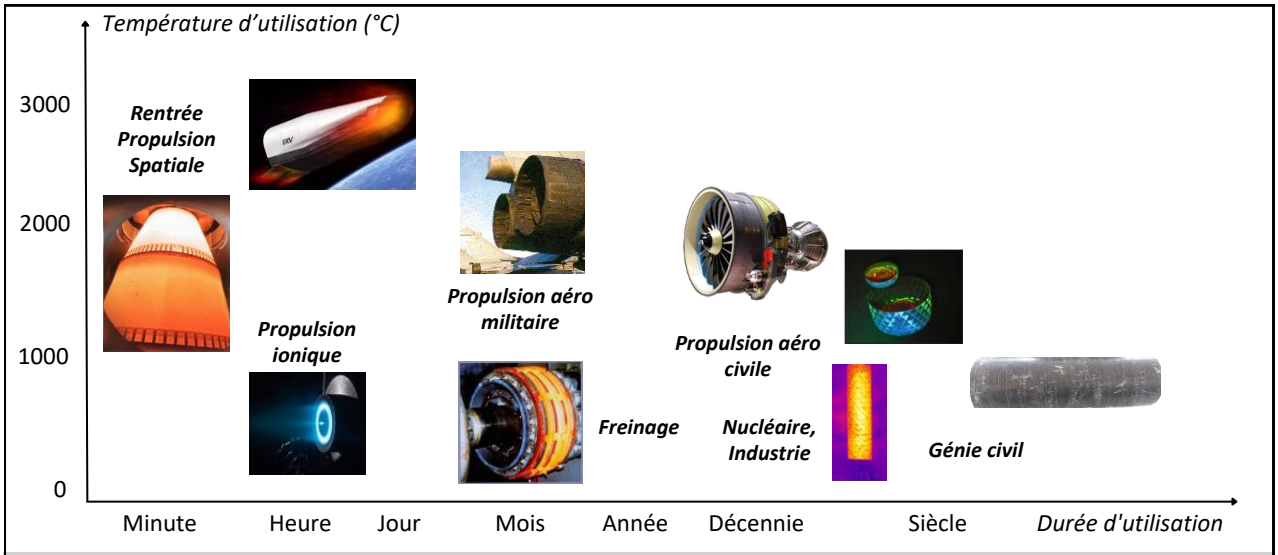

Figure 2 : Diverses applications des CMC dans un diagramme schématique temps-température (sources des images : ArianeGroup, CEA, ESA, IRT Saint Exupéry, Safran)

2.2 Domaines d'applications actuels et futurs

2.2.1 Domaine spatial

Le marché actuel des CMC dans le domaine spatial est constitué principalement de deux cibles produits : les cols et divergents des tuyères d'étages de propulsion et, dans un moindre volume, de protections thermiques d'engins de rentrée planétaire ou de structures dimensionnellement stables en température et résistant aux rayonnements pour des miroirs de télescope ou des systèmes de visée stellaire. Les cols sont aujourd'hui utilisés dans les étages à propulsion solide et sont de ce fait soumis à des températures extrêmement élevées, dépassant très largement les 2500°C, pendant des durées de quelques centaines de secondes. Les performances et la fiabilité de l'étage propulsif sont directement liées à la capacité du col CMC à résister à l'ablation, à limiter le transfert de chaleur vers les autres pièces composant la tuyère et à supporter les contraintes thermomécaniques qui en découlent compte tenu des différentiels de dilatation. Ce sont des pièces massives élaborées à partir de renfort en fibres de carbone et de matrice carbone pour lesquelles on recherche une densité la plus élevée possible.

Source ESA

Il s'agit d'un marché de niche qui ne concerne que quelques dizaines de pièces par an mais dont la défaillance aurait pour conséquence la perte du lanceur et donc de la mission. Les divergents sont eux utilisés aussi bien dans les étages à propulsion solide que ceux à propulsion liquide. Ces pièces sont à base de CMC constitués de fibre de carbone et de matrice Carbone et/ou Carbure de Silicium et doivent supporter à la fois des sollicitations mécaniques conséquentes, principalement dans les phases d'allumage et de séparation d'étages, et des températures élevées, pouvant atteindre presque les 2000°C, pendant des durées pouvant atteindre plusieurs milliers de secondes comme c'est le cas par exemple pour le divergent du moteur ré allumable Vinci du second étage d'Ariane 6. Contrairement aux cols, ceux-ci sont des pièces de forme non développable, qui sur les étages propulsifs supérieurs sont généralement de très grandes dimensions (jusqu'à 2-3 mètres de hauteur et diamètre) car une section de sortie du divergent élevée est favorable à la performance de l'étage.
Il s'agit là aussi d'un marché de niche et le savoir-faire dans la fabrication de pièces CMC de très grandes dimensions a permis de développer un marché d'exportation non négligeable à ce jour vers les motoristes américains.

Les protections thermiques en CMC des véhicules de rentrée planétaire ont commencé à être développées dans le cadre du projet d'avion spatial Hermes dans les années 1980. L'emploi des CMC permet de concevoir directement une structure chaude capable à la fois de résister aux importants flux thermiques d'une rentrée atmosphérique et de garantir la manœuvrabilité de l'engin en conservant le profil aérodynamique. Bien que cela ait constitué une véritable avancée technologique par rapport aux solutions existantes à base de matériaux ablatifs, l'arrêt prématuré du projet Hermes n'a pas permis de tester ces pièces en conditions réelles de rentrée atmosphérique. Cet objectif a été atteint avec succès en 2015 grâce au vol de la navette IXV financée par l'ESA.

Figure 3 : Divergent VINCI Ariane 6 ; Col de tuyère MPS Ariane 5 ; Protection Thermique IXV (sources : ArianeGroup, ESA)

2.2.2 Domaine aéronautique

Comme déjà mentionné, la plus grande production de masse de composites céramiques concerne encore aujourd'hui le freinage aéronautique. La France, à travers Safran, demeure le leader mondial de la production de frein carbone, équipant la plupart des puits de chaleur des avions civils et militaires (figure 4).

Figure 4 : Disque de frein en CMC C/C et puits de chaleur (source : Safran)

Même si les avantages et donc les composants cibles peuvent être différents entre les vecteurs militaires et les avions civils, les technologies CMC sont duales. Par conséquent, il y a une convergence de développement des technologies clés nécessaires à la conception des différents matériaux et procédés associés, les méthodes de caractérisation, les méthodes et outils de conception des composants.

L'intérêt principal, dans le domaine de la propulsion des futurs vecteurs militaires (aéronefs, drones, ...), est une augmentation de la poussée spécifique, induisant une augmentation globale de la température de fonctionnement, caractérisée par la température EGT [Exhaust Gas Turbine ou T41]. L'objectif couramment visé pour les prochaines générations de turbomachines militaires est d'atteindre une EGT d'environ 1750°C. Pour atteindre de telles températures de fonctionnement, les études techniques sont orientées vers des CMC de type carbure, revêtus de barrière à double fonction thermique et environnementale, pour la conception de composants de turbines haute pression (anneaux, aubes, distributeur) et potentiellement de turbines basse pression. Outre le gain de masse résultant, seuls les CMC autoriseront cet accroissement de température de fonctionnement des modules turbines, sans aboutir à des systèmes de refroidissement très complexes et très consommateurs d'air que nécessiteront le maintien de technologies

usuelles métalliques. L'autre domaine d'intérêt des CMC se situe au niveau des modules de postcombustion des avions de combat, en termes de durabilité, se traduisant par un accroissement de service en conditions opérationnelles. En effet, les pièces de ce module, en particulier les volets de tuyères d'échappement, souvent Convergent/Divergent, pour les aéronefs de dernière génération, sont soumis à des cycles thermiques extrêmement sévères, liés aux allumages de la postcombustion et à des flux thermiques fortement hétérogènes, de par l'agencement des volets de tuyère « en pétale » et de par la présence de sillages chauds au droit des bras « accroche-flammes ». Dans cet environnement, les tuyères de conception métallique peuvent présenter des limitations de durée de vie en service, effet qui sera amplifié par un accroissement de la température globale du moteur. Rappelons que dans ce domaine applicatif, la France fut la première à introduire une tuyère en CMC, sur l'avion de combat Rafale, dès la qualification du moteur M88.

Figure 5 : Tuyère en CMC de l'avion Rafale (sources : DGA, Safran)

Concernant le transport civil, la nécessité de converger vers une décarbonation et une diminution des impacts environnementaux de celui-ci, tout en évoluant dans un contexte d'accroissement du trafic aérien, impose des changements drastiques dans la conception des futures aéro-turbines, même si des améliorations significatives ont déjà été opérées sur les moteurs de dernière génération comme le CFM-LEAP. En Europe, les futures exigences du domaine de la construction aéronautique sont d'ordre économique et environnemental et essentiellement gouvernées par des objectifs à long terme issus des recommandations des groupes de travail ACARE (Advisory Council for Aeronautics Research and Innovation in Europe) et CORAC en France (Conseil pour la Recherche Aéronautique Civile). Il s'agit, en particulier, de réduire de 50% le bruit perçu (-10 dB), de réduire de 80% les émissions d'oxydes d'azote (NO_x), de réduire de 50% les émissions de gaz carbonique (CO_2), et de dépasser l'objectif de réduction de la consommation de carburant de 15%, le tout à des coûts acceptables par le marché. Ceci implique une réduction de la masse globale des aéronefs (structure et ensemble propulsif), et une amélioration de la performance moteur avec la réduction de son besoin en refroidissement (avec pour corollaire une augmentation des températures de fonctionnement). Les matériaux actuellement utilisés dans les moteurs et les nacelles ne permettent plus de satisfaire ce double défi : réduction de masse et tenue en température. Le grand programme « Environmentally Responsible Aviation » [ERA] piloté par la NASA décrit également des objectifs à moyen terme qu'il faudra atteindre pour répondre aux prochaines contraintes en termes de bruit, d'émissions polluantes et de consommation de carburant. La NASA a proposé une estimation des gains dans les prochains moteurs, par la seule action de la céramisation des composants : la conception et réalisation d'aubages mobiles et fixes HP et BP, d'anneaux de turbine HP et de la chambre de combustion en CMC pourraient conduire à une réduction globale nette de 6% de la consommation de carburant et une réduction supérieure à 33 % des émissions de NO_x.

Les performances des matériaux CMC, démontrées par l'ensemble des essais technologiques et démonstrations moteur, depuis maintenant plus de 10 ans par les grands motoristes du domaine, confirment le grand potentiel de cette technologie. Deux exemples de démonstration sont présentés aux figures 6 et 7.

