

DIGITAL INDUSTRIES SOFTWARE

Ouvrir la voie à une aviation durable d'ici 2050

Utilisation de la simulation et des tests pour soutenir le développement d'avions non polluants

Résumé

Conformément à l'engagement de la plupart des économies mondiales dans le cadre de l'accord de Paris (COP21), le secteur du transport aérien est confronté à un défi de taille : atteindre la neutralité carbone d'ici 2050.

Ce livre blanc dresse la liste des options offertes par la technologie pour atteindre la neutralité carbone dans le domaine de l'aviation et montre comment notre portefeuille Siemens Xcelerator peut aider l'industrie aéronautique à mener à bien cette transition décisive. Il détaille la manière dont le logiciel et le matériel Simcenter™ seront utilisés pour soutenir l'initiative commune "Clean Aviation" : le principal programme de recherche et d'innovation de l'Union européenne (UE) visant à transformer l'aviation en un avenir durable et neutre sur le plan climatique, grâce à des percées techniques et des démonstrations expérimentales.

Sommaire

Introduction	3
Une transition perturbatrice pour l'aviation	5
Un calendrier serré	7
Accélérer la transition grâce au numérique	7
Accélérer l'exploration de la conception du système	8
Nouveau stockage de combustible léger	10
Nouveaux systèmes de propulsion	11
Nouvelles structures et aérodynamique	15
Fonctionnement sûr et efficace	20
Expérimenter, tester et démontrer	20
Conclusion	23

Introduction

Depuis la révolution industrielle, les industries se sont principalement appuyées sur l'énergie thermodynamique fournie par la combustion (oxydation) de combustibles fossiles (hydrocarbures). L'oxydation d'hydrocarbures libère principalement des oxydes comme l'eau (H_2O) et le dioxyde de carbone (CO_2), dans l'air, qui sont tous deux des gaz à effet de serre (rayonnant de l'énergie dans le domaine de l'infrarouge thermique).

Dans l'atmosphère, l' H_2O est précipité dans le cadre du cycle hydrologique tandis que le CO_2 , peu réactif, persiste, principalement capté par la biomasse (photosynthèse) et les océans (acidification). Les activités humaines libérant plus de CO_2 que la biomasse et les

océans ne peuvent en capter, la concentration de CO_2 dans l'atmosphère ne cesse d'augmenter.

L'augmentation de la concentration de CO_2 , combinée à sa puissance radiative infrarouge, modifie l'équilibre radiatif de la Terre (énergie solaire entrante par rapport à l'énergie radiative sortante de la Terre). Cela conduit à une accumulation globale de chaleur et à une augmentation de la température (principalement de l'atmosphère et des océans) estimée en 2021 à 0,85 Celsius ($^{\circ}C$) au-dessus de la référence de 1951 à 1980 et à 1,1 $^{\circ}C$ au-dessus des niveaux de la fin du XIXe siècle (selon le Goddard Institute for Space Studies de la NASA, 2021).

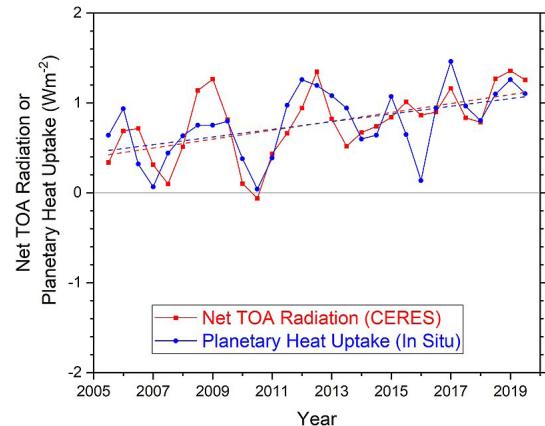
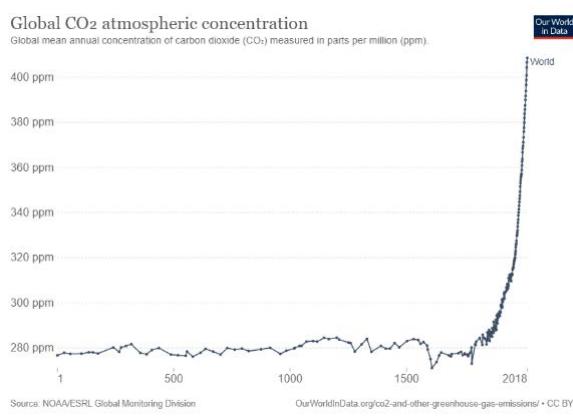


Schéma 1 : À gauche, un graphique historique de la concentration moyenne de CO₂ dans l'atmosphère (Our World in Data), et à droite, un déséquilibre observé de l'énergie thermique. (NASA Langley Research Center, 2021)

Même si l'augmentation de la température moyenne de 1,1 $^{\circ}C$ est limitée en valeur absolue, l'atmosphère et les océans étant des systèmes fluides aux interactions dynamiques, une légère augmentation des températures modifie le comportement des fluides : vents, courants, humidité, températures locales, etc. Par conséquent, cela entraîne un changement climatique.

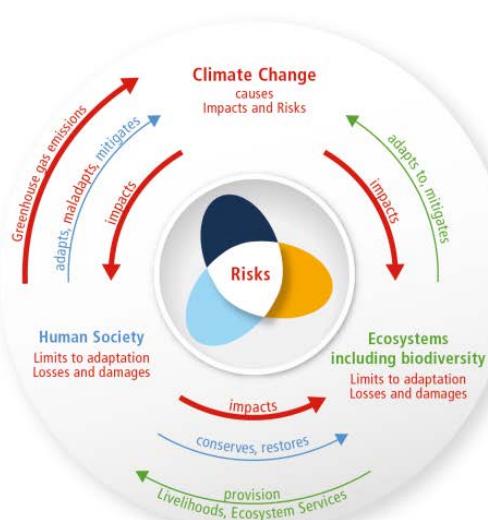
Comme présenté dans le rapport d'évaluation n° 6 du GIEC, l'interdépendance du climat, des écosystèmes et de la biodiversité avec les sociétés humaines fait du changement climatique une menace existentielle.

Pour faire face aux menaces du changement climatique, nos sociétés doivent s'engager dans des pratiques industrielles de développement durable et résilient. Afin de parvenir à un tel développement durable, les plus grandes économies du monde se sont fixé pour objectif d'atteindre la neutralité climatique d'ici 2050 et 2060 pour la Chine.

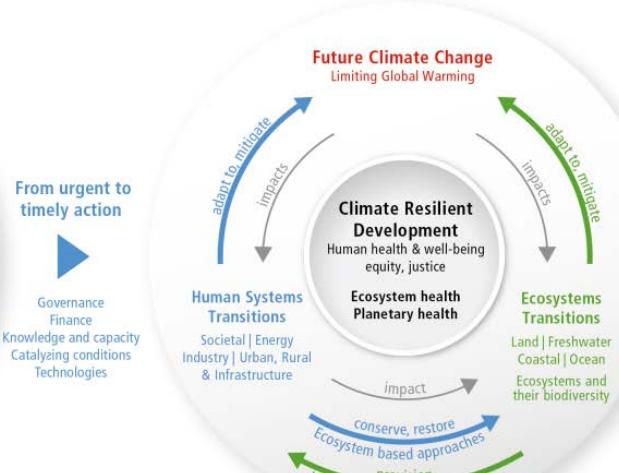
Atteindre la neutralité climatique est un défi crucial pour toutes les industries qui doivent s'adapter aux nouvelles sources et aux nouveaux vecteurs d'énergie, tout en assurant une efficacité énergétique élevée. Progressivement, ces industries devront éliminer les combustibles fossiles émetteurs de CO₂ dont elles se sont servies pendant des siècles.

From climate risk to climate resilient development: climate, ecosystems (including biodiversity) and human society as coupled systems

(a) Main interactions and trends



(b) Options to reduce climate risks and establish resilience



The risk propeller shows that risk emerges from the overlap of:



Schéma 2 : Du risque climatique au développement résilient au climat. (Sixième rapport d'évaluation du GIEC)

Une transition perturbatrice pour l'aviation

Élimination progressive des combustibles fossiles

Comme tous les secteurs industriels, le transport aérien devra atteindre la neutralité climatique en éliminant progressivement les combustibles fossiles. Toutefois, l'aviation est confrontée à des défis spécifiques. Tout d'abord, comme voler signifie surmonter le poids de l'avion avec des forces opposées (portance, poussée), le poids est le facteur de performance de premier ordre qui conditionne la portée et la charge utile de l'avion. Cela signifie que les futures technologies de propulsion neutres sur le plan climatique devront fournir l'énergie gravimétrique et la densité de puissance les plus élevées possibles. Deuxièmement, comme les forces d'opposition au poids dépendent de la production d'énergie et de la disponibilité et du contrôle de la commande de portance, la sécurité des nouvelles technologies de propulsion doit être garantie.

Carburants alternatifs neutres pour le climat

Les carburants ayant la meilleure densité énergétique gravimétrique et volumétrique sont généralement des hydrocarbures sans alternative non carbonée. La neutralité climatique de ces carburants doit être évaluée en tenant compte de leur production et de la

compensation du CO₂ pour être durable. Des technologies telles que le carburant durable d'aviation (CDA) suivent cette option, en utilisant le bio-sourcing et le recyclage du pétrole pour produire de tels carburants, et en adaptant les turbines à gaz et les systèmes de carburant pour les supporter. Ces technologies contribueront à une réduction des émissions mondiales. Néanmoins, leur durabilité fondamentale est remise en question, compte tenu de l'utilisation des sols nécessaire pour assurer le transport aérien mondial.

D'autres technologies, comme les électrocarburants (hydrocarbures produits par la combinaison de CO₂ et d'hydrogène), nécessitent la disponibilité de grandes sources de CO₂ dans un monde en voie de décarbonisation et de grands catalyseurs à base de platine. Elles sont confrontées à des défis majeurs en matière d'efficacité énergétique des processus de transformation (hydrolyse, méthanisation, craquage, etc.). La mise à l'échelle et la compétitivité future de ces technologies par rapport à l'hydrogène et sa longévité industrielle dans un monde en voie de décarbonisation sont encore à l'étude. Le principal avantage de ces hydrocarbures alternatifs est qu'ils constituent un choix fiable et sûr pour une utilisation avec les technologies aéronautiques existantes.

