

FEUILLES DE ROUTE TECHNIQUES DU CNES

LES MATÉRIAUX ET LES STRUCTURES POUR LES ÉTAGES INNOVANTS

LANCEURS



Le contexte

Le thème des étages innovants rassemble les voies technologiques, conceptuelles et méthodologiques permettant des gains de masse, de coût et de robustesse sur les étages des lanceurs futurs. Ces étages sont constitués d'un ensemble de réservoirs alimentant un ou plusieurs moteurs, en interface avec d'autres étages via des jupes ou des mécanismes de séparation, avec des structures fonctionnelles comme des bâtis-moteurs, des systèmes d'atterrissage ou de récupération, mais aussi avec des systèmes de protections thermiques et des équipements fluides et électriques.

Sont adressés ici les activités en lien avec les structures et les matériaux.

Cette feuille de route permet donc de disposer d'une photographie synthétique, à un instant donné, des actions engagées et des orientations stratégiques retenues par le CNES sur les structures et les matériaux des étages innovants.

Elle est composée :

- ✓ d'un **visuel général** incluant les démonstrateurs, les principales technologies ainsi que les outils de simulation soutenus par le CNES, dans un contexte calendaire répondant à des cibles ;
- ✓ d'une **analyse** des principaux enjeux associés ;
- ✓ d'une **présentation des axes techniques retenus** pour lesquels des études sont engagées avec le support de la R&T incluant des thèses et des post-doctorats, des avant-projets et des challenges¹.

¹ Des challenges R&T ont été engagés dès 2020. Ils permettent d'impliquer de nouveaux acteurs (TPE et start-up) à la recherche de solutions technologiques en rupture par rapport aux approches habituelles.



Démonstrateur de véhicule réutilisable CALLISTO permettant de monter en maturité sur la récupération.



Corps central d'une Ariane Next en version métallique (à gauche), composite pour l'étage supérieur (centre), composite pour premier et seconde étage (à droite).