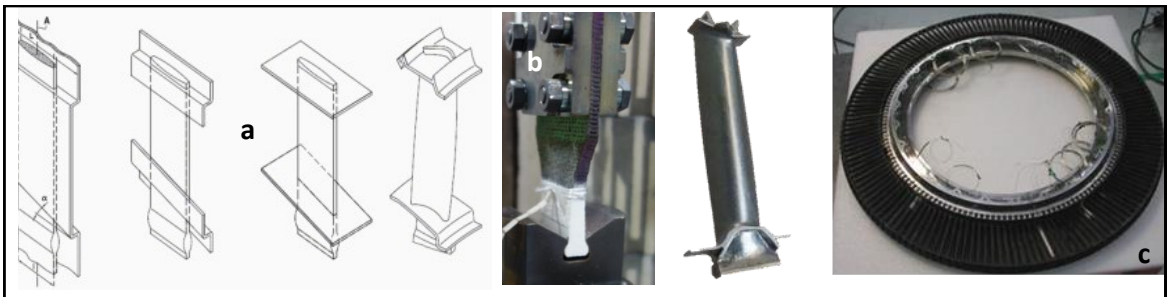

Figure 6 : Démonstration d'aube CMC pour RBP1 CFM56, (a) technologie textile intégrale, (b) essai pied bulbe, (c) roue complète CMC RBP1 pour essai sol CFM56 (source : Safran)

Figure 7 : Démonstrateur d'arrière-corps traité acoustique (basse fréquence) en CMC : des essais technologiques à la certification EASA pour vol sur avion de ligne Air France (source : Safran)

Dans ce contexte, les grands objectifs des CMC et gains potentiels associés sont schématisés à la figure 8. Un fort investissement doit être mis en France sur les composites céramiques pour acquérir une avance compétitive dans la conception et réalisation des futurs ensembles propulsifs aéronautiques. Nous constatons d'ailleurs, que cette démarche est dorénavant inscrite dans les stratégies techniques de tous les grands motoristes (General Electric, Safran, Rolls-Royce, Pratt & Witney, IHI, ...), avec un niveau d'effort de R&T également très significatif.

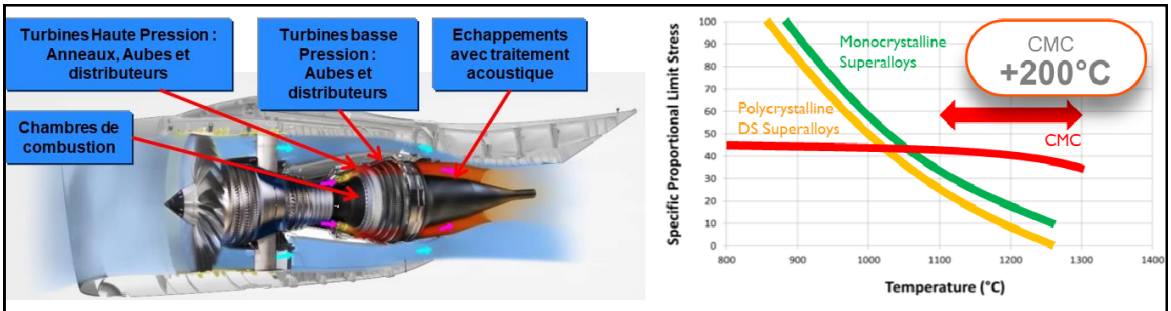

Figure 8 : Gains sur moteur aéronautique de l'utilisation des CMC (source : Safran)

2.2.3 Domaine de la défense

La Défense s'intéresse aux CMC principalement dans deux domaines. Le premier concerne la propulsion aéronautique, qui a été détaillé ci-dessus, où les CMC seront présents dans les parties chaudes des turboréacteurs qui équiperont le NGF (Next Generation Fighter) du programme européen (France, Espagne, Allemagne) SCAF (Système de Combat Aérien du Futur). Dans le cas général, ces matériaux seront utilisés dans les nouveaux moteurs militaires en raison des gains de performance rendus possibles par des températures de fonctionnement toujours plus élevées.
Le second domaine concerne les missiles où les applications actuelles (force océanique stratégique) et en développement (hyper véloces) sont localisées d'une part au niveau du système propulsif et d'autre part sur la structure du vecteur qui est soumise à un échauffement cinétique. La technologie CMC est incontournable pour ce type d'armes.

Depuis les années 1990, les CMC sont de plus en plus utilisés dans les systèmes aérobies haute vitesse, dont les missiles tactiques, à la fois pour la propulsion (notamment statoréacteur) mais aussi les aérostructures, fuselages ou points d'arrêt. Les spécificités de solutions d'industrialisation, de coût, d'utilisation et la communauté d'intérêts avec les filières de dimensionnement de composites « froids » des missiles tactiques existants, conduisent à des options particulières pour les composites « chauds », en particulier à matrice céramique.
A ce jour, grâce au fort soutien de la DGA, ArianeGroup et MBDA disposent des moyens de production composite correspondants aux besoins actuels et aux cadences des projets concernés, ainsi que de méthodes de dimensionnement et de justification capables de prendre en compte les particularités des CMC.
Pour ces domaines stratégiques, l'effort ne doit pas être relâché pour préparer les applications et les capacités futures.

Si pour les missiles balistiques les tirs de qualification sont des évènements majeurs dans le processus de développement des pièces CMC équipant ces engins, pour les missiles tactiques il est possible, depuis 1990, de mener des essais en environnements représentatifs de structures CMC dans la soufflerie statoréacteur de Bourges-Subdray, sur des durées correspondant aux applications réelles et sur des systèmes grandeur nature.
A Bourges, les moyens de production ont même été modifiés pour intégrer la fabrication de structures en CMC fonctionnalisés. Ce soutien de la DGA dans ce (discret) processus de plusieurs décennies est accompagné de soutiens ponctuels par exemple de la Région Centre Val de Loire ou d'instances de la Communauté Européenne pour l'extrapolation à d'autres applications que la défense.

Concept de missile hypersonique utilisant des matériaux réfractaires. Copyright: MBDA M. Cherfi

2.2.4 Domaine de l'industrie nucléaire

Le marché des CMC dans le domaine des réacteurs nucléaires est exclusivement limité aux SiC/SiC à ce stade et est actuellement constitué de deux cibles : le gainage du combustible et les pièces de cœur (barres de contrôle, grilles, tubes de guidage, ...) des réacteurs à fission et les matériaux qui feront face au plasma et aux rayonnements des réacteurs à fusion.

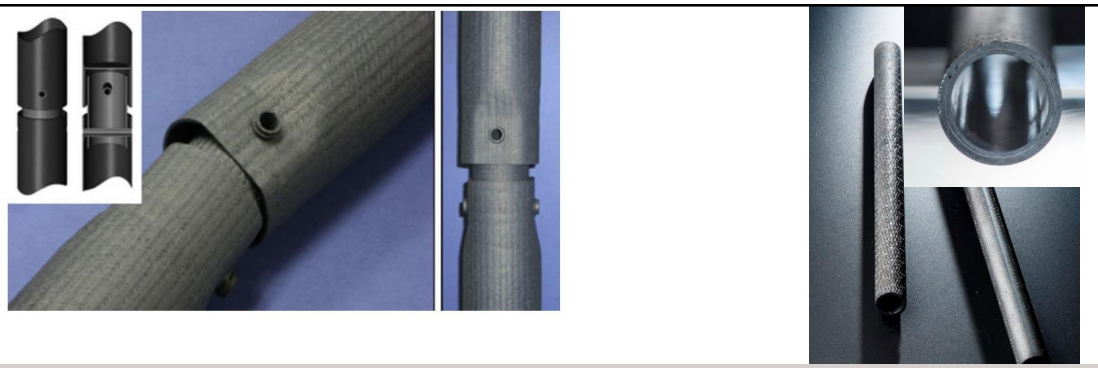

Figure 9 : Prototypes de tube de gainage du combustible de fission nucléaire (© Stroppa)
Prototypes de barre de contrôle pour réacteur à très haute température (VHTR) [Katoh et al, 2012]

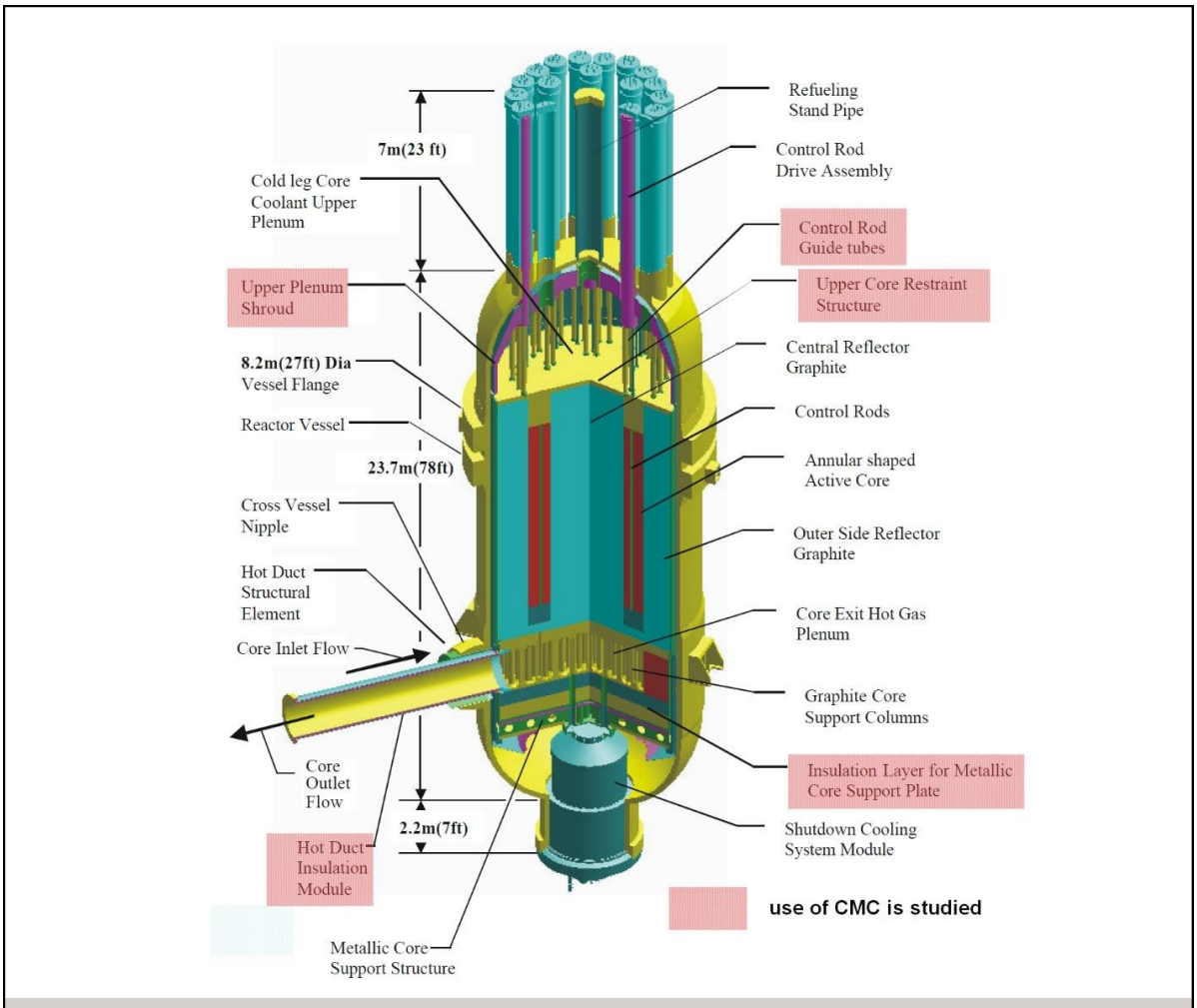

Figure 10 : Utilisation envisagée des CMC dans un cœur de réacteur nucléaire à haute température [Baccaglini et al, 2003]