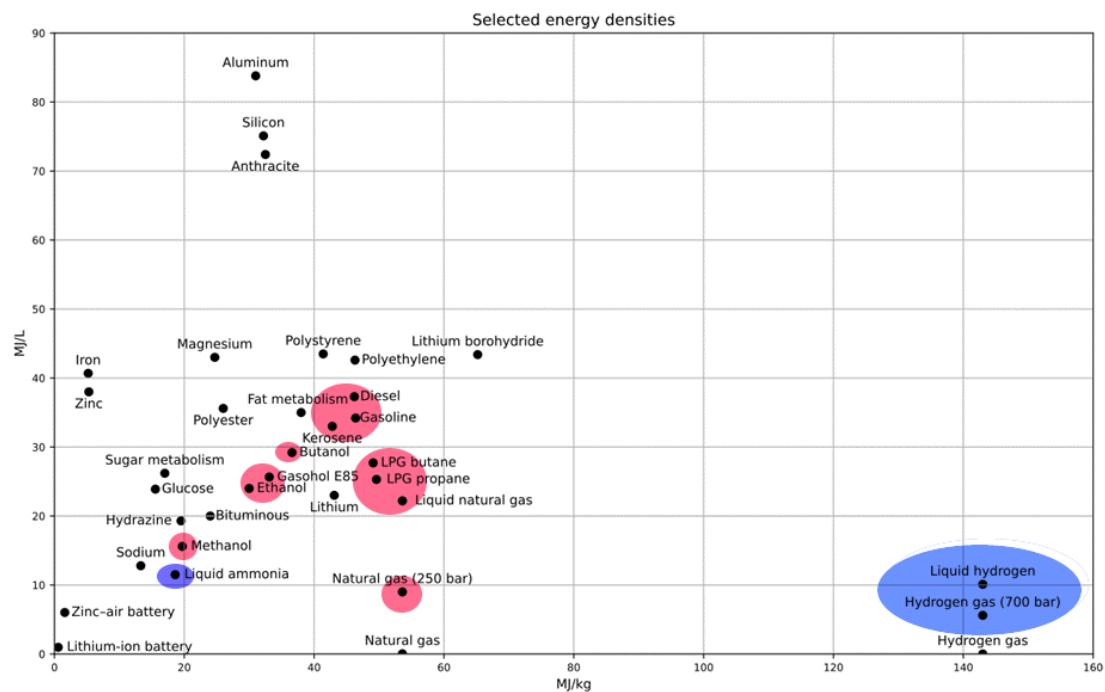


Schéma 3 : Densités volumétriques et gravimétriques énergétiques des combustibles. (Wikipedia, Energy density)

En dehors des hydrocarbures, les options de carburants à haute densité énergétique gravimétrique se limitent à l'hydrogène comprimé et liquide, même en tenant compte du facteur gravimétrique de stockage (masse du réservoir par masse de carburant). De plus, l'adaptation des réservoirs à leurs applications permettra d'améliorer encore la densité énergétique gravimétrique globale.

En raison de sa faible densité gravimétrique, l'ammoniac liquide ne sera jamais aussi dense qu'un hydrocarbure. De plus, la combustion de l'ammoniac nécessite du dihydrogène (H₂) pour se reformer et libérer des oxydes d'azote (NOx) qui doivent être post-traités (ce qui est difficile à mettre en œuvre pour un moteur à réaction). Cela se ferait au prix d'une masse supplémentaire du système de propulsion. L'ammoniac liquide peut devenir une option si les technologies de stockage de l'hydrogène ne parviennent pas à atteindre une capacité gravimétrique supérieure à celle de l'ammoniac liquide. Mais dans ce cas, cela entraînerait un changement encore plus radical dans le transport aérien en raison d'un nouveau compromis entre la charge utile et le carburant.

L'utilisation de l'hydrogène présente l'avantage majeur de libérer principalement de la vapeur d'eau et des NOx limités au lieu de CO₂. Même si la vapeur d'eau est également un important gaz à effet de serre, elle a l'avantage d'avoir une courte durée de

vie (en raison des précipitations) par rapport à la persistance atmosphérique du CO₂ (qui est lentement capturé par la biomasse et les océans, ce qui accroît l'acidification).

Précédentes expériences de propulsion à l'hydrogène liquide

L'idée d'utiliser l'hydrogène liquide comme carburant pour l'aviation n'est pas nouvelle. Elle a été élaborée avant la Seconde Guerre mondiale, démontrée il y a plus de 60 ans par le projet Bee (illustré ci-dessous) du National Advisory Committee for Aeronautics (NACA) et traitée par la recherche au cours des décennies suivantes, notamment pour évaluer la sécurité du carburant par rapport au kérósène.

Mais le développement des technologies de l'hydrogène aéronautique va bien au-delà de l'exploration technologique qui a été menée jusqu'à présent et vise à atteindre un déploiement commercial dans les 20 prochaines années.

Il implique des changements majeurs qui ont un impact sur presque tous les domaines de l'ingénierie aéronautique, tels que les structures, les systèmes, la navigabilité, la sécurité, les opérations, les chaînes de valeur, la fabrication, etc. et qui génèrent des défis uniques et nouveaux pour l'ingénierie aéronautique. Il faudra accélérer toutes les méthodes et tous les outils possibles de recherche et développement pour atteindre rapidement la maturité industrielle.

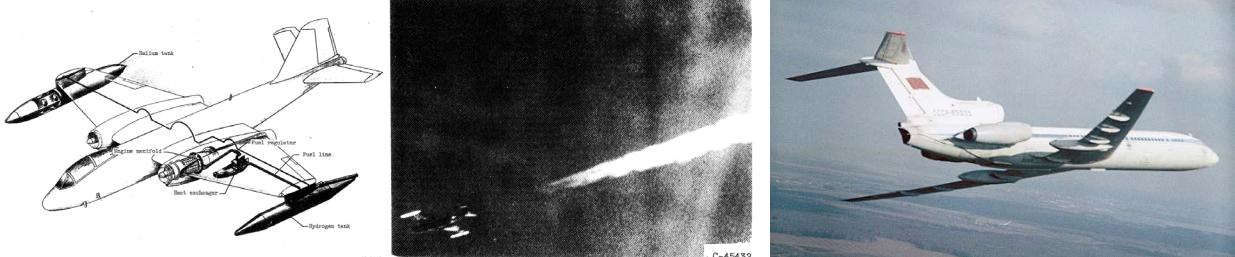


Schéma 4 : De gauche à droite, le B57 à hydrogène liquide modifié, ses traînées de condensation en vol d'essai (Flight Investigation of a Liquid Hydrogen Fuel System) et le démonstrateur Tupolev Tu-155 à hydrogène liquide. (Ty-155: начало криогенной авиации)

Un calendrier serré

Avec un programme visant la neutralité climatique d'ici 2050, le secteur de l'aviation doit transformer sa technologie en moins de 25 ans.

Quand on considère les changements radicaux au niveau des architectures et des technologies des avions qui devront être réalisés pour atteindre la maturité commerciale (nouveaux carburants, réservoirs, systèmes de carburant, production d'énergie,

systèmes électriques, intégration propulsive, intégration des systèmes, ailes, cellule, nouveaux matériaux, systèmes de contrôle), ainsi que les risques nouveaux et inconnus et les nouveaux concepts opérationnels et aéroports, cette période est courte. Le secteur de l'aéronautique n'a pratiquement pas changé au cours des 70 dernières années. Atteindre ce stade de maturité technologique en aussi peu de temps est un défi unique dans le secteur.



Schéma 5 : Illustration des progrès des technologies de propulsion aéronautique au fil du temps. (Airbus)

Accélérer la transition grâce au numérique

La recherche, le développement et l'industrialisation de ces nouvelles technologies en s'appuyant sur les méthodes et outils traditionnels fournirait des résultats bien après 2050. La neutralité climatique ne serait pas atteinte à la date prévue. Pour atteindre l'objectif de neutralité climatique de 2050, il faut travailler en parallèle sur la recherche et le développement et réduire le temps d'ingénierie. C'est là que les nouvelles technologies numériques, combinées aux nouvelles méthodes et à la puissance de calcul, pourraient apporter des avantages majeurs au développement d'une aviation neutre pour le climat dans le futur.

Le rôle de la simulation et des tests

Pour assurer cette accélération, les solutions numériques, et en particulier la simulation et les tests, doivent prendre en charge toute la gamme des technologies futures, la physique associée et les

techniques d'analyse. Mais pourquoi la simulation en particulier ? Alors que les domaines numériques comme la gestion du cycle de vie des produits (PLM), la conception assistée par ordinateur (CAO), l'ingénierie des systèmes basée sur des modèles (MBSE), les bases de données, la communication, l'automatisation de l'industrie, l'Internet des Objets (IoT)/edge ou SaaS sont peu affectés par le comportement physique des éléments virtuels qu'ils manipulent, les domaines de la simulation et des tests sont confrontés aux propriétés physiques et aux comportements des objets qu'ils manipulent.

Face à de nouvelles technologies appliquées, comme la propulsion à l'hydrogène liquide, la simulation et les tests doivent saisir, mesurer et exploiter tous les comportements physiques pertinents (combustion, ébullition, régimes d'écoulement, flottabilité, fragilisation des matériaux, etc.). Cela nécessite la

connaissance de la physique sous-jacente, la formulation de nouveaux modèles, l'accès à des résultats expérimentaux de haute qualité et la création d'une expertise. L'accélération du développement exigera des calculs de simulation encore plus efficaces, combinés et importants, ainsi que des capacités de tests étendues. La transition vers une aviation durable nécessite des initiatives ambitieuses dans les domaines de la simulation et des tests.

Entreprise commune "Clean Aviation"

Afin de soutenir la transition accélérée vers des avions durables et d'offrir à ses clients des fonctionnalités Simcenter pour prendre en charge les technologies futures, Siemens Digital Industries Software a rejoint l'entreprise commune "Clean Aviation" qui durera jusqu'en 2031.