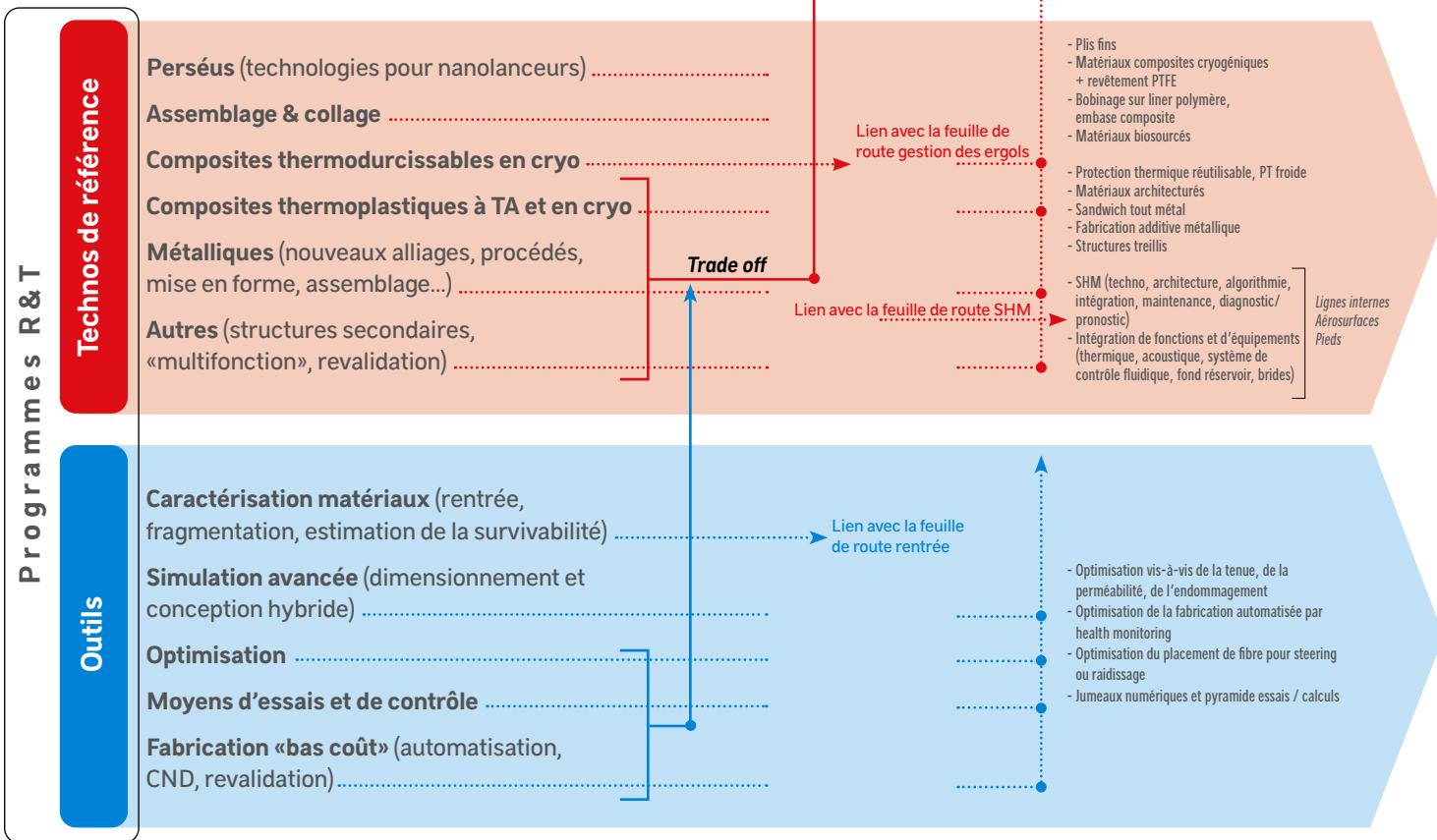
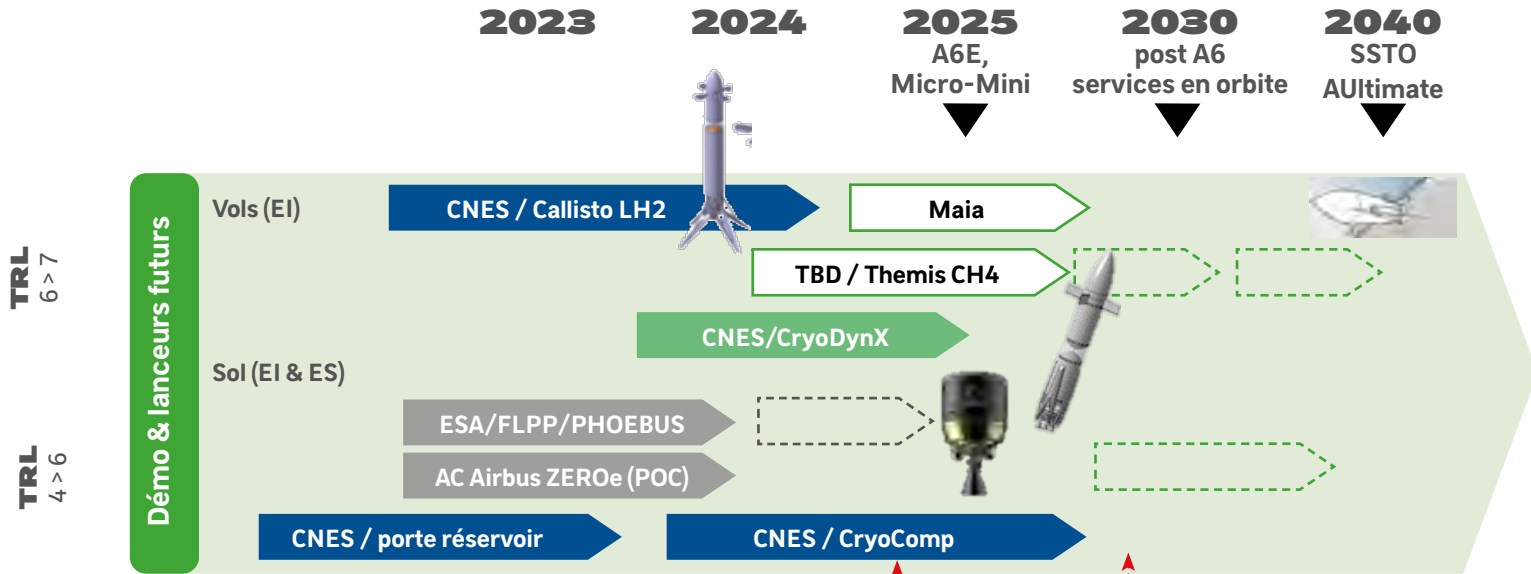
Les lanceurs cibles du transport spatial sont multiples et à plusieurs termes :

- ✓ **2025+** : évolutions possibles sur A6
- ✓ **2030+** : Ariane Next ou post-A6 (le démonstrateur Thémis avec le moteur Prometheus (CH₄/LOX) est une étape intermédiaire) ; véhicules de transport en orbite.
- ✓ **2040+** : lanceurs futurs à ergols de nouvelle génération et lanceurs lourds.

Les évolutions des systèmes de transport spatial adressent la montée en maturité des technologies, des concepts et des méthodes présentées dans cette feuille de route.

Les axes techniques s'appuient sur des concepts possibles d'étages innovants pour Ariane Next (voir figure ci-dessus à droite). Ils doivent couvrir les besoins relatifs aux premier et deuxième étages.