Dans un contexte où la sécurité et la performance sont primordiales, les CMC (SiC/SiC) doivent permettre de répondre à de nombreux enjeux qui sont :

- l'amélioration de la sureté des réacteurs actuels vis-à-vis de situations accidentelles en augmentant la résistance du cœur à très haute température en environnement corrosif,
- le développement de réacteurs de 4ième génération grâce aux bons comportements des CMC à haute température sous environnement neutre (fonctionnement nominal) et corrosif (situation accidentelle),
- la mise au point de structures résistantes pour être mises en face du plasma des réacteurs à fusion ou pour réaliser les modules de la couverture tritigène dans ces mêmes réacteurs.

2.2.5 Autres domaines industriels

Le marché des CMC dans le domaine industriel reste à développer à ce jour. En effet, grâce à leurs propriétés particulières de tenue en température et notamment aux forts gradients, ainsi que par leur acceptation d'une déformation supérieure à ce qui est admissible pour une céramique usuelle, le champ d'action des CMC peut être très intéressant pour des applications moins exigeantes en termes de certification que le spatial ou l'aéronautique. Notons quelques initiatives qui peuvent être intéressantes comme des pièces structurales à hautes températures dans l'industrie lourde où les métaux (sensibles au fluage) et les céramiques monolithiques (trop fragiles) ne peuvent répondre aux besoins.
A titre d'exemples concrets, nous pouvons citer les pièces techniques de fours industriels (injecteurs, brûleurs ou brides) (figure 11) ou encore les chemisages des alvéoles de stockage des déchets nucléaires haute activité. Dernier exemple, les besoins dans le domaine de l'industrie chimique où des environnements particulièrement corrosifs sont présents. C'est le cas dans les procédés mis en œuvre pour le retraitement des combustibles nucléaires où les CMC pourraient présenter une alternative intéressante aux alliages métalliques.

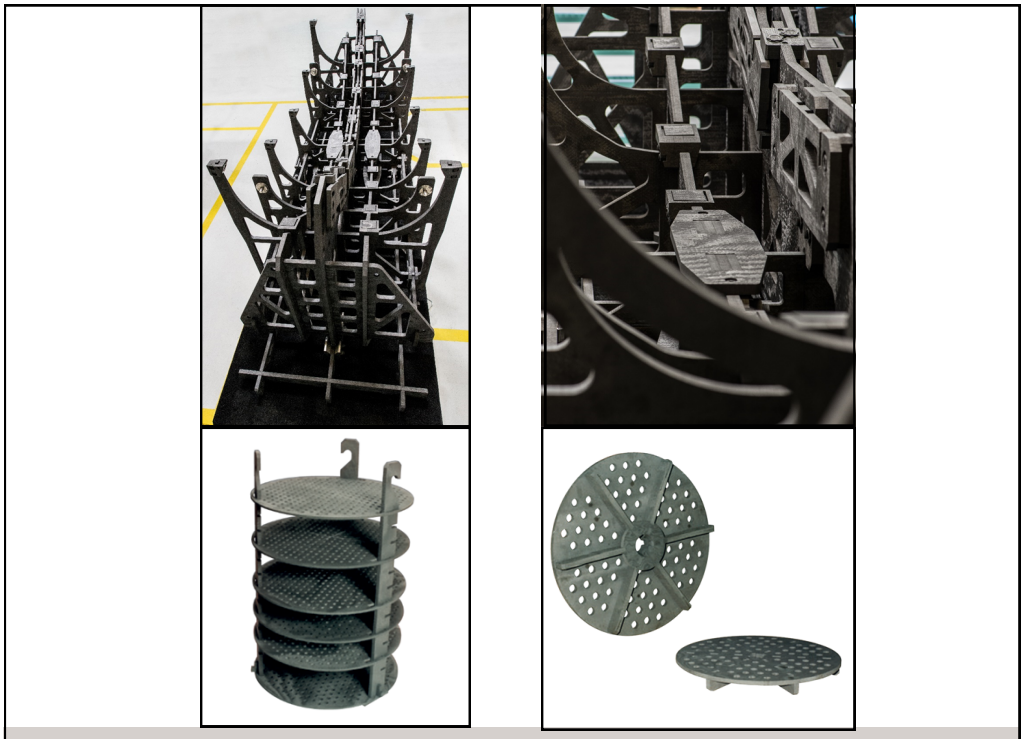

Figure 11 : Outillage en composite CC de conformage en température de pièces en titane (en haut) et plateaux de traitement thermique (en bas) (Source : ArianeGroup)

2.2.6 Domaine de la compétition automobile

Le sport automobile, qu'il s'agisse de la Formule 1 ou des autres championnats, est un marché de niche pour les CMC mais surtout un réel laboratoire technologique pour expérimenter et développer des solutions de maîtrise de la température (pièces thermostructurales, protection thermique et gestion des flux de chaleurs). Les solutions développées sont principalement dans les zones de moteurs, zones de freinages et gestion des gaz d'échappement. Certains éléments de carrosserie extérieure trop proche des systèmes d'échappement sont aussi réalisées en CMC. La plupart des écuries et des motoristes de la Formule 1 utilisent les CMC depuis plus de 15 ans.
Différentes compétitions automobiles sont concernées par ces applications : Formule 1, WRC, DTM, IndyCar, SuperGT ou encore sur les prototypes du Mans. Les valeurs ajoutées principales des CMC sur ces applications sont le gain de masse par la fourniture de pièces 2 fois plus légères que le titane et 4 fois plus légères que les aciers et les superalliages et le renforcement de la sécurité à travers la maîtrise de la température et des flammes.

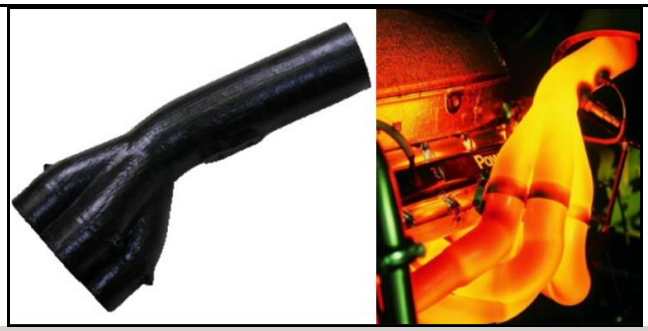

Figure 12 : Exemple de collecteur d'échappement en CMC (à gauche) et imagerie thermique de la pièce en usage (à droite) (source : Pyromeral Systems)

2.2.7 Domaine des nouvelles mobilités

Le marché des CMC dans le domaine « mobilité » est actuellement principalement centré sur la conception des caissons de batteries lithium-ion notamment pour les eVTOL (« Electric Vertical Take-Off and Landing »), i.e. les aéronefs électriques à décollage et atterrissage verticaux. En effet, l'utilisation de ces batteries expose à des risques d'emballement thermique, de pollution et d'incendie.
Les CMC, réfractaires et légers, permettent de résoudre ce problème. Ils ne dégagent pas de fumées ou de gaz nocifs et permettent de tenir les exigences de sécurité incendie les plus strictes.

Figure 13 : Plaque CMC PyroKarb ® avant un test d'emballement thermique de batterie (à gauche) et après le test (à droite) (Source : Pyromeral Systems)

2.2.8 Exemples de marchés actuels et potentiels

MARCHÉS ACTUELS/POTENTIELS			
	Hautes Températures	Moyennes Températures	Basses Températures
Domaine Défense partie missile	Propulsion des missiles tactiques et stratégiques, notamment statoréacteurs et propulsion haute vitesse de missiles tactiques Corps de rentrée Fuselages, nez, ailes et gouvernes aérodynamique pour système de défense très haute vitesse	Propulsion Fuselages allégés	Solutions à faible élongation en température Peut-être blindage
Spatial	Cols et divergents de tuyères pour moteurs Protections thermiques pour engins de rentrée planétaires	Protections thermiques et autres pièces réutilisables pour lanceurs et engins de rentrée planétaire	Structures spatiales dimensionnellement stables,...
Aéronautique	Module de post-combustion d'avion de combat Pièces de turbine haute et basse pression aéro-turbines militaire et civile Freinage aéronautique	Tuyères d'avions de combat Tuyères d'hélicoptère Arrière-corps d'échappement d'avions civiles	Pièces tièdes en limite des CMO
Energie (Nucléaire)	Structures en vis-à-vis du plasma dans les réacteurs à fusion Matériaux de cœur des réacteurs de Génération III et IV en situation accidentelles	Matériaux de cœur des réacteurs à fusion et fission de génération IV	Matériaux de cœur des réacteurs de génération III
Industrie	Eléments de fours industriels – réacteurs pétrochimiques Supports de cuisson – brûleurs – réacteurs chimiques	Bouclier/tampon thermique – fenêtre radio-transparente	Isolation thermique – fenêtre radio-transparente
Compétition / Mobilité	Casing Batteries : Protection Feu/Flame eVTOL : electric Vertical Take-off and Landing	Barrières thermiques des turbos & freinages des véhicules de compétition	Exhaust et End-pipe (sortie d'échappement) pour drone et véhicules de compétition

3 CONTEXTES INTERNATIONAL ET NATIONAL

3.1 Environnement international

En Europe, outre la position de leader de la France, les autres acteurs sont l'Allemagne et le Royaume-Uni et, dans une proportion bien plus faible, l'Italie (à l'exception faite d'applications potentielles non publiques dans le domaine de la défense).