Le partenariat de l'entreprise commune "Clean Aviation" développera et démontrera les futures technologies aéronautiques pour les avions moyen-courrier, les avions régionaux et les technologies de propulsion à l'hydrogène. Ces activités de recherche et développement portent également sur les défis numériques comme la simulation, l'optimisation et les tests des technologies de propulsion hybride-électrique, les nouvelles cellules et structures aériennes, le stockage cryogénique de l'hydrogène, la distribution, les turbines à hydrogène, les piles à combustible, l'intégration globale et les compromis de toutes ces technologies, tout en assurant la sécurité. En abordant toutes ces technologies futures en collaboration avec l'industrie, les solutions Simcenter peuvent être utilisées pour contribuer à accélérer la transition vers des avions durables et neutres sur le plan climatique.

Accélérer l'exploration de la conception

L'exploration de nouvelles conceptions de systèmes d'avions et l'intégration de nombreuses technologies nouvelles et différentes présentent le défi d'évaluer plusieurs alternatives avec de multiples degrés de liberté (DOF) tout en assurant une conception optimale. En outre, autant de vérifications que possible doivent être effectuées à un stade précoce du développement pour éviter la découverte ultérieure de défauts de conception majeurs. Sinon, cela pourrait entraîner des coûts supplémentaires et des retards dans la réalisation de l'objectif de neutralité climatique de 2050.

Pour s'assurer que les conceptions sont physiquement réalisables, il est essentiel de combiner des disciplines complémentaires d'ingénierie numérique au stade de la conception. Plus précisément, alors que les

disciplines de l'ingénierie des systèmes saisissent les exigences, les fonctions, les composants des avions et toutes les affectations ou relations associées, elles doivent être liées par des techniques d'analyse statique et dynamique (simulation). Celles-ci permettent d'évaluer les attributs de performance et les comportements des premières conceptions. Pour obtenir le meilleur compromis possible, il faut utiliser une combinaison d'ingénierie et de simulation de système dans le cadre d'un processus d'optimisation multidisciplinaire (MDO) afin d'avoir le meilleur chemin de calcul possible.

Pour combiner les outils au sein d'un processus, il est essentiel d'assurer la continuité numérique en permettant la propagation des informations via différents domaines informationnels et informatiques.

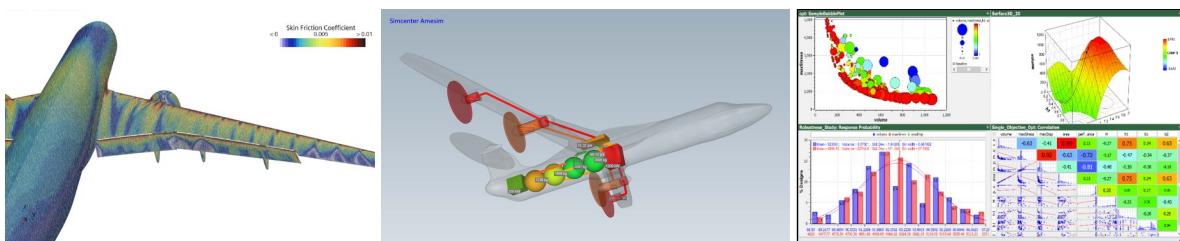


Schéma 6 : Exploration multi-domaine de la conception de la propulsion hybride cryogénique à combustion H₂, combinant l'aéroélasticité (Simcenter 3D, Simcenter STAR-CCM+) avec les systèmes de propulsion (Simcenter Amesim), pilotée par une optimisation multidisciplinaire intelligente. (HEEDS)

Ceci est réalisable en combinant des solutions intégrant des modèles de données, en exposant des services de données et des interfaces de programmation d'applications (API) d'automatisation. Par exemple, la projection des modèles de systèmes (SysML) de la solution Teamcenter® System Modeling Workbench en tant qu'architecture de simulation de systèmes hétérogènes dans les logiciels Simcenter System Architect et HEEDS™. Simcenter, Teamcenter et HEEDS font partie du portefeuille Xcelerator de Siemens, un portefeuille complet et intégré de logiciels, de matériel et de services.

L'architecture de simulation hétérogène combine des modèles comportementaux spécifiques au domaine, des modèles avioniques et des résultats d'études de conception réduits, intégrant et consolidant les études des domaines physiques. Elle permet une vérification et une découverte holistique des phénomènes émergents.

Mais les fonctionnalités des outils et des technologies ne doivent pas nous faire oublier le travail critique à effectuer dans l'élaboration du modèle de données, la définition des flux de travail et les règles de transformation du modèle pour parvenir à une automatisation stable et efficace des études de conception.

Après ce tour d'horizon des cadres d'exploration de la conception générale des avions, nous allons jeter un coup d'œil rapide aux principaux domaines technologiques de l'aviation neutre pour le climat à saisir, gérer, consolider et optimiser de manière traçable par le cadre mentionné précédemment.

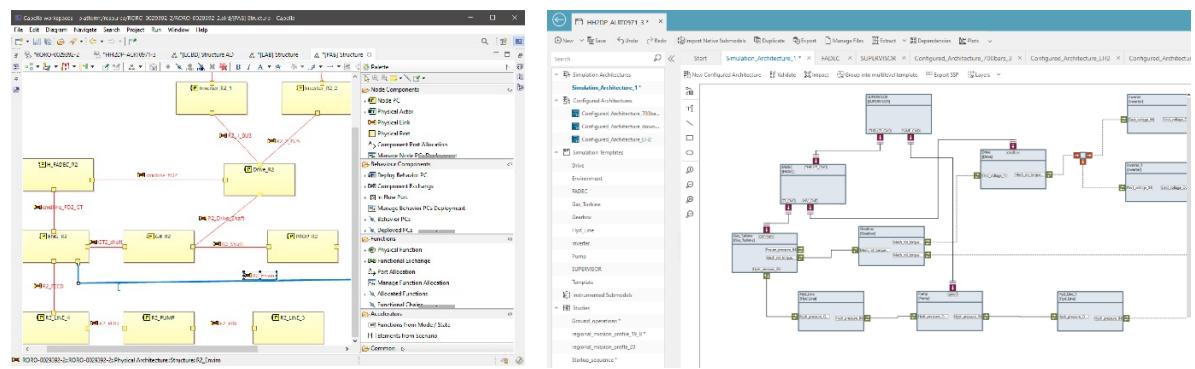


Schéma 7 : Modèle d'ingénierie système (Capella) et architecture de simulation système associée. (Simcenter System Architect)

Nouveau stockage de combustible léger

Comme cela a été mentionné plus haut, la prise en compte de la capacité gravimétrique de stockage de la densité énergétique gravimétrique globale du combustible est d'une importance capitale. L'objectif principal est d'atteindre au moins des densités énergétiques gravimétriques du même ordre que celles des hydrocarbures, tout en respectant les normes de sécurité et de durabilité les plus élevées. Cela implique d'atteindre des capacités gravimétriques de stockage supérieures à 30 % (atteindre 40 mégajoules par kilogramme (MJ/kg pour un combustible de 120 MJ/kg), ce qui est supérieur aux technologies de pointe actuelles pour l'hydrogène comprimé et liquide.

Quelle que soit l'approche retenue pour le stockage de l'hydrogène (H₂ comprimé, réservoir cryogénique H₂ comprimé ou H₂ liquide), la conception optimale et sûre d'un avion nécessitera des études approfondies,

de l'échelle atomique des matériaux à l'intégration structurelle de l'avion. Plus précisément, il s'agira des comportements des matériaux hétérogènes structuraux et thermiques, de l'optimisation, des tests et de l'homologation, de la fabricabilité et de la sécurité opérationnelle (y compris la surveillance de la santé).

La recherche et la conception de réservoirs à hydrogène matures dans un délai de quelques années ne sont possibles qu'avec l'utilisation intensive de solutions de simulation intégrées combinées à des techniques de test et de mesure (comme celles fournies par Simcenter), afin d'assurer la meilleure adéquation entre les capacités prédictives des modèles et la réalité physique de la conception de nouveaux produits, avec peu ou pas de connaissances avancées ou préexistantes.

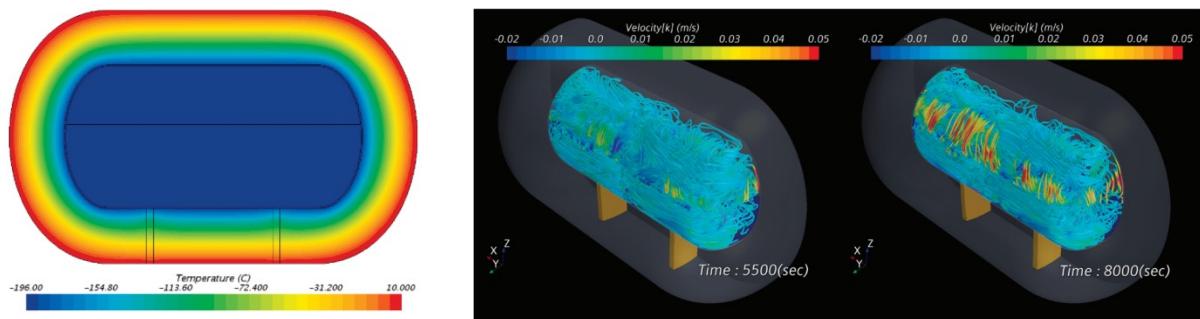


Schéma 8 : Multiphase-thermal simulation on BOG/BOR estimation due to phase change in cryogenic liquid storage tanks. (Applied Thermal Engineering)

Nouveaux systèmes de propulsion

Avec l'introduction simultanée de nouveaux carburants, de technologies de production d'énergie et d'électrification, des conceptions radicalement nouvelles doivent être explorées, étudiées et optimisées pour évaluer les performances opérationnelles réalisables en vol et au sol.

Ces études impliquent la combinaison de différentes technologies de composants (turbines à gaz, piles à combustible, entraînements électriques, systèmes de carburant cryogénique, distribution électrique,

batteries, etc.), différents domaines physiques (fluide, thermique, mécanique, électrique, etc.) et différentes échelles (du microscopique au macroscopique, des microsecondes aux heures et aux années). La combinaison de technologies, de domaines et d'échelles au stade de la conception dans une approche efficace et sans perte nécessite de combiner des logiciels de modélisation et de simulation capables d'appréhender plusieurs échelles physiques dans le même cadre, comme le propose Simcenter.