En un coup d'œil



Coopérations :
 Composite cryo (H2020, FLPP, Horizon Europe) & composite structural (FLPP), outils pour les phases de rentrée
 Technologies & outils des systèmes orbitaux sur cibles communes
 Support accompagnement Start-Up

Les enjeux

Les enjeux sont au nombre de 10 :

1. Coût Récurrent

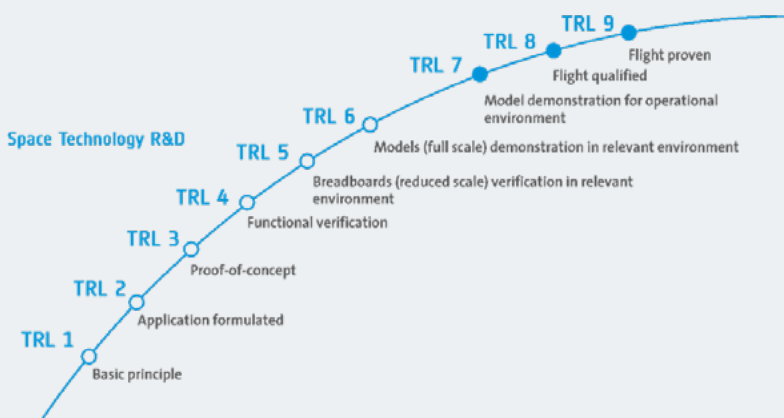
On vise globalement une réduction d'un facteur 2 des coûts de lancement commerciaux (k€/kg en GTO) sur Ariane Next comparés à Ariane 6, décliné dans un premier temps par un objectif de réduction d'un facteur 2 des coûts récurrents des étages. Une réduction de la masse étage permet une baisse des coûts étages (directe en approvisionnement et en fabrication, indirecte par un effet global sur le lanceur).

2. Calendrier

Pour Ariane Next, on vise un TRL 6 et + à horizon 2027 pour un premier étage innovant. Les démonstrations « système RLV en vol » Callisto (2025) et Thémis avec Prometheus (vers 2025) permettront une montée en TRL progressive.

3. Conception optimisée et mise en œuvre simplifiée

Les indices constructifs² des étages européens actuels sont trop peu optimisés. Les étages futurs devront être globalement optimisés au niveau « système propulsif », et plus largement « système lanceur », afin de justifier le choix des matériaux et des assemblages. On combinera les filières métalliques et composites pour les structures primaires et secondaires et on maximisera les synergies entre étages et la fonctionnalisation des structures pour gagner en masse et faciliter la mise en œuvre, tout en trouvant le meilleur compromis vis-à-vis des coûts.



L'échelle TRL (en anglais Technology Readiness Level, qui peut se traduire par niveau de maturité technologique) est un système de mesure employé pour évaluer le niveau de maturité d'une technologie.

² Ou indice structural, ratio de la masse de structures sur la masse d'ergols.



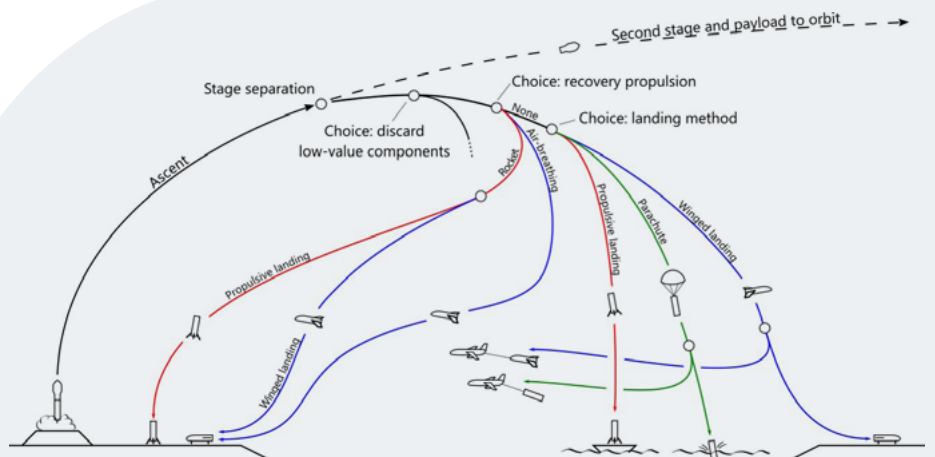
Illustration du lanceur Ariane Next.
© CNES/BLACKBEAR, 2017

4. Nouveau procédé de fabrication et caractérisation matériaux

Les procédés de fabrication additive pour les métalliques et utilisant les matrices thermoplastiques pour les composites permettent de potentiellement diminuer les coûts et impactent les concepts et les méthodes de conception, de dimensionnement et de qualification des structures. La compréhension du comportement des composites en environnement cryogénique et en présence de liquide oxydant et celle en présence de défauts (caractérisation et acceptabilité de l'endommagement) sont des axes à maîtriser pour optimiser le design et le dimensionnement mais aussi pour maîtriser les procédés de mise en œuvre.