En Allemagne, l'activité sur les CMC est fédérée dans l'Arbeitskreis (AK) Verstärkung Keramische Werkstoffe (renforcement des matériaux céramiques) de la DKG (Société Allemande des Céramiques), qui est devenu le « CMC network » de l'association Composites United. S'y rencontrent des membres d'Universités et de Centres de Recherches, d'Instituts Fraunhofer (ISC/HTL Bayreuth, ICTS Dresde), l'agence aérospatiale DLR qui a un très grand rôle moteur, de gros industriels comme SGL, Schunk et ArianeGroup GmbH et des PME/ETI comme Pritzkow, WPX et BJS. Les points forts de l'activité allemande sont d'une part les C/C et C/SiC pour le freinage automobile et d'autre part le développement de pièces de fours pour l'industrie. Sur les composites oxyde/oxyde, l'Allemagne est en passe de prendre le leadership européen. Le montage d'une chaîne de développement et d'approvisionnement complète est dans leurs priorités. C'est actuellement le seul pays d'Europe, avec la France, où l'on développe des filaments céramiques.

Au Royaume-Uni, Le National Composites Centre a investi dans la création d'une unité spécifique au développement des CMC ; il soutient aussi le projet Cercomp UK qui vise à doter le Royaume-Uni d'une chaîne d'approvisionnement autonome en CMC destinés à la propulsion aéronautique. Le support académique vient d'universités comme celle de Birmingham, de Sheffield, de Bristol, l'Imperial College, etc. Sur le plan défense, l'ancienne agence DERA, devenue QinetiQ, a semble-t-il perdu sa vision CMC. Dans le domaine aéronautique, la plupart des activités se fait avec le support des Etats-Unis, en particulier Rolls-Royce USA et son centre de recherche de Cypress.

En Italie, l'activité n'est pas fédérée spécifiquement. Quelques centres académiques (Politecnico di Torino, Università di Pisa, ISSMC-CNR) se distinguent par leur activité et leur présence dans des projets Européens ; par ailleurs, plusieurs agences nationales sont présentes (ENEA (agence de l'énergie), CIRA (agence aérospatiale) en particulier). Sur le plan recherche, les deux points forts sont d'une part le développement de techniques d'assemblage des CMC et d'autre part la mise au point de CMC à matrice ultra réfractaire (UHTCMC).

Ailleurs en Europe de l'Ouest, on ne rencontre que quelques activités isolées en Espagne, Slovénie, Slovaquie et Pologne.

La Fédération de Russie, héritière de l'URSS, a aussi une activité dans ce domaine, quoique difficile à quantifier voire parfois à identifier. Celle-ci s'appuie en premier lieu sur un ensemble d'universités polytechniques (St-Petersbourg, Belgorod, ...) et sur l'Académie des Sciences (Moscou, Chernogolovka, Syktyvkar, ...). L'entreprise JSC Kompozit est clairement référencée sur la production de CMC, même si elle est de taille très modeste.

Aux USA, on remarque de prime abord le rôle très important de la NASA, du DOE (ministère de l'énergie) et du DOD (ministère de la Défense) dans le financement et le développement des applications et la structuration de la R&D sur ces matériaux. Les grands motoristes de l'aéronautique (General Electric (GE), Rolls-Royce, Pratt & Whitney) sont également financeurs directs de programmes de R&D.

GE est le motoriste le plus avancé au monde dans la création d'une chaîne d'approvisionnement complète, de la conception à la production série de composants d'aéroturbine ; elle a pour cela développé des partenariats internationaux (Nippon Carbon, Safran). Pour le nucléaire civil, Westinghouse et General Atomics (GA) jouent un rôle similaire et apportent un soutien dynamique. Pour le spatial et la défense, on retrouve divers acteurs comme Lockheed-Martin, SpaceX et d'autres qui développent des CMC. Le contexte géopolitique actuel les amène à redoubler d'activité dans ce dernier domaine. Grâce à des entreprises comme COIC, 3M, AXIOM et CHI, fabricants industriels de filaments, semi-produits et/ou de CMC, la ***supply chain*** américaine est robuste.

En Asie, quatre pays sont à suivre :

Au Japon, le JFCC (Japan Fine Ceramics Center), des Universités (Tokyo University of Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology, …), des agences comme la JAXA et la JAEA, de gros industriels comme IHI, Mistubishi, Kawasaki (aéronautique) et Toshiba (nucléaire), se sont unis pour créer un Centre des CMC (CMCC) à Tokyo Tech (dirigé par le Pr. Kagawa). Leurs points forts sont la production nationale de filaments non-oxyde et carbone, une forte culture de la céramique et une vision concertée du développement et de la recherche sur les CMC.

En Corée du Sud, on note essentiellement des activités autour du C/C pour le freinage, avec l'entreprise DACC, des SiC/SiC nucléaires sous l'égide de l'agence de recherches atomiques KAERI et quelques activités de défense.

En Chine, l'activité dans le domaine des CMC est tous azimuts, avec une forte ossature adossée au militaire au travers d'Universités Polytechniques (comme la NWPU de Xi'An, le NUDT de Changsha et l'Université BeiHang de Beijing), avec des Centres Technologiques associés. Il y a une intense activité de dépôt de brevets (y compris de la « ré-innovation » nationale) et de publications scientifiques. La Chine est actuellement le pays qui publie le plus dans le domaine des CMC, avec une préférence marquée pour les matériaux ayant des applications duales : C/C renforcés par ultra-réfractaires, CMC à propriétés électromagnétiques spécifiques (absorbants ou transparents), …. La Chine se dote elle aussi d'une chaîne d'approvisionnement complète allant de la production de filaments céramiques jusqu'à tous types de CMC.

L'Inde présente une forte croissance de son activité sur les CMC dans les années récentes, localisée en particulier dans des Instituts de Technologie (IIT) et des centres de recherches (NAL par exemple), avec l'appui de l'agence spatiale ISRO et des agences liées à la défense (DRDO).

Sur le plan économique, selon divers rapports d'analystes financiers - dont les avis sont largement divergents - les CMC représenteraient en 2022 un volume mondial entre 3 et 12,6 Md$ de marché avec une moyenne des estimations aux alentours de 8 Md$. Les CMC représenteraient entre 5 et 10% du volume du marché des composites en général, avec un Taux de Croissance Annuel Consolidé (CAGR) aux alentours de 9% qui se maintiendrait depuis de nombreuses années ; certains analystes prévoient même une augmentation significative de cette croissance à l'horizon 2030, jusqu'à 14%.

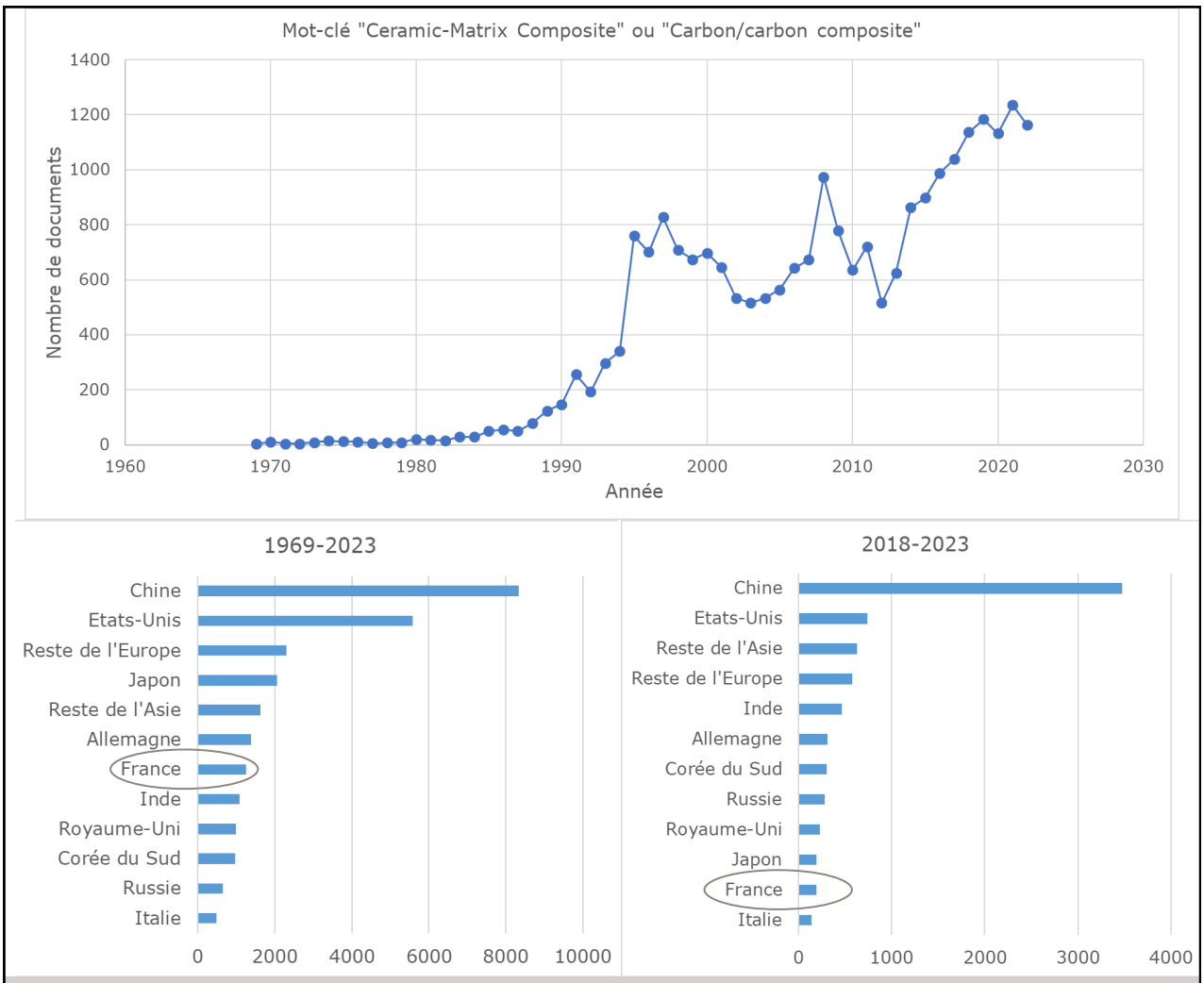

Figure 14 : Nombre de publications scientifiques (articles et actes de conférences) recensés par Scopus sur les mots-clés « Ceramic-Matrix Composites » et « Carbon/Carbon composites ». Nombre total de publications par an depuis 1969. En bas, la répartition par pays pour toute la période 1969-2023 (à gauche) et pour les 6 dernières années (à droite)