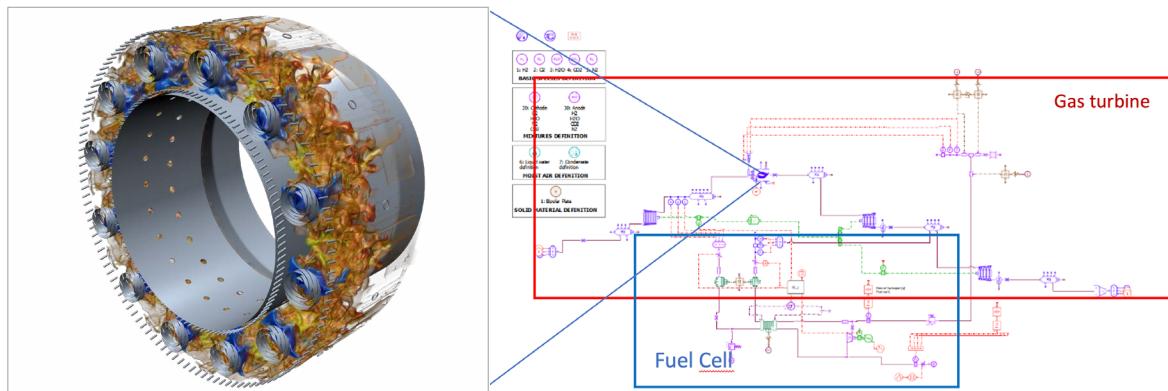


Schéma 9 : La simulation de combustion H2 Simcenter STAR-CCM+ liée au modèle de système de turbine à gaz et des piles à combustible Simcenter Amesim.

Même si bon nombre des technologies et domaines aéronautiques potentiels futurs ne sont pas nouveaux, comme pour l'automobile et l'énergie, ils doivent répondre aux exigences de l'aéronautique, pouvoir être combinés de manière radicalement nouvelle ou aborder des échelles de puissance et d'énergie sans précédent.

Génération de puissance

Tout d'abord, en ce qui concerne la production d'énergie primaire à partir d'hydrogène, les principales options envisagées seraient les piles à combustible, les turbines à gaz et les moteurs à combustion interne, dont les capacités ont été démontrées il y a 10 ans sur le drone à haute altitude et longue endurance (HALE) Boeing Phantom Eye.

L'application des technologies des piles à combustible à l'aéronautique nécessite de découpler la puissance par rapport aux meilleures performances (de 100 kW à 1 mW), mais aussi de s'adapter aux opérations aéronautiques (pression, température, humidité, etc.). La mise à l'échelle et l'exploitation de ces systèmes de propulsion à piles à combustible posent des défis

jamais rencontrés dans le domaine des transports terrestres ou de l'énergie : nécessité d'énormes compresseurs adaptés à tous les niveaux de vol, nouvelles opérations d'équilibrage des installations, nouvelle gestion thermique pour les environnements extrêmes, hybridation pour une efficacité et une stabilité accrues, et bien d'autres encore, connus et inconnus. De plus, la dynamique limitée et lente des piles à combustible impose le recours à des tampons énergétiques comme les batteries, ce qui conduit à un système encore plus complexe et fortement intégré à interfaçer avec les moteurs de propulsion et à intégrer dans les structures. Cette complexité constitue un défi en termes de compromis de conception, de contrôles et de sécurité.

La combustion d'hydrogène dans des turbines à gaz adaptées a été démontrée il y a plusieurs décennies. Les principaux défis sont désormais de gérer les émissions (NOx, traînées de condensation), d'assurer la sécurité des moteurs à réaction, leur durabilité, les performances de combustion (mélange, stabilité de la flamme, aéroacoustique, gestion des NOx, de

la vapeur d'eau, etc.), la gestion thermique (température plus élevée du cœur du moteur), le vieillissement des matériaux en interaction avec l'hydrogène (fragilisation), la lubrification et d'autres problèmes (y compris des problèmes non identifiés).

Pour passer des prototypes de recherche sur les turbines à gaz à hydrogène à des solutions de propulsion aéronautique durables et matures sur le plan industriel, il faut acquérir une compréhension plus approfondie des phénomènes physiques et de la manière de les traiter à l'échelle de la technologie des composants, et exploiter les possibilités offertes par les nouveaux carburants. Ces possibilités pourraient être de nouveaux cycles thermodynamiques secondaires, la ventilation, le refroidissement cryogénique ou la supraconductivité à haute température.

Hybridation

Au-delà de la technologie des turbines à gaz à propulsion par hydrogène, il faut considérer les avantages potentiels de diverses stratégies d'hybridation et intégrer les évolutions des structures et de

l'aérodynamique des avions. Le niveau d'hybridation pourrait aller de l'hybridation de la turbine à gaz à propulsion dynamique (entraînement électrique intégré à la turbine à gaz) jusqu'à la combinaison de micro-turbines à gaz et de piles à combustible comme unités de production d'énergie pour la propulsion électrique distribuée, avec des variations infinies de réseaux reconfigurables de composants actifs et redondants. Cela générerait des défis de conception hautement dimensionnels à résoudre en quelques années. L'hybridation implique également le développement de nouveaux systèmes et composants électriques de forte puissance, critiques en termes de sécurité (onduleurs, variateurs, batteries, disjoncteurs, etc.), avec le défi de devenir pour la première fois le principal vecteur de transmission de l'énergie de propulsion, fonctionnant à des niveaux de courant et de tension sans précédent dans le cadre des contraintes aéronautiques (absence de sol, drains thermiques structurels limités, refroidissement par air limité à haute altitude, etc.).

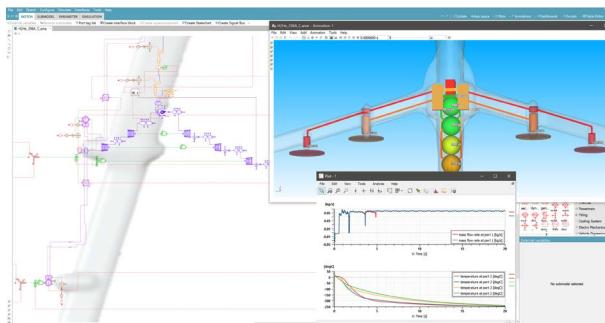
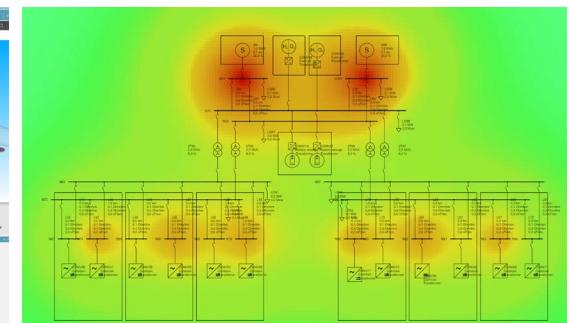


Schéma 10 : Simulation du concept de propulsion hybride hydrogène parallèle-série (Simcenter Amesim), analyse de la charge électrique de propulsion distribuée (PSS® SINCAL).

L'extension de l'exploration et de la vérification virtuelles de la conception jouera un rôle essentiel, car il s'agit du seul moyen d'évaluer les configurations multi-domaines et multi-dimensionnelles des systèmes de propulsion. Ces processus numériques d'exploration et de vérification de la conception sont essentiels à la conception d'une aviation neutre sur le plan climatique.

Cependant, même si l'exploration et la vérification virtuelles de la conception accélèrent l'ensemble des processus, augmenter le niveau de maturité de la gestion et de l'exploitation des technologies de simulation est également nécessaire. L'automatisation numérique implique des modèles de données cohérents et des définitions de composants architecturaux, l'ouverture des interfaces et des formats, ainsi que des



processus structurés de conception, d'optimisation, de test et de vérification dans les différents services et équipes.

Sécurité

Quelle que soit la technologie utilisée, les piles à combustible et les turbines à gaz à hydrogène nécessitent toutes deux un système sûr et efficace d'alimentation en hydrogène liquide (stockage, conduites, pompes, échangeurs de chaleur), ce qui est nouveau pour le domaine de l'aviation. Même si l'aéronautique peut bénéficier des technologies de la propulsion spatiale et des procédés industriels, les composants et les systèmes doivent être développés et certifiés conformément aux réglementations aéronautiques actuelles et futures. En raison de l'aspect critique du stockage du carburant, toutes les autres technologies

de systèmes de carburant doivent être entièrement revues à partir des technologies de pointe, car l'hydrogène gazeux et liquide a des comportements et des propriétés distincts par rapport aux autres carburants

aéronautiques. Elles doivent d'abord être révisées en tenant compte des différences au niveau des contraintes de sécurité, comme illustré ci-dessous.

	Hydrogen	Kerosene
Auto-ignition temperature	✓	X
Buoyancy	✓	X
Diffusivity	✓	X
Spill hazard	✓	X
Burning time	✓	X
Lower flammability limit	✓	X
Flammability range	X	✓
Leakage detection	X	✓
Leakage avoidance	X	✓
Flame detection	X	✓
Minimum ignition energy	X	✓

Schéma 11 : Comparaison des paramètres de sécurité entre le kérosène et l'hydrogène. (Liquid Hydrogen as a Potential Low-Carbon Fuel for Aviation)

Maîtriser le comportement de l'hydrogène

Deuxièmement, les technologies des systèmes d'alimentation en carburant doivent être revues en raison du comportement physique et des propriétés de l'hydrogène liquide et gazeux. Par exemple, un système d'alimentation en hydrogène liquide (du réservoir à la turbine à gaz ou à la pile à combustible) doit gérer l'évaporation dans les échangeurs de chaleur, les tuyaux et les pompes, ce qui affecte fortement les performances globales et l'intégrité du système d'alimentation. En outre, l'évaporation de l'hydrogène liquide constitue un défi majeur en matière

de conception et d'ingénierie. Les changements de régimes d'écoulement de pointe sont actuellement limités aux caractéristiques expérimentales et ne sont pas applicables à la maturité industrielle de structures complexes et actives (comme les échangeurs de chaleur ou les pompes). C'est pourquoi digitaliser les études sur les systèmes de fluides thermiques à l'aide de la simulation de la CFD et leur mise à l'échelle (comme illustré précédemment pour la combustion) est un moyen essentiel d'accélérer les études de conception des systèmes d'alimentation en hydrogène liquide.