5. Réutilisation des étages

La réutilisation d'un premier étage peut se révéler commercialement intéressante, si l'ajout de fonctions de récupération et l'effort de revalidation restent dans une cible de coût acceptable. La réutilisation de l'étage supérieur est aussi à étudier, avec la spécificité des conditions environnementales sévères lors de la rentrée de l'étage. Les conditions de retour de l'étage et le nombre de réutilisation sont des paramètres clés.



La réutilisation suppose la récupération d'un ou plusieurs étages selon différentes stratégies.

6. Ecoconception et choix de technologies durables

Les systèmes spatiaux ne peuvent ignorer les problématiques de ressources énergétiques, d'émission de gaz à effet de serre et de limitation des ressources. Il est indispensable que la conception des futurs lanceurs réponde à des démarches d'écoconception et que les choix technologiques soient justifiés comme étant une solution compatible des enjeux énergétiques et environnementaux. C'est aussi une condition pour répondre aux objectifs de coûts.



7. Innovation dans les méthodes et outils

Les enjeux listés plus haut nécessitent une adaptation des méthodes de management et des outils de travail. Pour l'axe management de projet, des circuits de décision plus courts, des analyses de risques accélérées et l'acceptabilité de la prise de risque en démonstration sont des facteurs clés. Pour l'axe technique et scientifique, il s'agit de soutenir, par la R&T et l'ensemble des démonstrateurs, des outils de travail plus rapides à mettre en œuvre (procédés de fabrication, bancs d'essais, simulations numériques...) et permettant des itérations à bas coûts (prototypage rapide, calculs paramétriques rapides, HPC...).

8. Sauvegarde

La maîtrise des risques au lancement est une exigence à l'origine des activités de sauvegarde, de responsabilité CNES.

Le CNES doit disposer d'outils et de méthodes indépendantes de l'industrie, validés et permettant néanmoins de maintenir la base de lancement compétitive. La fragmentation des matériaux et des structures fait partie des sujets importants à étudier afin de réduire les marges dans les modèles et à terme, de concevoir des étages intégrant le « *design to demise*³ » pour la rentrée ou la fragmentation en champ proche.

9. Recherche de synergies

Les synergies avec le domaine aéronautique sont naturelles pour la réduction des coûts et la fiabilité des systèmes étant donné le caractère commercial de l'industrie aéronautique, avec néanmoins, des environnements et des conditions d'utilisation spécifiques. Malgré tout, les sujets communs (par exemple le stockage de l'hydrogène, le SHM) sont un terreau de coopération et de démonstration communes. Les initiatives privées sur les microlancements sont des opportunités pour la recherche d'optimisation sur des structures de taille réduite avec des retombées possibles sur les étages des lanceurs cibles (procédés optimisés et low cost). Le programme étudiant Perséus vise des nano-lanceurs et est un creuset d'innovation à petite échelle.

10. Coopération européenne & coordination

Les coopérations doivent être recherchées pour des raisons budgétaires évidentes, par exemple pour le développement d'un étage intégrant du composite pour le stockage cryogénique. Une bonne coordination est également recommandée entre les différents acteurs autour de la fabrication additive.

³ Le terme « *design to demise* » désigne l'ensemble des activités de conception visant à intégrer la capacité de la structure à se dégrader selon des schémas pré-définis à travers l'utilisation de technologies ou de matériaux orientant la rupture lors de phases de rentrée ou de neutralisation volontaire.

Les axes technologiques

Les axes technologiques sont définis dans un contexte d'optimisation du triplé concept / matériau / procédé pour une structure ou un ensemble de structures d'un étage. Ainsi, la feuille de route s'organise selon deux grands jalons :

】 2025 pour monter en maturité à TRL 5 de nouvelles technologies sur un choix de concept ambitieux (s'appuyant sur le démonstrateur Thémis 3), identifier lors de grands trade-off les solutions technologiques à développer et à intégrer, proposer des « proof of concept » sur des éléments structuraux d'intérêt et mettre en place une plateforme de démonstration sol pour des éléments en lien avec les environnement cryogéniques.

】 2027 pour atteindre un TRL de 6 via une démonstration en environnement représentatif pour un étage cryogénique et synthétiser les propositions de solutions matures pour des étages à indices constructifs améliorés et à coût réduit, et réutilisables.

Les axes technologiques associés sont les suivants :

Matériaux composites – structures primaires secondaires et réservoirs cryogéniques :

Les procédés de réalisation en therm durcissable ou en thermoplastique sont étudiés, ainsi que les procédés d'assemblage hybride (soudage / collage).

Le thème de la perméabilité et de la compatibilité oxygène des structures composites est traité (apport de solutions technologiques « plis fins » en composite therm durcissable, apport des nanotubes de carbone, capacité de caractérisation) dans le cadre des travaux sur les étages cryogéniques composites.



Porte équipée composite de fond de réservoir (CETIM).