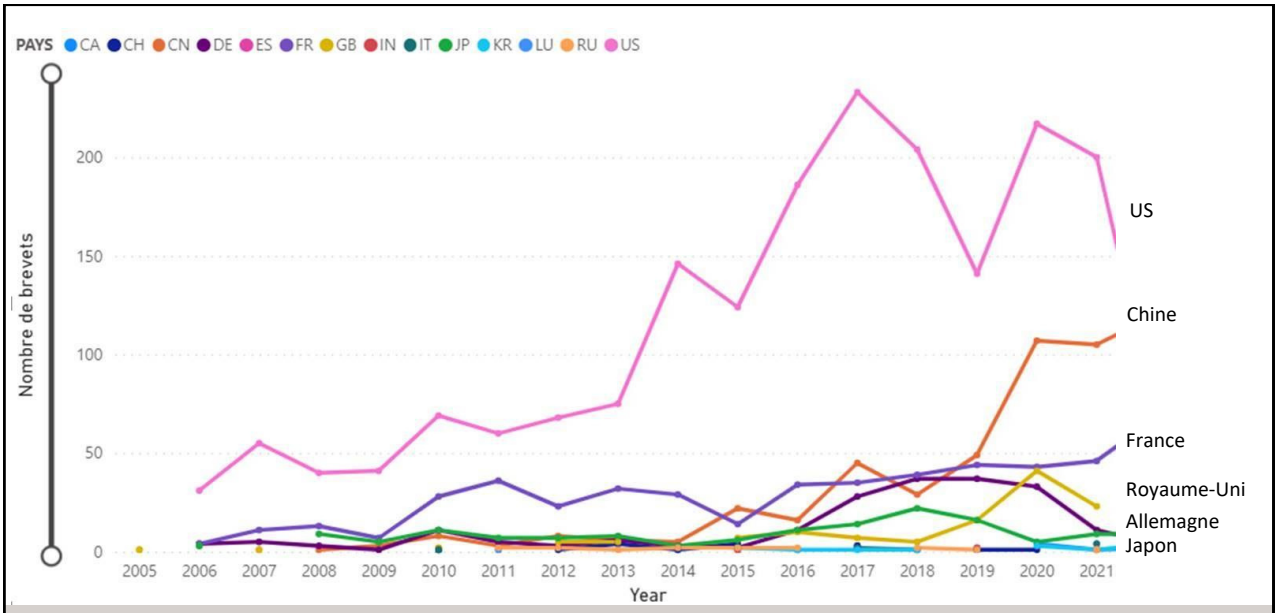

Figure 15 : Evolution annuelle du nombre de brevets sur les technologies CMC (carbone/carbone non inclus)

Des indicateurs de l'activité des différents pays sur les CMC sont les statistiques sur les brevets et les publications. Une analyse de recherche sur mots-clés « ceramic-matrix composite » et/ou « carbon/carbon composite » (figure 14) montre que le nombre total de publications est actuellement en croissance linéaire. En termes de publications depuis 1969, la France est en 7e position mondiale, derrière les USA, la Chine, le Japon et l'Allemagne, mais si l'on restreint la recherche aux 6 dernières années, la France tombe en 11e position.

Sur le nombre de brevets, la France est très bien positionnée surtout ces dernières années, juste derrière la Chine qui connait une forte croissance ces deux dernières années et les Etats-Unis bien sûr qui brevètent significativement sur le sujet.

3.2 Filière française

3.2.1 Académiques (enseignement et recherche)

La recherche académique sur les CMC est très active en France dans les différents domaines allant de la formulation et des procédés jusqu'aux études de comportement ainsi qu'à la modélisation des matériaux et des assemblages.
C'est pourquoi un GDR dédié à ce type de matériau composite (GDR CNRS 2065 (CMC)2) a été mis en place par le CNRS en 2019, faisant suite à plusieurs groupements scientifiques (GS, CPR, PRC, projets FUI) regroupant des acteurs académiques et des acteurs industriels.

Le présent GDR regroupe 19 unités mixtes de recherche CNRS associées à plusieurs sections du CoNRS (sections : 15, 9, 10, 5), mais aussi des Directions ou Départements du CEA, de l'ONERA et de l'Andra ainsi que les principaux industriels nationaux (ArianeGroup, DGA, MBDA, Pyromeral Systems, SAFRAN Ceramics, Saint-Gobain) fabriquant et/ou utilisant les composites céramiques. L'IRT Saint Exupéry, reliant le monde industriel à la recherche, est également très contributeur. Le GDR constitue un groupe d'échanges scientifiques entre ses différents acteurs au travers d'ateliers et de journées scientifiques sur des sujets d'intérêt commun, traditionnels ou prospectifs, dans l'objectif de consolider la communauté scientifique française et de développer des collaborations entre les différents partenaires.

Au niveau de la formation, les masters universitaires et formations spécifiques de dernière année d'école d'ingénieur sont plutôt dédiés aux matériaux composites dans leur ensemble, avec quelques interventions faites par des experts sur les composites céramiques, ou bien sur les céramiques mais sans vue spécifique sur les composites ; il n'y a, en revanche, pas de formation de niveau master dédiée aux CMC et aux différents aspects qui les concernent. Ceci constitue un frein à la diffusion de la connaissance et de la culture de ces matériaux spécifiques.
Au sein du GDR, une école thématique intitulée 'composites céramiques : un tour d'horizon' a été organisée et a regroupé une centaine de participants issus des différentes entités du GDR, montrant un intérêt fort pour ce type de formation au niveau des jeunes ingénieurs et chercheurs : la culture CMC est quasiment absente de leur formation. De nombreux ateliers organisés par le GDR viennent apporter une vision complémentaire sur des sujets plus spécifiques.

Il est clair qu'une diffusion plus large de ces connaissances permettrait, d'un point de vue général, d'apporter aux personnes encore peu familiarisées une meilleure compréhension de ces composites et d'étendre ainsi leur utilisation dans le milieu industriel.

3.2.2 Carte des principaux acteurs nationaux du domaine

Le tableau suivant présente les acteurs français liés aux matériaux CMC et aux technologies associées. Des acteurs y sont présents à tous les niveaux ; cependant, ce tableau ne reflète pas la structuration d'une *supply chain* efficiente.

Figure 16 : Cartographie des acteurs français liés aux matériaux CMC et technologies associées

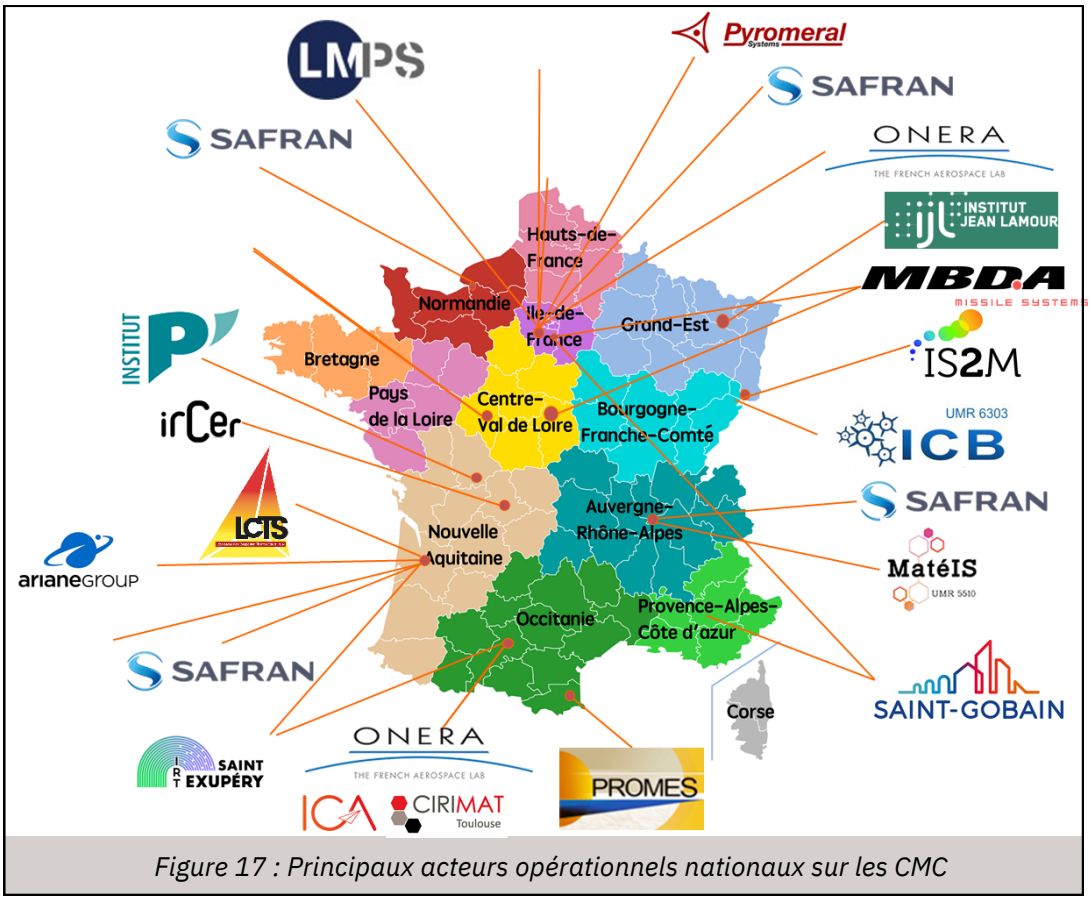

Figure 17 : Principaux acteurs opérationnels nationaux sur les CMC

3.2.3 Donneurs d'ordre publics et sources de financement

Actuellement, les principaux sponsors dans ce domaine technologique sont la DGAC, la DGA (AID), l'ANR, l'ANRT ou encore la région Nouvelle Aquitaine qui soutient activement et depuis de nombreuses années ce secteur d'activité.
A ce jour, nous constatons qu'il est difficile d'obtenir des financements autrement que via des programmes applicatifs mais ceux-ci ne s'adressent qu'à des technologies relativement avancées en termes de TRL. Cet état de fait ne permet pas de pérenniser et développer un socle commun solide de compétences nationales dans ce domaine (technologie en rupture, innovation et recherches fondamentales).

3.2.4 Forces et faiblesses

Jusqu'à présent, de nombreux projets sont pilotés de façon relativement isolée avec peu d'initiatives coordonnées entre donneurs d'ordres, utilisateurs finaux, acteurs de la filière, fabricants et universitaires.
La situation actuelle laisse une impression d'opportunité plutôt que d'une démarche globale illustrant une vision partagée : là est donc l'enjeu de la structuration de cette filière française des composites céramiques.