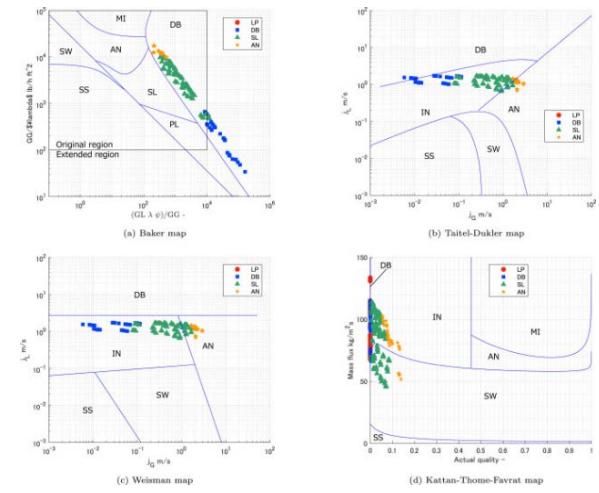
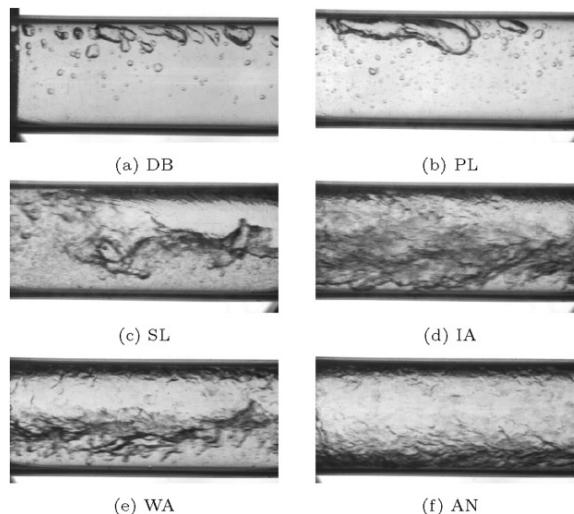


Schéma 12 : Régimes d'écoulement de l'hydrogène liquide et transitions des modes d'écoulement. (International Journal of Hydrogen Energy)

Au-delà du comportement de l'hydrogène liquide, sa basse température pourrait entraîner le givrage des échangeurs de chaleur, des pompes ou de l'actionnement des vannes, ce qui nécessite également de trouver de nouvelles interfaces et solutions d'actionnement. Enfin, la faible énergie d'allumage minimale de l'hydrogène suscitera également des préoccupations majeures concernant la détection des fuites d'hydrogène et les sources d'inflammation potentielles.

Les moyens de relever ces défis sont nombreux et inexplorés. Il pourrait s'agir, par exemple, du passage de matériaux métalliques à des matériaux à faible transfert thermique (composites, polymères, etc.)

pour réduire la chaleur transférée à l'azote liquide et résoudre les problèmes d'écoulement dysphasique. Comme pour les technologies de propulsion et de production d'énergie, les systèmes de carburant eux-mêmes doivent également subir une transformation technologique radicale.

L'hydrogène liquide pourrait également être utilisé pour créer des opportunités technologiques complémentaires pour une source de froid faible pour le refroidissement, des cycles thermodynamiques complémentaires ou pour permettre la supraconductivité (réduction du poids, réduction des pertes, tensions plus faibles).

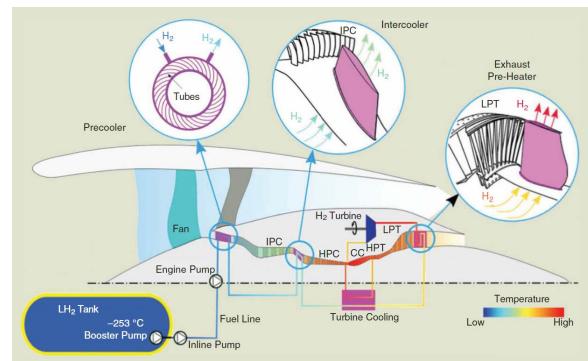


Schéma 13 : Banc d'essai volant de propulsion électrique supraconductrice (Sibnia, SuperOx), concepts de turbosoufflante refroidie à l'hydrogène. (IEEE Electrification Magazine.)

Nouvelles structures et aérodynamique

L'adoption du carburant hydrogène (liquide ou comprimé) et les possibilités d'hybridation n'ont pas seulement un impact sur le système de propulsion, mais aussi sur la structure complète de l'avion.

Intégration d'avions propulsés à l'hydrogène

Le facteur de forme du vaisseau à hydrogène impose son intégration dans le fuselage ou dans les nacelles sous les ailes plutôt qu'à l'intérieur des ailes, comme cela se fait depuis au moins 80 ans. Les principales options de conception qui en résultent consistent à opter pour des structures d'avion différentes, telles que des corps d'ailes mixtes ou des structures d'avion modifiées qui peuvent être utilisées pour intégrer ces réservoirs.

Configurations de fuselage intégré

Les configurations de fuselage intégré présentent le principal avantage d'offrir une grande zone

d'intégration pour les réservoirs d'hydrogène au milieu du fuselage. Même si les configurations de fuselage intégré ont démontré leurs avantages en termes de performances pour les applications militaires, elles restent à l'état d'étude pour les applications civiles, car elles révèlent des défis spécifiques.

Les configurations de fuselage intégré sont confrontées à des défis tels que le changement d'infrastructure au sol, les problèmes de confort des passagers (dynamique ressentie par les passagers loin de l'axe de roulis, absence de fenêtres), les pénalités liées à la pressurisation de la cabine non circulaire, la complexité des commandes de vol et l'autorité ou les interactions aéro-propulsives néfastes (impact sur la stabilité longitudinale, pressions des moteurs, etc.).



Schéma 14 : Démonstrations à l'échelle de TU Delft Flying V (TU Delft), Airbus Maveric (Les Echos) et Boeing X 48C. (defenceWeb)

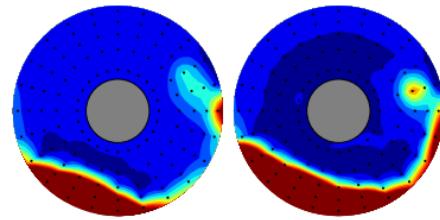
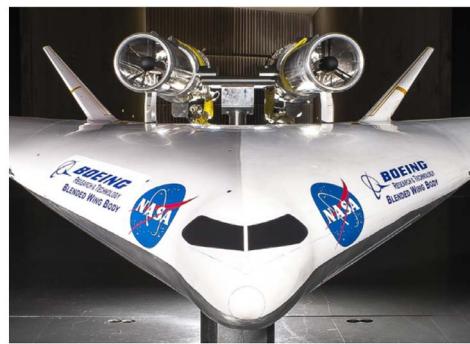


Schéma 15 : Essais en soufflerie du démonstrateur de fuselage intégré de Boeing et corrélation avec la simulation des pressions d'entrée (Simcenter STAR-CCM+). (54th AIAA Aerospace Sciences Meeting)

La maintenance, la réparation et l'exploitation (MRO) ainsi que le remplacement des vaisseaux cryogéniques intégrés au milieu du fuselage intégré peuvent également s'avérer plus difficiles que pour la configuration du fuselage et des ailes traditionnelle.

À plus long terme, les configurations de fuselage intégré devraient offrir les meilleures performances aérodynamiques et, par conséquent, la meilleure consommation d'énergie par masse de charge utile. Mais d'importantes activités de recherche et de développement doivent encore être menées avant de porter ces configurations au niveau de maturité des configurations actuelles des avions.

Configurations d'ailes sèches

Pour une configuration classique de fuselage et d'ailes, le retrait des réservoirs de carburant des ailes permet à l'utilisateur de redessiner de nouvelles ailes sèches, minces et très efficaces. Le fuselage s'allongera, comme l'illustre le concept de turboréacteur à double flux Airbus ZEROe ci-dessous.

Ce changement de configuration de l'avion présente des avantages et des inconvénients, mais ouvre également la voie à de nouvelles solutions radicales. Le principal avantage de l'intégration du réservoir de carburant dans le fuselage est l'aérodynamique. Néanmoins, cela soulève des inquiétudes concernant la structure de l'avion et l'entretien des réservoirs de carburant, car ils peuvent vieillir plus vite que la structure environnante de l'avion.

Le fait de retirer les réservoirs de carburant des ailes offre une plus grande liberté de conception, mais entraîne également une combinaison mécaniquement exigeante de robustesse, de flexibilité, de rapport d'aspect élevé, une nouvelle intégration de la propulsion et, potentiellement, une nouvelle disposition des ailes (comme les ailes à haubans). Le développement d'architectures de propulsion distribuées modifierait aussi radicalement l'intégration aéro-propulsive, en remplaçant les gros moteurs fixés avec les pylônes par de nombreuses hélices ou ventilateurs profondément intégrés dans l'aile.



Schéma 16 : Concept de turboréacteur à double flux Airbus ZEROe. (Airbus)

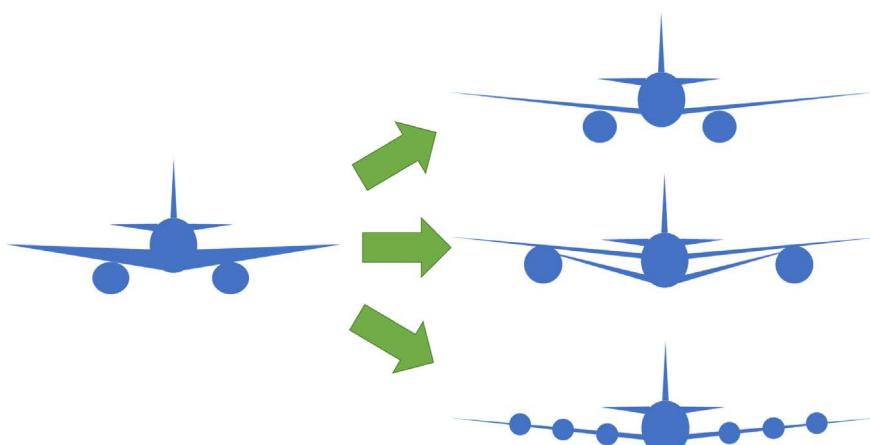


Schéma 17 : Illustration de la voie alternative vers les futures configurations d'avions neutres sur le plan climatique.