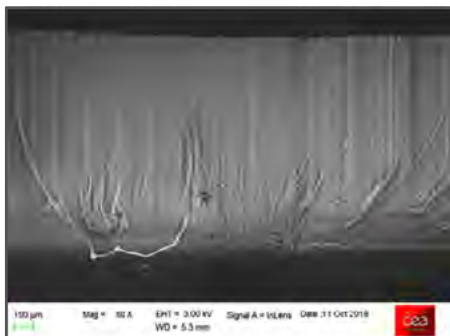
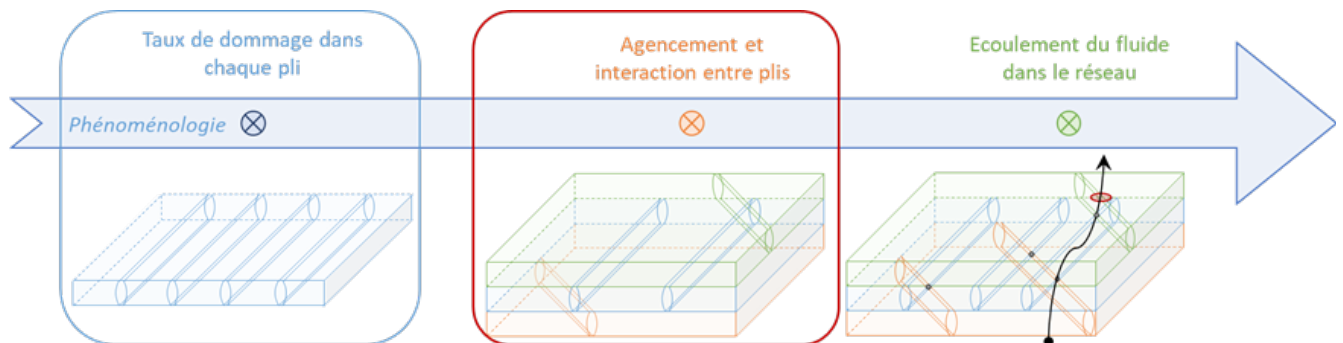
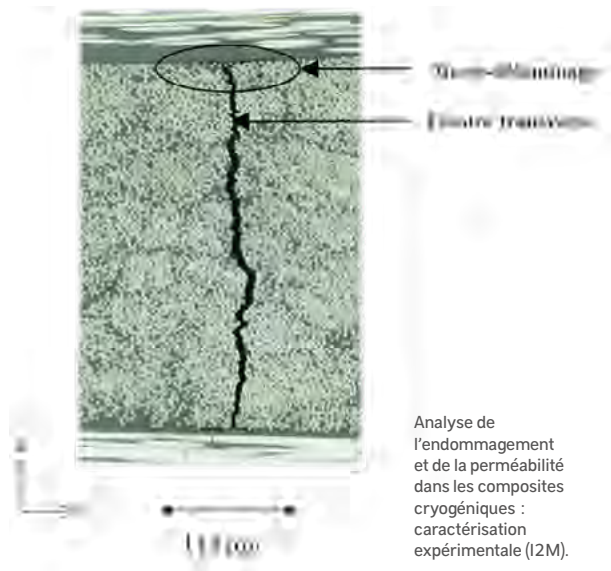


Coiffe Ariane 6 (RUAG Space).

Sont aussi étudiées les nouvelles fonctionnalités associées aux structures en composites (exemple du SHM « Structural Health Monitoring » avec l'intégration possible de capteurs multi-physiques).

Les matériaux biosourcés sont en cours d'évaluation, d'abord pour les structures secondaires (plateaux, capotages).

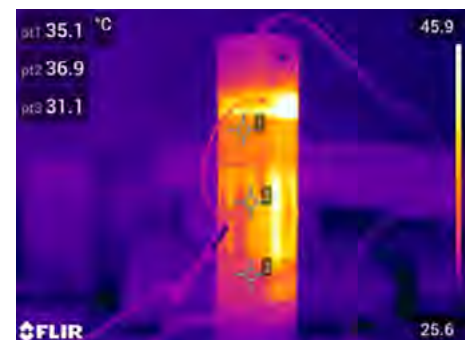
La compréhension et la prise en compte de l'endommagement (issu de la propagation de défauts de fabrication ou d'évènements rencontrés en utilisation) est essentielle pour tirer profit des capacités des composites.



Tapis de nanotubes de carbone (NTC) - (CEA)



Pré-cyclage thermique d'éprouvettes composites de traction comportant des NTC. (CEA).



Essai sur un prototype de l'efficacité du graphène comme solution de réchauffeur de lignes d'ergols (Blackleaf).

Matériaux métalliques – toutes structures :

Cet axe technologique est concentré sur les alliages d'aluminium autorisant une optimisation globale des structures : introduction d'anisotropie pour un dimensionnement optimisé, fonctionnalisation des tôles (ALM & FSW), intégration de supports d'équipements ou de brides à moindre coûts. Mais de nouveaux alliages sont aussi étudiés (HEA, alliages de magnésium) tout comme les matériaux architecturés.