Forces

- Domaine d'excellence en France
- Industriels leaders du domaine
- Expertise en sciences fondamentales
- Des technologies en service
- Domaines applicatifs concrets identifiés

Faiblesses

- Dépendance à l'approvisionnement extra-européen de produits de base
- Matériaux non démocratisés par méconnaissance des performances et de formation et enseignement spécialisés
- Marché de niche
- Structuration de la filière nationale faible principalement du fait d'une confidentialité forte sur ce domaine
- Coût encore trop élevé de ces matériaux pour certaines applications

Opportunités

- Contribution à la réduction de l'empreinte carbone par amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes.
- Evolution géopolitique et prise de conscience associée : technologie stratégique pour notre souveraineté
- Emploi limité de « minerais de conflit »
- Potentiel de croissance élevé

Menaces

- Insertion trop tardive dans le marché par rapport aux concurrents
- Déclassement et perte de leadership
- Perte de compétence
- Perte de capacités industrielles

4 ENJEUX SOCIETAUX ET STRATEGIQUES : RÔLE DES CMC

Toute ambition scientifique et technique nationale doit s'accompagner d'une préoccupation permanente de répondre aux enjeux stratégiques et sociétaux auxquels la France devra faire face dans les années à venir. En ce qui concerne les matériaux composites céramiques, nous pouvons d'ores et déjà raisonner à court et moyen terme.

4.1 Enjeux sociétaux

Parmi les enjeux sociétaux majeurs du 21ème siècle figurent la limitation du réchauffement climatique et la bonne gestion des ressources énergétiques. Les matériaux CMC peuvent contribuer aux deux. A court terme, le besoin d'alléger les structures dans le domaine des transports est une évidence technologique. En effet, tout gain de masse a une conséquence directe sur la consommation et donc sur le bilan carbone.

Avec les combustibles actuels, cet effet est direct ; avec les autres types d'énergies dites décarbonées, cet avantage se traduit sur la masse des stockages d'énergies embarqués. Dans tous les cas, faire fonctionner un moteur à très haute température permet d'augmenter le rendement des moteurs et donc de consommer moins.

Sur ce point les composites céramiques sont, comme l'illustre le paragraphe 2.1, quatre fois plus légers que les métaux traditionnels. Ils amènent donc une plus-value indéniable sur la masse des structures et des motorisations.

Par ailleurs, sur les aspects durabilité, il est bien démontré aujourd'hui que les CMC apportent une plus-value dans tous les domaines où les métaux ne présentent pas une durée de vie suffisante en raison de la corrosion ou de la tenue à hautes températures et où les céramiques techniques traditionnelles présentent une tenue mécanique et une résistance aux chocs thermiques moindres.
Cette très bonne tenue thermomécanique permet par exemple de faire fonctionner les moteurs des avions à plus hautes températures et offre donc des opportunités réduction de consommation de carburant.
Dans l'industrie lourde, les CMC ont également un potentiel élevé pour contribuer à la sobriété énergétique.
L'utilisation des CMC pour la nouvelle mobilité, en particulier en tant que matériaux de caissons de batteries, contribue à sécuriser ces technologies d'avenir.
Plus généralement, les CMC offrent une protection spécifique contre une grande variété d'évènements accidentels (fuites d'éléments radioactifs, incendies…). Les investissements pour répondre à ces enjeux devront se concentrer sur la réduction des coûts de fabrication par l'optimisation des procédés en termes d'énergie et de durée. Cette réduction peut passer par l'innovation en imaginant de nouveaux procédés ou par l'optimisation en utilisant de la modélisation numérique réaliste et adaptée. Ces verrous scientifiques et technologiques induits seront détaillés au paragraphe 5.

4.2 Enjeux stratégiques

Les transports, l'énergie et l'accès à l'espace sont des domaines où les enjeux sont certes économiques mais également stratégiques. La France se doit de préserver une indépendance significative dans ces domaines.

Si les deux premiers peuvent s'instruire à l'échelle européenne, le troisième avec son volet Défense représente un vrai enjeu stratégique d'indépendance et de souveraineté nationale.

Comme le montrent les rappels historiques du chapitre 1, l'histoire des CMC est intimement liée à la montée en maturité de l'indépendance française dans le domaine de la dissuasion nucléaire.

Tous les véhicules spatiaux actuels ou futurs, parce qu'ils sont soumis à de hautes contraintes thermiques, nécessitent ou nécessiteront des composites céramiques. Ils permettent de voler plus longtemps (fortes énergies) et plus vite (forts flux et Mach).
Les CMC resteront un passage obligé pour le maintien d'une indépendance et souveraineté nationale dans le domaine de l'accès à l'espace et répondre, pour ce qui concerne le spatial civil, aux deux enjeux principaux que sont :

- la conservation d'une indépendance européenne pour l'accès à l'espace et le retour sur terre grâce à :
  - Des lanceurs économiques en réduisant le coût du kg mis en orbite, et polyvalents, c'est-à-dire capables de mettre en orbite aussi bien des grappes de centaines de petits satellites que de très gros et coûteux satellites comme le télescope James Webb récemment mis en orbite avec succès par Ariane 5 ;
  - Des systèmes de transport économiques et fiables capables de ramener sur terre en toute sécurité aussi bien du fret que des humains.
- la capacité de la France à se positionner rapidement sur des marchés émergents qui, dans le cadre du New Space, pourraient être amenés à croître ;

L'indépendance énergétique de la France représente également un autre enjeu stratégique. Dans ce domaine, l'énergie nucléaire est un des piliers du mix énergétique français. Une des problématiques les plus importantes liée à cette énergie est celle du stockage des déchets. Là, les CMC peuvent aussi avoir leur rôle à jouer. En effet, leur stabilité physico-chimique longue durée associée à une rigidité élevée leur permet d'être de bons candidats pour le chemisage des alvéoles de stockage de longue durée des déchets de haute activité à la place des solutions actuelles en acier.
Les investissements à venir pour répondre à ces enjeux stratégiques devront se concentrer sur les performances et la dissémination de la culture matériaux composites céramiques dans les secteurs académiques et industriels.
L'accroissement des performances au juste besoin passe, à l'instar du paragraphe précédent, par de l'innovation en conception (réduction des cycles de conception et concepts astucieux) et par une parfaite maîtrise des marges en utilisant de la modélisation numérique réaliste et adaptée. Ces verrous scientifiques et technologiques induits seront détaillés au paragraphe 5.

5 VERROUS SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES A INSTRUIRE

Pour que les CMC puissent pleinement participer au développement de solutions technologiques performantes pour répondre aux enjeux sociétaux, stratégiques ou économiques énoncés précédemment, de nombreux verrous scientifiques et technologiques restent à lever. Ceux-ci peuvent être classés en quatre catégories :

5.1 Améliorer la performance de ces matériaux

Bien que doté de performances exceptionnelles, les CMC verraient leur utilisation fortement se développer si des progrès substantiels étaient atteints dans les domaines suivants :

- **Fragilité - Déformabilité**

Même s'ils sont beaucoup moins fragiles et plus déformables que les céramiques monolithiques il n'en demeure pas moins que les propriétés d'allongement à rupture de ces matériaux peuvent, pour certains domaines d'application, soit s'avérer encore insuffisantes soit complexifier les démarches de justification.

- **Température maximale d'utilisation**

Malgré les hauts points de fusion des céramiques, la conservation des propriétés mécaniques et des profils géométriques à très haute température et environnement chimique agressif des CMC nécessite encore de nombreux développements pour, par exemple dans le domaine aérospatial, augmenter la performance des systèmes propulsifs par l'amélioration de la tenue à l'ablation des cols de tuyères.

- **Variabilité des propriétés**

Ces matériaux présentent souvent des dispersions de propriétés élevées qui reflètent la variabilité des procédés et constituants. Une réduction de cette dispersion serait un facteur facilitant le contrôle et la justification des pièces en CMC.

- **Etanchéité des structures**

Le mode d'endommagement de ces matériaux (multi fissuration matricielle) les rend par nature non étanches au-delà de leur domaine d'élasticité linaire. Pour certaines applications (gainage de réacteur nucléaire, réservoir, …) l'étanchéité de structures CMC doit être garantie jusqu'à leur rupture ultime (bien au-delà de la limite d'élasticité linéaire). Il est donc nécessaire de développer des solutions pour répondre à cette problématique.

- **Fonctionnement sous irradiation neutronique**

Les contraintes liées à l'irradiation sont particulièrement sévères et nécessitent l'utilisation de composants adaptés pour les CMC à base de SiC. A l'heure actuelle, les filaments SiC du marché et les interphases disponibles ne sont pas optimisés pour cette application et ne présentent pas toutes les garanties nécessaires pour être utilisées. Il est donc nécessaire de modifier, développer et valider un nouveau couple filament/interphase pour les CMC SiC/SiC destinés à un fonctionnement sous irradiation neutronique.

- **Performance électromagnétique et électrique**

Il n'existe pas actuellement d'approche intégrée permettant de concevoir et d'optimiser une solution CMC ayant simultanément des propriétés électromagnétiques ciblées et une tenue à un environnement thermique, mécanique et chimique sévère. On peut citer les technologies radomes ou les matériaux furtifs structuraux à haute température.

5.2 Assurer la production à des coûts acceptables

La mise en œuvre de céramiques nécessite le plus souvent des procédés longs, énergétiques et coûteux, ce qui peut être rédhibitoire au développement de ces matériaux. Mais, au-delà des procédés de fabrication, c'est tout le cycle de vie du matériau, de la disponibilité des matières premières à son recyclage qui présente des verrous technologique majeurs :

- **Disponibilité des constituants et matières premières**

Bien que la grande majorité des éléments chimiques constituant les CMC soient abondants et facilement disponibles (C, Al, Si...) leur approvisionnement sous forme de semi-produits transformés (par ex., les renforts textiles) n'est pas toujours aisé. Certaines applications nécessitent aujourd'hui l'emploi de matières premières sous tension comme les terres rares dont il convient de sécuriser l'approvisionnement ou d'identifier des solutions permettant de s'en passer.

- **Réduction des coûts de production**

Malgré leurs performances exceptionnelles, la jeunesse de la filière et leur coût de production élevé restent à ce jour un frein majeur au développement des CMC. Le développement d'une filière d'approvisionnement de matière première et semi-produits et de procédés moins coûteux semble incontournable.

- **Capacité à fabriquer des pièces CMC de très grandes dimensions**

Certaines applications nécessitent de pouvoir fabriquer des pièces CMC de très grande taille. Une fabrication monobloc permet à la fois de simplifier la gamme de fabrication et de réduire la masse finale de la pièce. Disposer des moyens et procédés capables de fabriquer de grandes pièces monobloc avec une qualité matériau garantie en tout point de la pièce constituerait une valeur ajoutée indéniable par rapport à la concurrence.