Pour la meilleure conception possible, il est nécessaire de capturer dans un seul fil de conception les phénomènes physiques de premier ordre, les contraintes et les exigences. Les principaux phénomènes à prendre en compte ne sont pas seulement les calculs de

performance aérodynamique et de stabilité, mais aussi l'élasticité structurelle, la certifiabilité structurelle précoce, l'intégration de la propulsion et leurs interactions aéroélastiques globales (particulièrement critiques pour les ailes à fort rapport d'aspect).

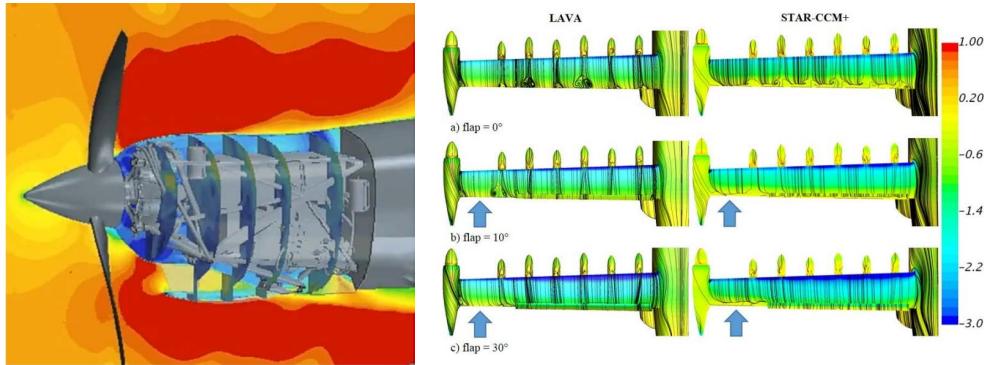


Schéma 18 : Intégration aérothermique de la propulsion électrique d'un avion avec Simcenter 3D et Simcenter STAR-CCM+ (à gauche), simulation combinée du coefficient de pression de surface de Simcenter STAR-CCM+ pour la configuration de propulsion distribuée du X-57 Mod-III (à droite). (AIAA Aviation 2019 Forum)

Combiner les domaines de l'ingénierie tout en capturant des comportements physiques de différentes natures et à plusieurs échelles pour l'optimisation multi-attributs ne peut être réalisé efficacement que dans un cadre intégré d'optimisation et de simulation piloté par des modèles.

L'intégration ne signifie pas une combinaison monolithique d'outils du même fournisseur de logiciels. Il s'agit de la connectivité (formats de données et

interfaces ouverts, modèle de données partagé) et de l'automatisation (définition de flux de travail, orchestration MDO/analyse et optimisation multi-disciplinaire (MDAO), élaboration de script) entre des outils logiciels couvrant différents domaines et échelles. En outre, dans un environnement collaboratif, il est également obligatoire de garantir la capacité d'intégrer des études informatiques de tiers, des modèles ou leurs formes réduites.

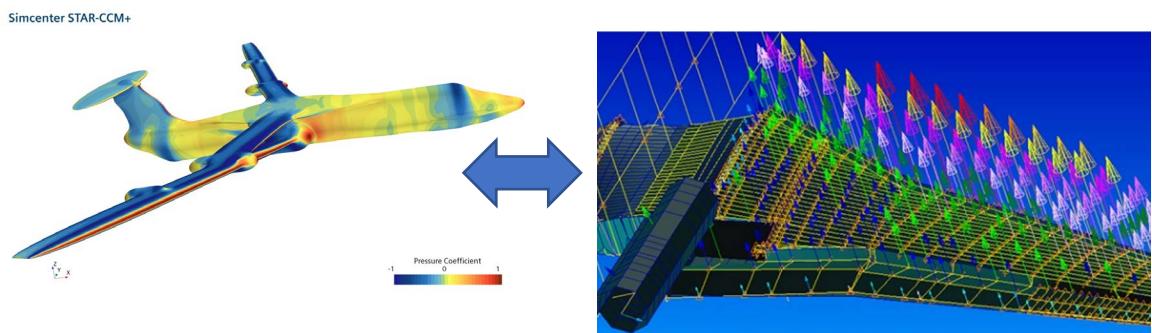


Schéma 19 : Simulations aérodynamiques et structurelles combinées pour l'analyse aéroélastique (Simcenter STAR-CCM+, Simcenter 3D NASTRAN).

Au-delà de la combinaison d'études aérodynamiques et structurelles à l'échelle de l'aile, il est également essentiel d'assurer des flux de travail itératifs bidirectionnels avec des domaines d'échelle inférieure (local <-> global), comme les méthodes de contraintes locales (capturant les structures des matériaux et les comportements d'assemblage) et la cinématique des parties actives locales (volets, becs, spoilers, etc.) pour assurer la cohérence physique globale des études de conception, et donc la faisabilité de la solution.

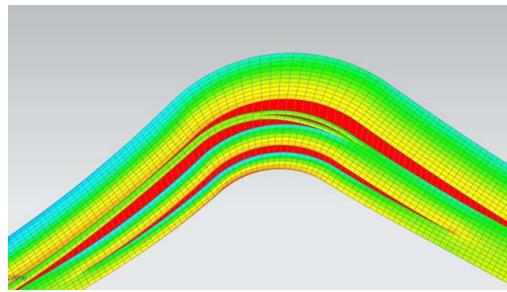
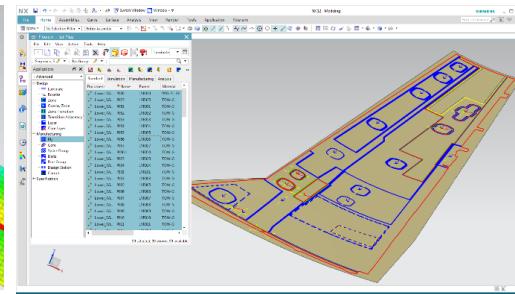


Schéma 20 : Simulation du vieillissement/déformation locale des composites et de la stratification des composites (Simcenter 3D NASTRAN).

Pour les conceptions radicalement nouvelles, il est également important de créer une passerelle avec les processus de fabrication afin de prendre en compte les propriétés induites par la fabrication. C'est notamment le cas pour les structures composites pour lesquelles le processus de superposition des bandes, les procédés thermiques et chimiques doivent tenir compte des limites des machines et des procédés (topologie, taille des pièces, homogénéité, etc.).



Nouvelles interactions avec les structures

Nous avons mentionné plus haut l'adoption combinée potentielle de l'hydrogène liquide comme carburant et de l'hybridation de la propulsion. L'adoption de ces technologies introduit également de nouveaux types d'interactions entre les systèmes et les structures.

L'utilisation de l'hydrogène expose les matériaux et les structures à la corrosion par l'hydrogène, appelée fragilisation, ce qui entraîne le vieillissement et la

fissuration des matériaux. Par conséquent, l'exposition des pièces à l'hydrogène doit être systématiquement prise en compte, de même que la susceptibilité des matériaux à la fragilisation, la déviation des propriétés des matériaux et la prédition du vieillissement. Ceux-ci doivent être traités en combinant les cycles opérationnels de l'avion et de ses sous-systèmes avec une estimation virtuelle des taux de corrosion, comme illustré ci-dessous.

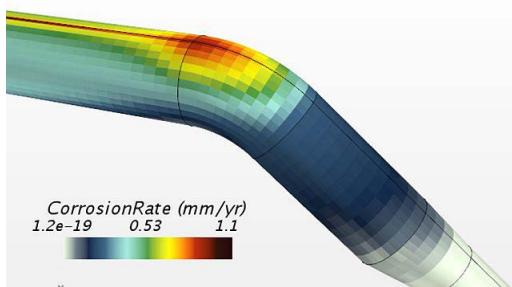
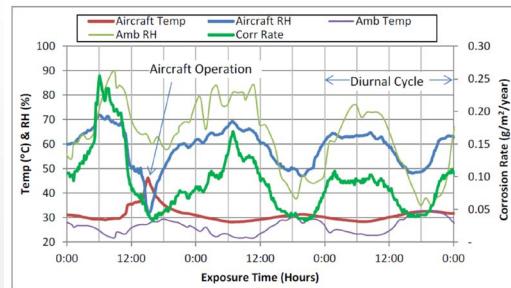


Schéma 21 : Simulation du taux de corrosion (Simcenter 3D et Simcenter STAR-CCM+) en fonction du profil opérationnel de l'avion. (Corrdesa)



En cas de fuites, l'utilisation d'hydrogène liquide expose potentiellement les pièces structurelles à une température très basse, ce qui affecte leur comportement mécanique et leur intégrité structurelle interne. Il est donc essentiel d'évaluer et d'optimiser les interactions des structures avec l'hydrogène liquide et l'hydrogène gazeux au moyen d'une simulation combinée mécanique et thermique multiphasé fluide-structure.

L'intégration de systèmes électriques de forte puissance dans des structures composites plus légères nécessite de considérer les interactions entre les structures et les systèmes électriques au-delà des domaines thermique et mécanique. Mais il faut également l'envisager au-delà des réglementations de pointe dans le domaine électromagnétique. L'intégration de dizaines d'onduleurs haute fréquence et haute puissance, de nombreux entraînements électriques multiphasés haute puissance et de grands faisceaux électriques, tous intégrés dans des structures composites, génère des défis majeurs en termes de

gestion de la compatibilité électromagnétique (CEM). Si ces problèmes ne sont pas abordés dès le début de la conception à l'aide d'une simulation électromagnétique (comme illustré ci-dessous), leur découverte tardive peut entraîner un poids supplémentaire (blindage), voire une nouvelle conception du système.