L'apport de la fabrication additive est également une ligne forte de la R&T (FA grande structures par la technologie du MELD, du WAAM ou du cold gaz spray, réparation par FA).



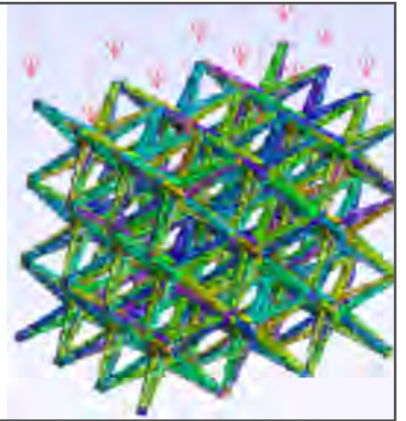
Structure inter-réservoir de l'étage inférieur d'Ariane 6 (MTA).



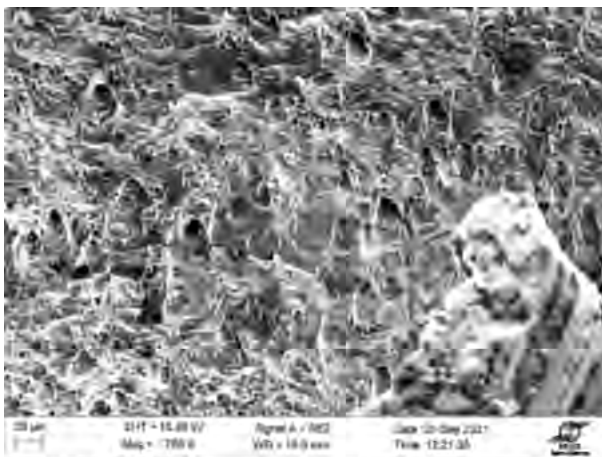
Démonstrateur d'un adaptateur de charge utile en sandwich tout aluminium (Halcyon).



Absorbeur d'énergie en matériau architecturé pour pied d'atterrissage (Sokaris).



Modélisation EF pour recalibrer une approche analytique d'estimation de la raideur effective (PIMM).



Analyse fractographique d'une éprouvette de HEA nuance Y3 après un essai de résilience (Charpy) à température cryogénique (Mines de Saint-Etienne).

Protections thermiques – toutes structures :

L'utilisation du couple d'ergols LOx/CH4 offre la possibilité de réduire voire de se passer de protection thermique sur les réservoirs. C'est à l'étude au niveau système étage vis-à-vis de la gestion des ergols au sol, avant lancement.

Les matériaux et procédés associés aux protections thermiques froides (pour la gestion des ergols) et aux protections thermiques chaudes (protection lanceur en phase ascendante mais aussi en phase de retour en cas de réutilisation) restent des lignes importantes de la R&T.



Isolation flexible (ALAT).

Procédés et industrialisation :

Des procédés tels que le FSW permettent d'intégrer des variations d'épaisseurs, des raidisseurs et des supports d'équipements dans la structure (gain de masse), et simplifient ainsi l'industrialisation des structures (gain de coût). Les travaux utilisant les techniques de machine learning sont en cours au profit de l'optimisation des paramètres process d'une ligne de production de structures composites.



Panneau raidi par soudage FSW par transparence (Stirweld).

Assemblages :

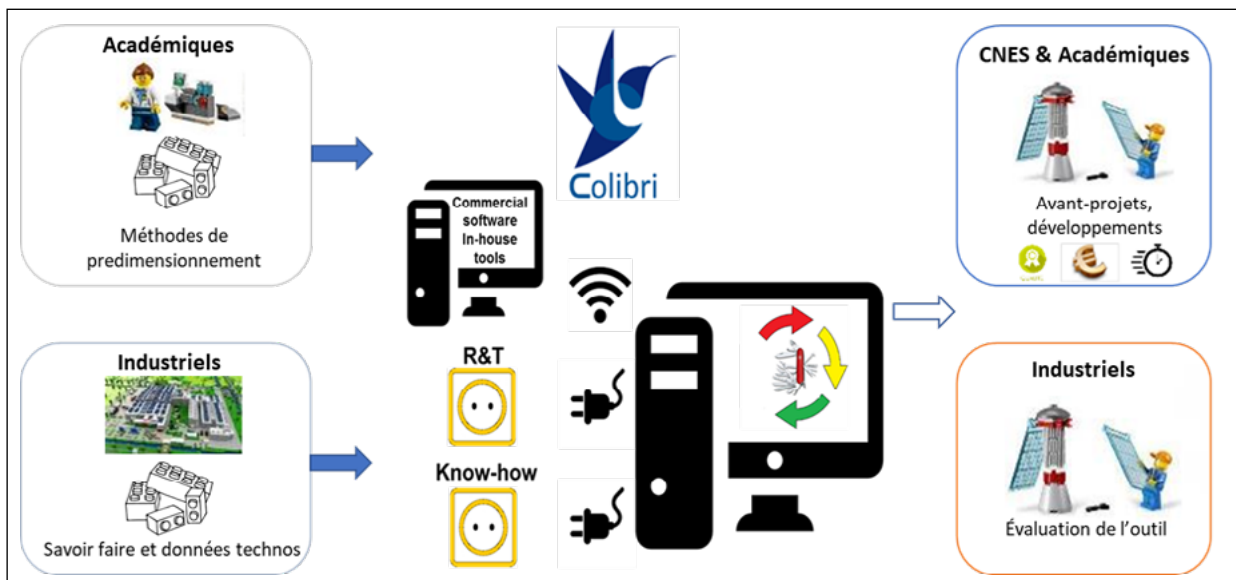
Les technologies d'assemblage sont un axe essentiel de gain de masse et de coût : assemblage des structures (soudage, collage, liaisons boulonnées), des systèmes de protection thermique et de séparation des étages, qui doivent trouver des solutions conceptuelles et technologiques prenant en compte la revalidation en cas de réutilisation.



