



DIGITAL INDUSTRIES SOFTWARE

# Conception d'avions à hydrogène

Exploiter la puissance du jumeau numérique pour concevoir des avions écologiques

## Résumé

Ce livre blanc est consacré à la conception des avions à hydrogène. Il dresse la liste des défis auxquels sont confrontés les ingénieurs aéronautiques chargés de concevoir des avions plus écologiques. Il se penche sur l'utilisation des moteurs à réaction à hydrogène et de la technologie des piles à combustible à hydrogène dans le développement de systèmes de propulsion. Il traite également de leur impact sur les sous-systèmes.

Le logiciel Simcenter™ de Siemens Digital Industries Software soutient le développement des avions à hydrogène en s'appuyant sur la technologie des jumeaux numériques pour donner aux entreprises les moyens d'optimiser les performances des avions à l'aide de tests virtuels et physiques dans les domaines des fluides, de la thermique, de la mécanique ainsi que d'autres systèmes associés à l'aviation verte. Simcenter fait partie du portefeuille Xcelerator de Siemens, un portefeuille complet et intégré de logiciels, de matériel et de services.

# I Introduction

L'aviation est actuellement responsable de près de 5 % des émissions de gaz à effet de serre dans le monde<sup>1</sup>. C'est la raison pour laquelle adopter des systèmes de propulsion neutres en carbone est une priorité absolue pour les constructeurs d'avions. Aussi importante que soit cette transition aujourd'hui, le problème est aggravé par le fait qu'il y a actuellement environ 500 000 personnes dans les airs en permanence<sup>2</sup> et que l'on prévoit deux fois plus de voyageurs aériens en 2037 qu'aujourd'hui<sup>3</sup>.

En matière de transport aérien écologique, les ingénieurs en aéronautique sont confrontés aux exigences du marché et aux objectifs de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) relatifs aux émissions de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ). Ils ont pour mission de concevoir des avions nouvelle génération capables de se déplacer avec la puissance, la vitesse et l'autonomie des moteurs à réaction alimentés au kérosène, mais sans leur impact sur l'environnement.

## **La densité de puissance des moteurs à réaction au kérosène par rapport aux alternatives**

Pour se rendre compte de la complexité de la tâche à accomplir, il faut comprendre comment la densité de puissance des solutions d'énergie alternative utilisées pour propulser les avions nouvelle génération se positionne par rapport aux solutions actuelles.

Le kérosène standard qui alimente les turbines de la plupart des avions commerciaux et militaires modernes est connu sous le nom de Jet A. Le Jet A a une densité énergétique impressionnante d'environ 12 000 wattheures par kilogramme (Wh/kg), mais outre ses niveaux de bruit élevés, il présente un inconvénient : ses émissions de  $\text{CO}_2$  et de non- $\text{CO}_2$ .

L'utilisation de moteurs électriques est une approche beaucoup plus silencieuse et plus verte pour propulser les avions. Les batteries sont une solution envisageable pour alimenter ces moteurs, mais les batteries actuelles utilisées dans les prototypes d'avions n'ont qu'une densité d'énergie de 160 à 180 Wh/kg<sup>4</sup>. Cette densité d'énergie est loin d'être suffisante pour les avions de ligne long-courriers, mais elle suffit pour alimenter les petits avions utilisés pour les vols régionaux de courte distance. Par exemple, Bye Aerospace<sup>5</sup> est spécialiste de la conception et la fabrication d'avions électriques, et notamment d'avions légers pour la formation au pilotage. Bye Aerospace a deux projets d'avions électriques bien avancés dans le processus de certification des avions de la Federal Aviation Administration (FAA). L'un d'entre eux est l'avion d'entraînement biplace eFlyer 2.