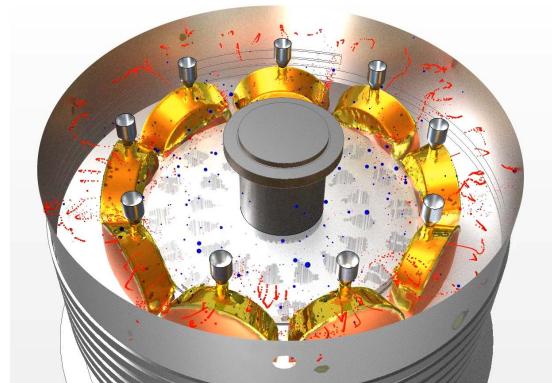


Schéma 22 : Flux multiphasé.

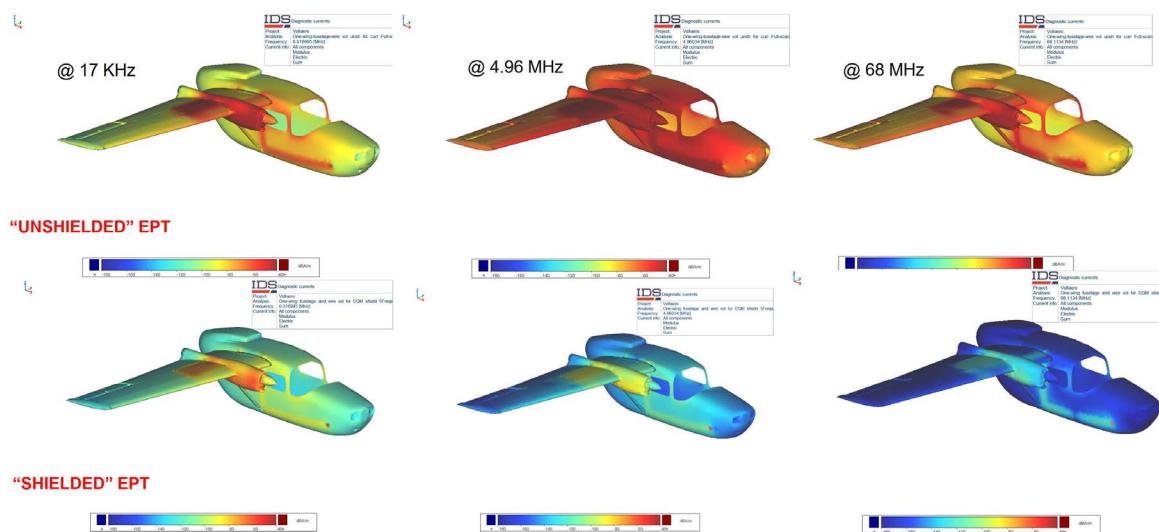


Schéma 23 : Simulation électromagnétique du blindage hybride-électrique des avions. (Simcenter 3D Electromagnetics)

Fonctionnement sûr et efficace

L'introduction de nouvelles technologies de propulsion et de nouvelles structures d'avion étant très rapide, l'entretien, la réparation et la révision ne peuvent pas s'appuyer uniquement sur l'expérience accumulée et la maturité des technologies aéronautiques. Depuis les premiers démonstrateurs de vol jusqu'à la garantie de la disponibilité et de la sécurité des avions de série, il est essentiel de disposer de nouveaux moyens pour surveiller l'état des systèmes des avions et prévoir les opérations de maintenance et de réparation nécessaires.

Certains de ces nouveaux moyens seront basés sur la combinaison de systèmes d'acquisition avec des systèmes d'analyse et de diagnostic basés sur des jumeaux numériques embarqués ou distants.

Ces technologies et leur déploiement à plus grande échelle pourraient bénéficier d'initiatives dans l'industrie automobile, telles que le projet Catena-X (Catena-X, s.d.), auquel Siemens contribue en abordant les technologies de télédiagnostic basées sur les jumeaux numériques pour les futurs véhicules.



Schéma 24 : Illustration simplifiée du concept de télédiagnostic basé sur les jumeaux numériques.

Expérimenter, tester et démontrer

Auparavant, nous avons présenté des solutions numériques pour soutenir et accélérer une série de technologies d'aviation climatiquement neutres. Compte tenu de la complexité et des incertitudes liées à l'exploration des domaines nouveaux des technologies aéronautiques jusqu'à la convergence vers une aviation durable sûre et mature, l'étendue des

technologies et les dimensions des défis devraient aller bien au-delà de ce qui a été présenté.

De nombreuses incertitudes sont dues aux limites du sujet traité ainsi qu'au périmètre d'investigation. Et si les technologies de simulation devraient aider, certaines de leurs capacités dépendent de la



- Diffusion pure
- Réduction de l'interaction entre les flammes par pénétration élevée du jet

Schéma 25 : Banc d'essai de combustion d'hydrogène de l'Université de Cranfield et études de combustion associées.

connaissance fondamentale et de la compréhension de la physique en jeu, de leur application et de leur évolutivité phénoménologique. Le paramétrage ou l'identification des modèles pourrait également dépendre de résultats expérimentaux liés à des configurations d'essai spécifiques.

Cette technologie de pointe manquante doit être construite sur la base des connaissances acquises lors d'expérimentations fondamentales, applicatives et industrielles. Les connaissances issues de ces expérimentations doivent pouvoir être intégrées directement dans les plateformes numériques. En outre, les expérimentations doivent intégrer l'environnement dynamique virtuel prévu et le profil d'exploitation de l'avion ou de ses sous-systèmes.

Par conséquent, les technologies de mesure et de test font partie intégrante de la transition vers une aviation durable, ce qui oblige les fournisseurs à proposer des solutions assurant une continuité entre les mondes physique et virtuel, des composants aux systèmes intégrés. Cette continuité est rendue possible grâce à des formats ouverts, des modèles de données ouverts, des outils d'identification et la traçabilité ; de la simulation au test grâce à la fourniture d'une configuration en format ouvert, à des interfaces ouvertes pour le matériel dans la boucle (HiL), comme l'interface de maquette fonctionnelle (FMI), le protocole de co-simulation distribué (DCP), etc. et à la réduction de modèle pour réaliser la simulation en temps réel.



Schéma 26 : Essais de propulsion électrique à l'aide du testeur thermique transitoire non destructif Simcenter Micred T3STER (à gauche) jusqu'à l'acquisition Simcenter SCADAS à l'échelle de l'avion (au milieu) et aux essais en vol virtuels dans Simcenter Amesim.

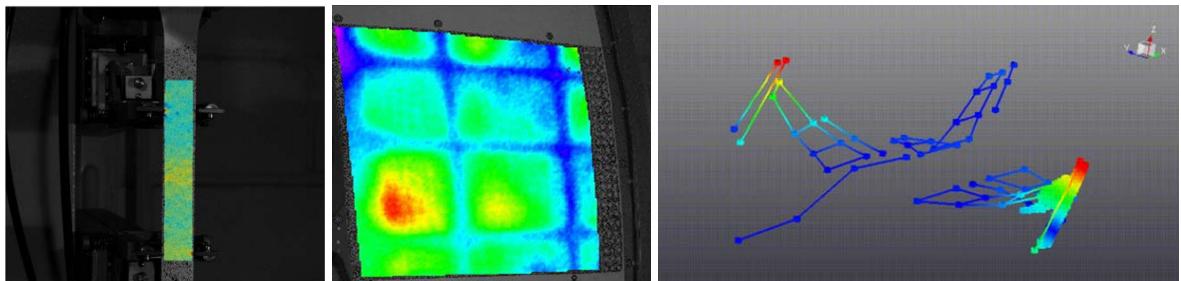


Schéma 27 : Échelles d'essais structurels, corrélation d'images numériques Simcenter Testlab des tests au panneau.

Pour atteindre la neutralité climatique du transport aérien d'ici à 2050, les activités de test et de démonstration expérimentales devront, au cours de la prochaine décennie, passer des laboratoires aux bancs d'essai au sol en grandeur réelle, puis aux essais en vol. Avec une nouvelle échelle d'essai des technologies innovantes, la conception des démonstrateurs sera un défi. Le développement de bancs d'essai nouveaux, par exemple pour la propulsion à l'hydrogène liquide (assurer leur sécurité, obtenir une autorisation de vol et effectuer des essais en vol), n'a

pas d'équivalent en Europe, ni même dans le monde. Malgré les coûts et les risques, ces bancs d'essai de vol sont nécessaires pour évaluer les nouvelles technologies au-delà de la démonstration au sol et de la simulation préliminaire.

Les résultats de ces démonstrateurs orienteront l'avenir de l'industrie aéronautique européenne et du transport aérien, validant ou invalidant les premières étapes de la nouvelle ère de l'aviation.



Schéma 28 : Laboratoires de vol de l'Airbus A380 pour les démonstrateurs OpenFan et de combustion d'hydrogène. (Airbus)

Conclusion

Ce livre blanc ne présente qu'une partie des défis auxquels l'industrie aéronautique sera confrontée au cours des prochaines décennies. Des incertitudes subsistent quant au potentiel des différentes solutions technologiques, mais l'industrie aéronautique devra de toute façon passer à des opérations de neutralité climatique d'ici 2050 afin de maintenir l'accessibilité et la démocratisation du transport aérien.

Pour relever concrètement certains de ces défis, l'entreprise commune "Clean Aviation" contribuera à la neutralité climatique de l'aviation, tout en créant un leadership industriel essentiel pour l'Europe et ses citoyens. L'entreprise commune "Clean Aviation" a pour objectif de travailler sur son programme stratégique de recherche et d'innovation (Clean Aviation, s.d.-b) afin d'obtenir des résultats pratiques et efficaces.

Siemens Digital Industries Software est heureux d'être l'éditeur de logiciels sélectionné pour soutenir l'initiative commune "Clean Aviation" destiné à contribuer au développement de la simulation et des tests pour les technologies aéronautiques durable.

Siemens développera, testera et validera des cas expérimentaux, notamment des technologies de simulation et de test nécessaires à la transition vers une aviation zéro carbone, qui sera soutenue par le numérique. Siemens Digital Industries Software a également pour objectif de contribuer encore davantage à l'accélération numérique en réalisant des progrès en matière de solutions, d'intégration informatique et d'ouverture sur l'ensemble de la chaîne de valeur.