Assemblage du satellite sur son adaptateur (Arianespace).

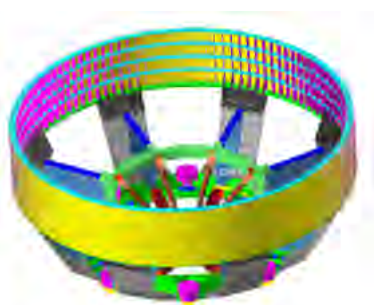
Méthodologies de dimensionnement, dialogue essais-calculs – toutes structures :

Les avancées dans les méthodes de dimensionnement concernent l'analyse du flambage sur des coques minces pressurisées ou non, améliorant les méthodes rapides basées sur les standards de la NASA tout en consolidant les estimations pouvant être sous ou sur-conservatives, mais aussi les méthodes d'optimisation structurale pour comparer des concepts sur des bases solides de pré-dimensionnement (robustesse du bilan masse). Ces méthodes visent également à mieux faire dialoguer essais et calcul, pendant le développement et l'exploitation. La définition d'une fragmentation réaliste est également un enjeu pour la sauvegarde, elle passe par la compréhension des phénomènes à son origine, à travers des calculs en dynamique rapide soutenu par des essais phénoménologiques.

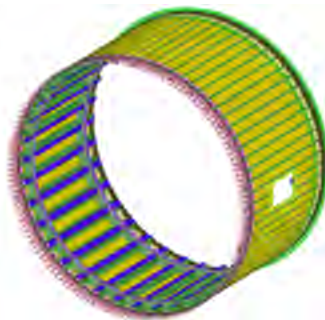


Plateforme COLIBRI : choix des technologies, prédimensionnement et dimensionnement des structures (CNES).

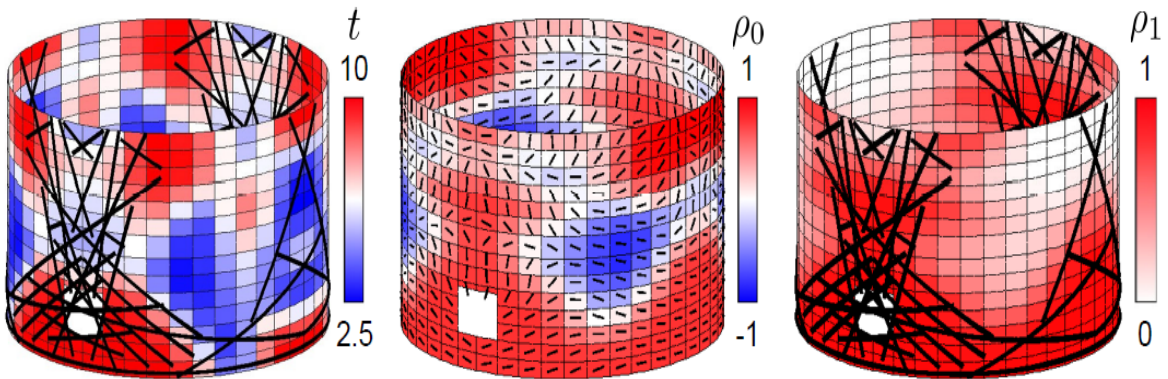
Cet axe s'adosse à des outils numériques de boucle rapide et à des bancs expérimentaux.



Concept de baie multi-moteur d'un premier étage issue d'une optimisation structurale (CNES).