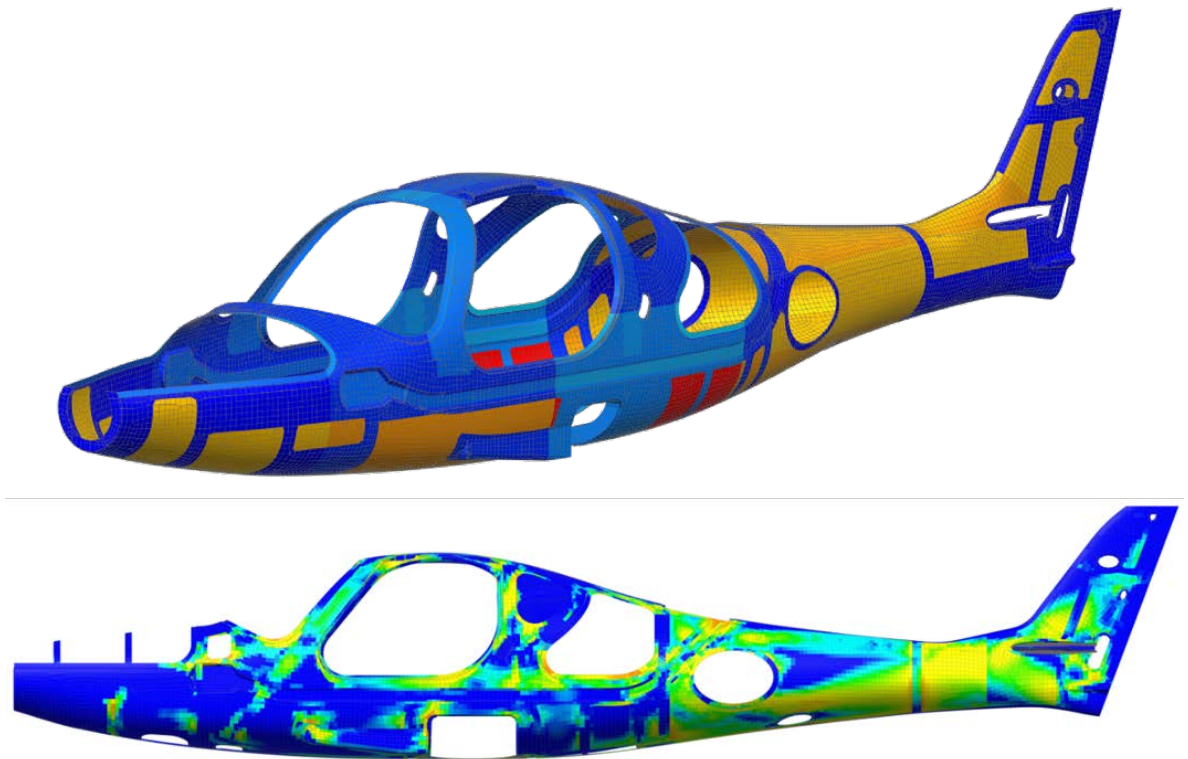


Schéma 1 : L'utilisation de Simcenter, NX et Fibersim a permis à Bye Aerospace d'améliorer sa productivité, tout en réduisant de 66 % le personnel d'ingénierie lors de la conception d'un avion entièrement électrique.

L'hydrogène est une autre option. Outre le fait qu'il s'agit du composant chimique le plus simple connu de l'homme, l'hydrogène offre la densité énergétique la plus élevée de tous les carburants : environ 33 500 Wh/kg. Cela signifie qu'il est trois fois plus puissant que le kérosène par unité de masse.

#### **Génération d'hydrogène et conversion en énergie utilisable**

Actuellement, il y a deux options envisageables pour développer des avions long-courriers neutres en carbone, en utilisant des sources d'énergie hydrogène. L'une consiste à utiliser des moteurs à réaction fonctionnant à l'hydrogène liquide et l'autre à employer des piles à combustible à hydrogène qui combinent l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'électricité pouvant être utilisée pour alimenter des moteurs électriques.

De nombreuses entreprises et organisations, dont Siemens<sup>6</sup> et Airbus<sup>7</sup>, étudient activement les technologies de l'hydrogène liquide et des piles à combustible à hydrogène en tant que solutions de rechange sans émission de carbone pour le transport aérien. Dans les deux cas, le principal sous-produit de l'utilisation de l'hydrogène comme source d'énergie est l'eau, qui est tout à fait écologique.

Même si l'hydrogène présente de nombreux avantages en tant que source d'énergie pour l'aviation, sa production est loin d'être facile. Bien qu'il soit abondant, il est presque toujours présent dans un autre composé tel que l'eau (H<sub>2</sub>O) ou le méthane (CH<sub>4</sub>), dont il doit être séparé.

Il existe plusieurs moyens de produire de l'hydrogène<sup>8</sup>, mais pour alimenter un avion durable, la méthode la plus pratique à ce jour est l'électrolyse. Lors de l'électrolyse, un courant électrique est utilisé pour séparer l'eau en hydrogène et en oxygène. Si l'électricité est produite par des sources renouvelables comme le solaire ou l'éolien, l'hydrogène qui en résulte est considéré comme renouvelable.