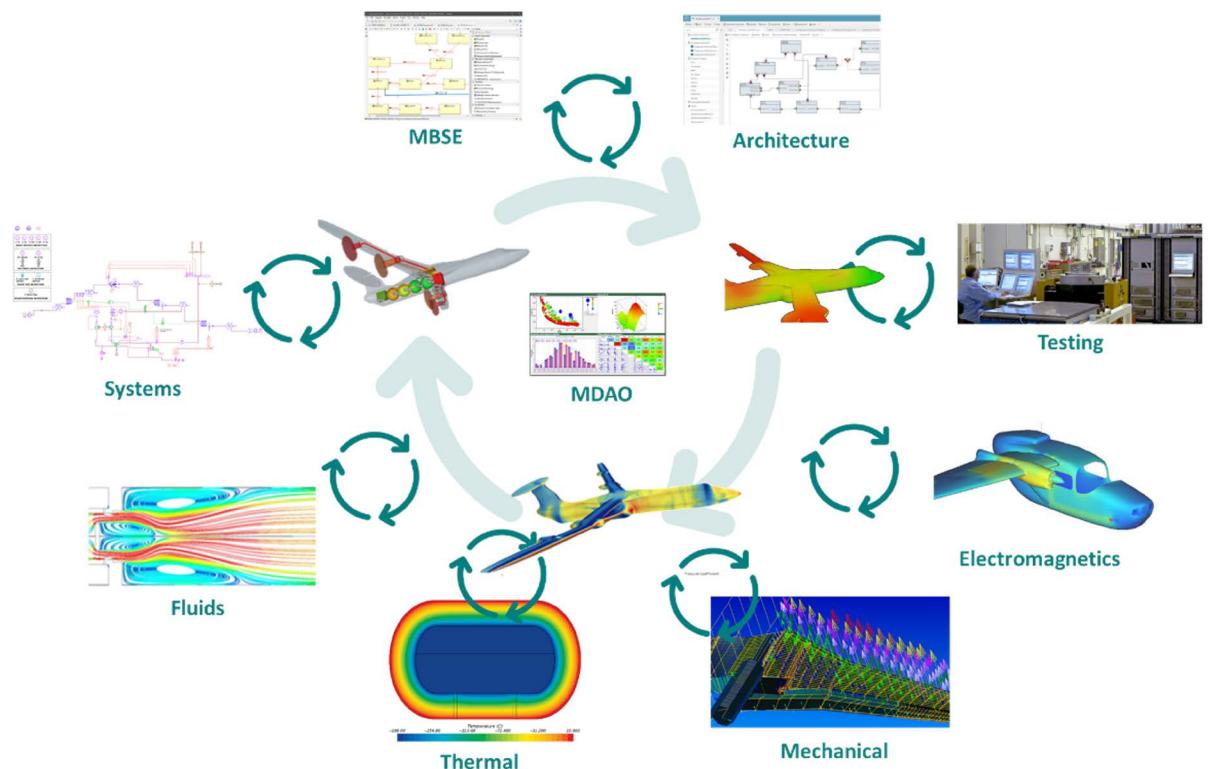


Schéma 29 : Illustration d'une combinaison de disciplines de simulation et de test soutenant le développement accéléré d'une aviation neutre sur le plan climatique. Les processus et les infrastructures basés sur la simulation ne sont pas représentés.

Siemens Digital Industries Software portera ses initiatives et ses conclusions à la connaissance du public, dans l'esprit de cet effort collectif pour un avenir meilleur et avec le soutien d'acteurs publics et privés.

La neutralité climatique de l'aviation n'est pas seulement un objectif de durabilité environnementale. Elle représente également l'objectif de soutenir la connexion des populations du monde entier, de faire progresser les échanges et de mieux connaître notre planète pour un avenir pacifique et durable.

Références :

- Airbus. (15 décembre 2000). These pods could provide a blueprint for future hydrogen aircraft | Airbus. Airbus. <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2020-12-these-pods-could-provide-a-blueprint-for-future-hydrogen-aircraft>
- Airbus. (2018). Airbus. Airbus. <https://www.airbus.com/en/asset-preview/90031>
- Airbus. (9 décembre 2021). How to store liquid hydrogen for zero-emission flight. Airbus. <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2021-12-how-to-store-liquid-hydrogen-for-zero-emission-flight>
- Airbus. (22 février 2022). The ZEROE demonstrator has arrived | Airbus. Airbus. <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2022-02-the-zeroe-demonstrator-has-arrived>
- Airbus. (19 juillet 2022). Could an open fan engine cut carbon emissions for more sustainable aviation? | Airbus. Airbus. <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2022-07-could-an-open-fan-engine-cut-carbon-emissions-for-more-sustainable>
- M. B. Carter, P. R. Shea, J. D. Flamm, M. J. Schuh, K. James, M. R. Sexton, D. Tompkins et M. Beyar (2016). Experimental Evaluation of Inlet Distortion on an Ejector Powered Hybrid Wing Body at Take-off and Landing Conditions (Invited). In 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting (Vol. 1–O). American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Catena-X. (s.d.). Catena-X. Catena-X Automative Network. <https://catena-x.net/en/>
- Clean Aviation. (s.d.-a). Clean Aviation. Clean Aviation. <https://www.clean-aviation.eu/>
- Clean Aviation. (s.d.-b). Strategic Research and Innovation Agenda (SRIA) | Clean Aviation. Clean Aviation. <https://www.clean-aviation.eu стратегический-исследование-and-innovation-agenda-sria>
- Y. Gibbs (6 novembre 2015). Parachute-Deployment Flight Termination System on X-48C. NASA. <http://www.nasa.gov/centers/dryden/multimedia/imagegallery/X-48C/ED13-0056-01.html>
- IATA. (2020). Liquid hydrogen as a potential low-carbon fuel for aviation. IATA.
- O. James (2020). Airbus dévoile Maveric, son premier démonstrateur d'aile volante. <https://www.usinenouvelle.com/editorial/video-airbus-devoile-maveric-son-premier-demonstrateur-d-aile-volante.N928459>
- G.-M. Jeon, J.-C. Park et S. Choi (2021). Multiphase-thermal simulation on BOG/BOR estimation due to phase change in cryogenic liquid storage tanks. Applied Thermal Engineering, 184, 116264.
- Les Echos. (11 février 2020). Airbus dévoile Maveric, son avion du futur moins gourmand en carburant. Les Echos. <https://www.lesechos.fr/industrie-services/air-defense/airbus-devoile-maveric-prototype-davion-moins-gourmand-en-carburants-1170856>
- G. Martin (16 avril 2013). Boeing X-48C Blended Wing Body research aircraft completes flight testing. DefenceWeb. <https://www.defenceweb.co.za/joint/science-a-defence-technology/boeing-x-48c-blended-wing-body-research-aircraft-completes-flight-testing/>
- D. R. Mulholland, L. W. Acker, H. H. Christenson et W. V. Gough (1957). Flight Investigation of a Liquid Hydrogen Fuel System (p. 59).
- H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. M. B. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem et B. Rama (Eds.). (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Rose, A. (s.d.). Corrosion Resistant Design Using Simcenter STAR-CCM+ to model electrochemical processes and guide material choice in aerospace and automotive systems. Corrdesa LLC. GA, USA.
- Y. Sakamoto, H. Kobayashi, Y. Naruo, Y. Takesaki, Y. Nakajima, K. Kabayama et T. Sato (2021). Investigation of boiling hydrogen flow characteristics under low-pressure conditions –Flow regime transition characteristics. International Journal of Hydrogen Energy, 46(11), 8239–8252.
- V. Sethi, X. Sun, D. Nalianda, A. Rolt, P. Holborn, C. Wijesinghe, C. Xisto, I. Jonsson, T. Gronstedt, J. Ingram, A. Lundbladh, A. Isikveren, I. Williamson, T. Harrison et A. Yenokyan (2022). Enabling Cryogenic Hydrogen-Based CO₂. IEEE Electrification Magazine, 10(2), 69–81.
- Siemens-SW-Paving-The-Way-Toward-Sustainable-Aviation-by-2050-WP-84880-rev3.docx. (s.d.). Retrieved October 17, 2022, from https://splm.sharepoint.com/:w/r/sites/STSMarketingPortal/_layouts/15/Doc.aspx?sourceDoc=%7B990154d7-ebf1-40b1-9c29-275a3bbc370%7D&action=edit&wdPId=c6fc941
- TUDelft. (s.d.-a). Flying-V. TU Delft. <https://www.tudelft.nl/lr/flying-v>
- TUDelft. (s.d.-b). The first Flying-V test flight. TUDelft. <https://www.tudelft.nl/en/stories/articles/the-first-flying-v-test-flight>
- Wikipedia. (2022). Energy density. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Energy_density&oldid=1111757604
- S. Y. Yoo et J.C. Duensing (2019). Computational Analysis of the External Aerodynamics of the Unpowered X-57 Mod-III Aircraft. AIAA Aviation 2019 Forum.
- Ростеха. (20 avril 2020). Ту-155: Начало криогенной авиации. Ростеха. <https://rostec.ru/news/tu-155-nachalo-kriogennoy-aviatsii/>

Siemens Digital Industries Software

Amériques : 1 800 498 5351

Europe, Moyen-Orient, Afrique : 00 800 70002222

Asie-Pacifique : 001 800 03061910

D'autres numéros de téléphone sont disponibles [ici](#).

À propos de Siemens Digital Industries Software

Siemens Digital Industries Software facilite la transformation numérique des entreprises intéressées par des solutions d'avenir en matière de conception, d'ingénierie et de fabrication. Siemens Xcelerator, le portefeuille complet et intégré de logiciels, de matériel et de services, aide les entreprises de toutes tailles à créer et à exploiter un jumeau numérique complet qui leur offre de nouvelles perspectives, opportunités et niveaux d'automatisation pour soutenir l'innovation. Pour en savoir plus sur les produits et les services de Siemens Digital Industries Software, visitez [siemens.com/software](#), ou suivez-nous sur [LinkedIn](#), [Twitter](#), [Facebook](#) ou [Instagram](#).

[siemens.com/software](#)

© 2022 Siemens. Pour consulter la liste des marques déposées de Siemens, cliquez sur [ce lien](#). Les autres marques déposées sont la propriété de leurs titulaires respectifs.

84880-D4-FR 2/23 LOC