- **Maîtrise des assemblages (CMC-métal – multi-matériaux)**

L'intégration de pièces CMC dans un système nécessite la maîtrise de procédés d'assemblages qui doivent prendre en compte des différences de caractéristiques très fortes entre les matériaux à assembler et un fonctionnement sur une plage de température pouvant être très large. Cela reste un domaine d'innovation encore trop peu exploré.

- **Contrôle en production et en service**

L'aspect multi-échelle de ces matériaux, leur caractère endommageable et le couplage entre endommagement et dégradation chimique rendent particulièrement complexe le contrôle en production puis en service. C'est un axe de développement impératif pour la diffusion des CMC, en particulier pour les utilisations longues durées.

- **Réparation et recyclage**

Compte tenu de la « jeunesse » de ces matériaux le développement des procédés de réparation et de recyclage est encore à l'état embryonnaire, l'effort ayant été mis avant tout sur le développement. Par ailleurs, développer ces procédés pour des composites à base de céramiques demeure un verrou technologique. Il est indispensable de développer la R&D dans ce domaine.

5.3 Justifier et certifier plus facilement des pièces CMC

Démontrer l'aptitude d'une pièce CMC à répondre à un besoin nécessite une connaissance fine du comportement de ces « nouveaux » matériaux dans des conditions environnementales et pour des sollicitations très variées ainsi que la disponibilité de méthodes de justification/certification à la fois admise par la communauté d'utilisateurs concernés et tenant compte du comportement particulier des CMC. Les verrous associés sont :

- **Des méthodologies expérimentales et numériques adaptées**

Caractériser et modéliser le comportement de matériaux aussi complexes sur une très large gamme de températures et de sollicitations nécessite encore des développements méthodologiques conséquents. La rareté des données génère de la méconnaissance, ce qui peut conduire à la mise en place de conservatismes dans les règles de justification. L'intérêt des CMC pour un utilisateur final en est fortement réduit : par exemple, dans le domaine aérospatial, le bilan de masse des pièces est moins favorable.

- **La durée de vie**

L'évolution des propriétés des CMC en fonction de la dégradation chimique est un passage obligé pour développer les applications longue durée (aéronautique, nucléaire…). Le couplage entre dégradation chimique et endommagement rend compliquée toute approche de vieillissement accéléré, ce qui rend d'autant plus nécessaires des actions de R&D fortes dans ce domaine.

- **La méthode de détection des défauts**

Pour pouvoir statuer sur la durée de vie ou la réutilisation des CMC, il faut être en capacité de détecter, positionner et dimensionner *in situ* les états d'endommagement et de dégradation des CMC et les défauts de fabrication.

- **Méthodes de justification / certification**

Les méthodologies de justification / certification existantes sont aujourd'hui issues du référentiel sur les matériaux métalliques ou CMO sur lesquels le retour d'expérience est plus important et les modes de défaillance ou de ruine sont différents. Cette approche peut s'avérer très pénalisante pour les CMC. Il convient de développer des méthodologies spécifiques.

5.4 Développer la culture des CMC

La très faible voire inexistante diffusion des CMC dans des marchés industriels de fort volume et plus encore de grand public rend très difficile le développement d'une « culture CMC » capable de faciliter l'émergence de nouveaux marchés, nouvelles applications ou nouvelles fonctionnalités pour ces matériaux.
Dans ce domaine, la principale piste de progrès consiste à développer l'enseignement des CMC dans le milieu universitaire. La part d'enseignement dédiée à la description et au comportement de ces matériaux est encore beaucoup trop faible dans les universités et écoles d'ingénieurs en France.
Le corollaire à la faiblesse de l'enseignement sur les CMC est que le manque de culture sur les CMC dans les bureaux d'études augmente l'aversion pour le « risque » associé à l'introduction d'une nouvelle technologie. Cet état d'esprit limite de fait l'innovation technologique et la compétitivité industrielle et rend plus difficile le développement de concepts innovants pour tirer parti de toutes les potentialités des CMC.

6 BILAN ET PLAN D'ACTIONS

Les rédacteurs de ce livre blanc, qui participent activement au développement de ces matériaux et de leurs applications, considèrent fondamental de maintenir et accroître la dynamique de cette communauté française des CMC.
Cet exercice de synthèse, dont le bilan est rappelé ci-dessous, nous conduit à faire quatre recommandations.

1	2	3	4
Consolider la chaîne d'approvisionnement des matières premières	**Pérenniser** la dynamique de la communauté CMC française dans ses dimensions industrielle et académique autour d'un écosystème de recherche scientifique et technologique	Lever les verrous en **renforçant la Recherche** et Technologie du domaine en particulier sur quatre thématiques clefs identifiées comme mutualisables (paragraphe spécialement détaillé au chapitre 6.2)	**Structurer et développer** une formation sur les CMC, à large diffusion.

6.1 Bilan

Les composites dont la matrice résiste aux hautes températures, multifonctionnels, constituent souvent l'unique solution à des problèmes difficiles et des environnements extrêmes. Ces CMC, dont le potentiel et l'intérêt stratégique et économique ont été résumés dans ce livre blanc, sont ainsi depuis plus de 50 ans une compétence pour laquelle la France tient une place mondiale reconnue, sur les plans scientifique et industriel. Dans ce domaine-clé des composites céramiques, la France a réalisé plusieurs « premières mondiales » et son tissu industriel et scientifique s'est adapté et diversifié, au fur et à mesure que les enjeux stratégiques et l'environnement mondial et européen évoluaient, que des nouveaux marchés apparaissaient. Aux applications historiques (aérospatiales et de défense, notamment pour la Dissuasion) se sont ajoutés les véhicules terrestres et les avions de ligne (le premier tonnage fabriqué de CMC est français, et concerne les « freins carbone »), le nucléaire civil, les fours et industries lourdes.

Les verrous qui limitent encore l'utilisation des CMC pour relever les enjeux de demain sont d'ordre scientifique, culturel, industriel, géopolitique, technique, financier et organisationnel. Ils ont été, comme les enjeux sociétaux et économiques associés (souveraineté, écologie, extension des utilisations,...), abordés dans ce livre blanc.

Un groupe d'experts français de la recherche « académique » (CNRS, universités, écoles...), « industriels » (Safran ceramics, Ariane Group, MBDA, Pyroméral, Saint-Gobain, ...) et organismes de recherche « intermédiaires » (CEA, ONERA, Andra, IRT Saint Exupéry...) a mené une réflexion approfondie et concertée sur le domaine technologique des CMC. Ceci a fait émerger une conscience commune : il est indispensable, au-delà des programmes et des développements existants, et des collaborations souvent bilatérales, de « faire davantage » en R&T pour assurer la pérennité et le développement, maitrisé mais ouvert, d'une souveraineté française des CMC. Il faut penser à demain et après-demain.

Les réalisations passées et récentes montrent donc que, pour les CMC, la base scientifique et technologique française, diverse et dynamique, doit être accompagnée par un effort de R&T concerté et partagé, structuré par ses acteurs, associant financements publics et privés, pour disposer d'une filière solide afin de relever les enjeux qui attendent la France sur cette technologie stratégique, quel que soit le contexte européen et international. Redisons-le : la recherche de base et les projets applicatifs, notre capacité à saisir les occasions des projets de recherche français ou européens, les échanges comme ceux du GDR (CMC)^2, … tout cela ne suffira pas, pour que la France aborde les années qui viennent au bon niveau alors que de plus en plus d'applications, souvent stratégiques, nécessitent la maitrise des CMC, et que de nombreux pays y consacrent des efforts bien plus importants que ceux que la France et l'Europe ne se permettent.

6.2 Quatre recommandations

Recommandation 1 : Consolider la chaîne d'approvisionnement des matières premières

Il est primordial d'assurer une pérennisation de l'approvisionnement des matières premières et semi-produits, afin de consolider notre indépendance pour le développement et la production des composants en CMC. En effet, nous devons nous prémunir de toute restriction potentielle liée à des évolutions de contexte géopolitique pouvant aboutir à des modifications de règles ***d'export control***, mais également être en mesure de proposer une mise en concurrence. Pour la consolidation de cette supply chain, les réflexions et actions doivent être menées à l'échelle nationale ou, le cas échéant, à l'échelle Européenne.

Recommandation 2 : Pérenniser la dynamique de la communauté CMC française

La création du GDR CMC^2 et la rédaction de ce livre blanc ont permis de cimenter la communauté française des CMC. Il est fortement recommandé de mettre en place une structure pérenne pour maintenir cette dynamique. Nous nous proposons de maintenir cette dynamique avec le support des acteurs principaux de la filière.

Recommandation 3 : Lever les verrous en renforçant la Recherche et Technologie du domaine en particulier sur quatre thématiques clefs identifiées comme mutualisables

Nous avons identifié 4 thématiques que nous avons choisies collectivement de prioriser pour cette filière scientifique et technique des CMC, à la fois si spécifique et si stratégique. Cet investissement pourra être d'ampleur relativement raisonnable et abordable mais il nous semble nécessaire de le coordonner en France, pour être davantage fructueux et efficient d'ici une dizaine d'années.

Ces 4 thématiques pourront être alimentées par la fabrication et la mise à disposition de « matériaux école » (par exemple un pour la classe oxyde/oxyde et un autre de type C/C/SiC) permettant de développer un savoir-faire commun en s'affranchissant des contraintes de propriété et de confidentialité industrielles. (Cf. Annexe 1)

Recommandation 4 : Structurer et développer une formation sur les CMC, à large diffusion

Ce livre blanc, rédigé par l'ensemble des experts des acteurs industriels et académiques français représentatifs des composites céramiques, propose des recommandations ciblées et priorisées pour consolider et développer la capacité de la France à relever les défis souverains que sous-tend cette filière.