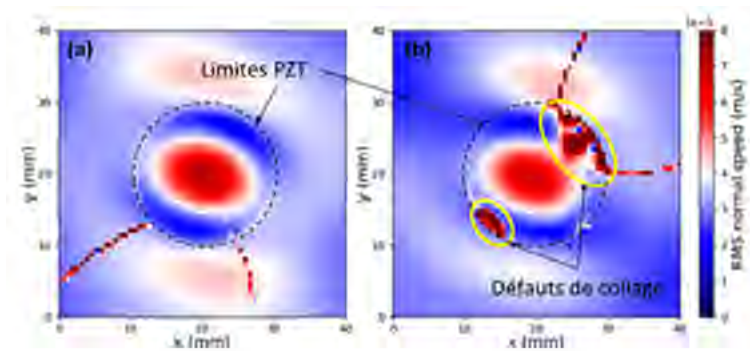
Méthode d'optimisation de structures raidies (CNES/ONERA).



Stratégie d'optimisation de structures raidies composites (ONERA/CNES).

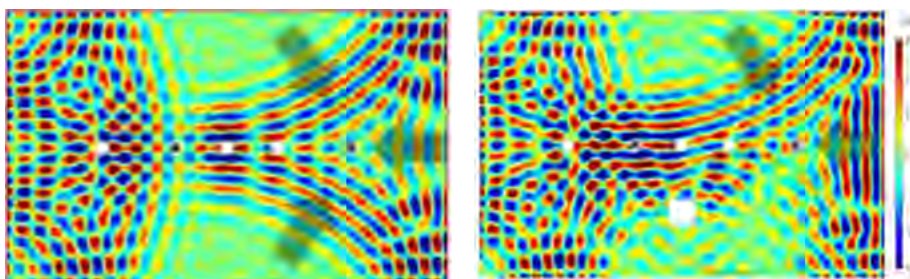
Contrôles et SHM (Structural Health Monitoring) – toutes structures :

Le contrôle de la santé matière en production, post-fabrication et entre deux vols en cas de réutilisation peut tirer profit des évolutions de technologies de capteurs et des techniques d'intelligence artificielle pour le traitement des données. La définition d'un SHM adapté au juste besoin permettra d'optimiser la maintenance et les efforts de revalidation des étages réutilisables, en réduisant les coûts récurrents correspondants.



Analyse par vibrométrie laser des défauts de collage de capteurs piézoélectriques (PZT) sur une plaque composite (ONERA).

Localisation possible des capteurs SHM sur l'étage Thémis 3.



Simulation couplée électronique - acoustique - piézoélectrique pour analyser la propagation acoustique du signal de capteurs PZT perturbée par un défaut (Pytheas) – à gauche sans défaut ; à droite avec défaut.



MOTS CLÉS

Structures, matériaux, métallique, composite, thermoplastique, perméabilité, cryogénique, alliage d'aluminium, isolation, fabrication additive, assemblage, modélisation, optimisation, essais, caractérisations, contrôles, SHM, revalidation.

GLOSSAIRE

ALAT :	Air Liquide Advanced Technology
ALM :	Additive Layer Manufacturing
AVP :	Avant-Projet
BAM :	Baie Arrière Multi-moteurs
CDN :	Contrôle Non Destructif
CEA :	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
CETIM :	CEntre Technique des Industries Mécaniques
CORAC :	Comité d'Orientation de la Recherche Aéronautique Civile
DED :	Direct Energy Deposition
EF :	Eléments Finis
EI :	Etage inférieur
ES :	Etage supérieur
FA :	Fabrication Additive
FSW :	Friction Steer Welding
GTO :	Orbite de Transfert Géostationnaire
HEA :	High Enthalpy Alloy
HPC :	High Performance Computing
HUMS :	Health and Usage Monitoring System
I2M :	Institut de Mécanique et d'Ingénierie (Université de Bordeaux)
NASA :	National Aeronautics and Space Administration
NTC :	Nano Tube Carbone
ONERA :	Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales
PIC :	Programme d'Intérêt Commun ONERA-CNES
PIMM :	Laboratoire de Procédés et Ingénierie en Mécanique et Matériaux
PZT :	Piézoélectrique Transducer
R&T :	Recherche et Technologie
RLV :	Reusable Launch Vehicle
SHM :	Structural Health Monitoring
T/O :	Trade off
TRL :	Technological Readiness Level
ViTF :	Vinci Thrust Frame (bâti-moteur Vinci)
WAAM :	Wire Arc Additive Manufacturing

CNES

www.cnes.fr

ConnectByCNES

<https://www.connectbycnes.fr/>

Comet

<https://www.comet-cnes.fr>

Comet Matériaux

<https://www.comet-cnes.fr/index.php/mat>

Comet Structures

<https://www.comet-cnes.fr/index.php/str>

Comet RSE

<https://www.comet-cnes.fr/index.php/rse>

Programme Perséus

<https://perseus.cnes.fr/fr/>

APPEL À IDÉES INNOVATION TRANSPORT SPATIAL

<https://rd-cnes.wiin.io/fr/applications/Innovations-Transport-Spatial?programId=62389d9a4ecb5add25473bfc>

DES QUESTIONS, DES COMMENTAIRES ? VOTRE AVIS NOUS INTERESSE

courriel : fdr-techniques@cnes.fr