L'effort de formation permettra de lever le verrou culturel, frein important au développement de cette classe de composites dans des domaines plus variés. Il s'agit de développer la formation initiale et continue notamment en créant des masters et/ou des filières **de spécialisation** d'écoles d'ingénieurs **consacrés aux CMC.**

Pour en savoir plus :
https://gdr-cmc2.cnrs.fr/

Annexe 1

Thématique 1 : l'analyse du cycle de vie des CMC

Cette activité de R&T veut tirer parti des approches avancées de gestion du cycle de vie pour développer en France une filière CMC en phase avec les défis économiques et environnementaux actuels, des techniques de réparation, de recyclage, en anticipant voire proposant les restrictions réglementaires, en diminuant les coûts. Elle pourrait comporter 4 axes :

- Axe 1 : Procédés - diminution de l'empreinte carbone, traitements des effluents, …
- Axe 2 : Recyclage (recherche de filières), récupération des éventuelles terres rares, des chutes de filaments (SiC, Oxyde etc…), la solvolyse, le broyage/tamisage, etc, y compris par le recyclage des semi-produits
- Axe 3 : Méthodologie (dont l'anticipation des évolutions règlementaires et le partage et la mise en exergue de bonnes pratiques)
- Axe 4 : Réparabilité, maintenance, réutilisabilité (prolongation de la durée de vie)

Thématique 2 : la modélisation multiple des CMC

Il s'agit de développer les modélisations thermique, mécanique, thermo physique, couplée à ce qui est déjà entrepris de manière dispersée. Cette activité pourra se faire autour de 4 axes :

- Axe 1 : Modélisation aux petites échelles des CMC (dynamique moléculaire, éléments discrets, champs de phase, modélisation des incertitudes et méthodes probabilistes)
- Axe 2 : Nouveaux outils d'aide à la modélisation des CMC (intelligence artificielle, adaptation des algorithmes aux ordinateurs quantiques, …)
- Axe 3 : Essais sur pièces génériques (matériaux modèles appelés aussi « école »)
- Axe 4 : Ingénierie « non confidentielle » (exemple : cas d'usage d'un assemblage générique).

Thématique 3 : la caractérisation moderne des CMC, essais et normes

Il s'agit de donner à la France les méthodes et les moyens de caractérisation en phase avec les défis du XXIe siècle pour les CMC. Cette activité pourra s'articuler en 6 axes :

- Axe 1 : Identification des moyens d'importance : création de bancs représentatifs multi axiaux-multi physiques multi instrumentés
- Axe 2 : Méthodologie de dialogue essais-calcul à l'échelle de l'éprouvette
- Axe 3 : Essais « Haut de Pyramide » partagés entre industriels, académiques et organismes « intermédiaires » de R&T
- Axe 4 : Normes : mise en place d'un cofinancement pour maintenir l'activité avec l'AFNOR, stratégie française de présence et de priorisation des thèmes
- Axe 5 : Détermination de propriétés des CMC non encore accessibles par les essais connus
- Axe 6 : Métrologie – détermination de marges d'erreur

Thématique 4 : le contrôle maitrisé des CMC en production et en service

Il s'agit d'améliorer notablement la capacité de contrôle non destructif, en combinant et développant les méthodes actuellement connues ou utilisées, en identifiant et évaluant des technologies de rupture, en tirant parti des avancées d'autres secteurs (médical, astronomie).

Cette activité pourrait se développer suivant 5 axes :

- Axe 1 : Contrôle non destructif de grandes pièces avec une résolution performante au plan industriel
- Axe 2 : Thermographie, tomographie sur petites pièces, échelle d'analyses
- Axe 3 : Définition de ce qu'est un défaut vis-à-vis de la variabilité « naturelle » d'un CMC, établissement d'une « défauthèque ». Un état de l'art est à faire dès que possible pour préciser cela
- Axe 4 : Inspection en service, en essais, contrôle des procédés, état de l'art sur capteurs d'autres domaines et d'autres acteurs française et européens, utilisation de stimuli électriques, autodiagnostic,
- Axe 5 : Appui au contrôle par la modélisation (incluant calcul haute performance)

LES AUTEURS

BENMEDAKHENE Salim

est Directeur de la Recherche, du Développement et de l'Industrialisation au sein de la société Pyromeral ; il est entre autres en charge du développement de l'activité Défense et Aéronautique depuis 2018. Après une thèse de doctorat suivie d'une habilitation à diriger des recherches à l'UTC de Compiègne dans le domaine des matériaux composites, Salim Benmedakhene a été PDG de la société AETech de 2001 à 2014, avant de rejoindre le groupe TECHNIP pour prendre la Direction de l'entité Contrôle & Mesures en charge du développement de solutions d'inspections des installations pétrolières sous-marines et la qualification des solutions à base de matériaux composites pour les grandes profondeurs jusqu'à 3000 m.

BOUCHEZ Marc

Ingénieur électromécanicien puis aérospatial, Marc Bouchez a été embauché en 1989 par le groupe Aerospatiale et a utilisé des CMC dès le début des années 1990 pour la propulsion aérobie haute vitesse, au sein de l'équipe Statoréacteurs du missilier MBDA, en occupant diverses fonctions de recherche développement, pilotage de projets nationaux ou internationaux ou d'équipe, responsable d'un moteur de missile, et actuellement coordinateur de la Recherche et de la Technologie du Département Statoréacteurs. Il est Senior Expert en propulsion du groupe européen MBDA qui l'a désigné comme son point focal pour le GDR (CMC)^2. En juin 2022, l'Association Astronautique et Aéronautique de France lui a décerné son Prix de l'excellence scientifique.

BOUILLON Eric

Ingénieur et Docteur de l'université de Bordeaux, a commencé sa carrière dans le domaine de la propulsion à poudre pour les lanceurs spatiaux, et a ensuite occupé plusieurs fonctions dans le cadre du développement des technologies CMC, depuis plus de vingt ans. Actuellement chez Safran Ceramics, il est Directeur Scientifique et Expert Emérite Safran, en charge des Programmes Etudes Amont et de l'Audit technique. Il est également Directeur du Conseil Scientifique du GdR (CMC)2, membre du congrés HT-CMC et membre de The Americain Society of Mechanical Engineers.

LES AUTEURS

CATALDI Michel

a participé tout au long de sa carrière professionnelle au développement des CMC chez ArianeGroup où il s'est particulièrement intéressé à la caractérisation et au comportement de ces composites. Senior expert dans ce domaine, il est également président des commissions de normalisation AFNOR B43C et CEN TC184 SC1 pour les CMC et vice-président des associations savantes AMAC et SFEC.

COSCULLUELA Antonio

est Senior Scientific Officer au CEA depuis 2019. Il a un Doctorat de Mécanique Physique obtenu en 1992. Il a mené des recherches dans le domaine du comportement mécanique des céramiques à grandes vitesses de sollicitation puis sur le comportement themomécanique des matériaux céramiques et carbonés à hautes températures. Il a été détaché quatre ans dans une unité mixte de recherche dans le domaine des CMC (LCTS) puis a dirigé un laboratoire de dimensionnement et de simulations numériques des matériaux et structures. Il est membre des Conseils d'Administration des sociétés savantes DYMAT et AFM. Il a été membre du Conseil Scientifique de diverses conférences Internationales.

FERRES Laurent

est ingénieur en mécanique des matériaux et des structures, responsable du site aquitain de l'IRT Saint Exupéry et des compétences composite céramique dans cet institut de recherche depuis 2016. Ces compétences dans les composites et les technologies de procédés industriels composites, poudres et céramiques ont été acquises chez Michelin d'abord dans les années 2000 puis chez Pechiney et enfin Rio Tinto entre 2003 et 2015, en recherche et développement ainsi qu'en transferts technologiques et production.

LES AUTEURS

GOMEZ Philippe

est responsable du « Département Matériaux et Technologies Plates-formes et Propulsion » à DGA Techniques aéronautiques, centre d'essais de la DGA où il est Expert Matériaux pour la Propulsion. Il travaille sur les CMC depuis le début des années 90 et a participé aux caractérisations mécaniques et physico-chimiques et à la modélisation numérique des générations de composites thermo-structuraux qui se sont succédées depuis le programme Hermès. Son rôle en tant qu'expert, est de conseiller les architectes des programmes d'armement, pilotés par la DGA, vis à vis de l'utilisation des matériaux pour la propulsion ou pour applications haute température.

HOURQUEBIE Patrick

est directeur de recherche au CEA. Il a obtenu son Habilitation à Diriger des Recherches en 2000 pour ses travaux dans le domaine des polymères, et plus particulièrement le lien entre leurs propriétés structurales et leurs propriétés d'usage pour différentes applications (mécanique, diélectrique, électrique, optiques, micro-ondes). Il a durant sa carrière au CEA/DAM occupé différents postes dans le domaine des matériaux (animation d'équipes et projets) qui lui ont permis d'étendre son expertise au domaine des céramiques puis des composites céramiques. Il est aujourd'hui délégué scientifique pour le CEA au Laboratoire des Composites Thermo Structuraux (LCTS).

MAIRE Jean-François

est expert composites au sein du département Matériaux et Structures de l'ONERA. Docteur de l'Université de Franche-Comté, il développe depuis plus de 30 ans, des modèles de comportement et d'endommagement dédiés aux composites céramiques et à Matrice Organique. Il a dirigé pendant plusieurs années tout d'abord le Département Matériaux et Structures Composites (2011-2016) puis le Département Matériaux et Structures (2016-2018) de l'ONERA.

LES AUTEURS

REYNAUD Pascal

est Chargé de Recherches CNRS - HDR au laboratoire MATEIS de l'INSA Lyon. Ses activités de recherche portent principalement sur le comportement thermomécanique et l'endommagement des matériaux composites céramiques. Il participe aux activités de la commission AFNOR B43C "Céramiques Techniques" sur la normalisation des méthodes d'essais pour les céramiques et les composites céramiques. Depuis janvier 2019, il est directeur adjoint du GDR CNRS 2065 $(CMC)^2$ "Composites Céramiques : Conception, Modélisation, Caractérisation".

SAUDER Cédric

est chercheur et expert senior au CEA. Il a mené des recherches dans le domaine du comportement mécanique des CMC et plus particulièrement des filaments de Carbone et de SiC pour lesquelles il a mis au point un équipement de caractérisation jusqu'à très haute température. Il est impliqué depuis 15 ans dans le développement et la mise au point de procédés d'élaboration des CMC à renfort Carbone et SiC pour des applications nucléaires et/ou industrielles.

VILLERMAUX Franceline

est responsable du Groupe Technologie Céramiques et Réfractaires au Saint-Gobain Research Center avec une expertise de plus de 25 ans sur les formulations, les procédés de mise en forme, les techniques de consolidation et les procédés de caractérisation des céramiques industrielles. Elle développe la gamme des composites céramiques oxyde depuis 5 ans sur la base des filaments Quartzel en silice vitreuse de Saint-Gobain pour des applications industrielles et aéronautiques et travaille sur son extension vers les renforts alumineux.

VIGNOLES Gérard L.

est professeur à l'Université de Bordeaux depuis 1994, il est à la tête du Laboratoire des Composites Thermo Structuraux (LCTS) depuis 2016 et du Groupement De Recherche CNRS (GDR $(CMC)^2$) depuis 2019. Ces principales compétences sont la modélisation physico-chimiques des composites thermo structuraux, des procédés de fabrication ainsi que des comportements mécaniques, thermiques et d'ablation.