Une fois produit, l'hydrogène peut être stocké sous forme gazeuse ou liquide. Le stockage du gaz nécessite généralement des réservoirs à haute pression (350 à 700 bars), tandis que le stockage sous forme liquide exige des températures cryogéniques, car le point d'ébullition de l'hydrogène à une pression atmosphérique est de -252,8 Celsius (°C)<sup>9</sup>.

En raison des coûts associés à la production, au stockage et au transport de l'hydrogène, celui-ci est actuellement plus cher que les combustibles fossiles. Mais comparée à la complexité de sa production, l'utilisation de l'hydrogène pour générer de l'énergie est conceptuellement simple.

Les ingénieurs en aéronautique qui mettent au point des systèmes de propulsion durables à base d'hydrogène pour les avions ont trois options : des moteurs électriques alimentés par des piles à combustible, des turbines à gaz fonctionnant à l'hydrogène pur ou des systèmes hybrides associant piles à combustible et turbines à gaz fonctionnant à l'hydrogène. Dans le cas d'un moteur à réaction à hydrogène, qui est un type de moteur à combustion interne, l'air est aspiré à l'entrée, comprimé, mélangé à l'hydrogène et enflammé pour générer un flux à haute température.

Dans le cas d'une pile à combustible à hydrogène, l'hydrogène et l'oxygène passent respectivement par l'anode (borne positive) et la cathode (borne négative) de la pile. Un catalyseur est utilisé à l'anode pour séparer les molécules d'hydrogène en électrons et protons. Les protons traversent une membrane spéciale tandis que les électrons sont utilisés pour alimenter les moteurs électriques de l'avion et d'autres systèmes. Les protons, les électrons et l'oxygène sont ensuite recombinaés à la cathode où ils se transforment en molécules d'eau.

### Défis des avions à hydrogène

Le plus grand défi associé au développement d'un avion à hydrogène est qu'il s'agit d'un nouveau territoire pour la plupart des ingénieurs. La conception d'un brûleur pour une turbine à gaz à hydrogène, par exemple, nécessite des caractéristiques et des structures particulières. Il faut aussi tenir compte de la nature de l'hydrogène, qui brûle beaucoup plus vite et plus fort que le kérosène.

Par exemple, un brûleur à hydrogène doit être conçu pour éviter les retours de flamme, et les fréquences acoustiques générées par le brûleur et la turbine doivent être amorties pour minimiser l'interaction entre la flamme, le rotor, la chambre de combustion et la turbine.

Il est également nécessaire de comprendre la mécanique des fluides, ainsi que les contraintes qui se produisent aux conditions limites thermiques de ces systèmes de propulsion à hydrogène et électriques, y compris les phénomènes opérationnels qu'ils rencontrent tels que les retours de flamme, la thermoacoustique, les gradients thermiques et la fragilisation<sup>10, 11, 12, 13</sup>.

Autre défi : bien que l'hydrogène fournisse une densité énergétique trois fois supérieure à celle du kérosène par unité de masse, il faut quatre fois plus de volume que le kérosène pour obtenir le même résultat. Cela signifie que, indépendamment du fait que l'avion utilise des turbines à hydrogène ou des piles à hydrogène pour entraîner les moteurs électriques, il y a des ramifications majeures pour la cellule de l'avion. La capacité de chargement, le nombre de passagers ou les deux doivent être réduits pour permettre l'utilisation d'une source de carburant à l'hydrogène. Autrement, la configuration entière de l'avion doit s'écarter des modèles conventionnels.



Schéma 2 : L'espace accru dans le fuselage des avions à fuselage intégré peut être utilisé pour stocker des batteries et de l'hydrogène, ou de l'hydrogène et des piles à combustible, sans sacrifier la capacité en passagers ou en fret.

Le fuselage intégré (Blended Wing Body ou BWB) constitue une possibilité intéressante. Le concept d'avion d'Airbus ZEROe BWN<sup>14</sup> en est un exemple. Les ailes et le fuselage sont intégrés en une seule entité (Schéma 2). On appelle également cela une "aile volante" : l'ensemble de l'appareil fournit la portance nécessaire au vol. L'un des principaux avantages de la configuration en aile volante est l'espace accru du fuselage, qui peut être utilisé pour transporter des charges utiles telles que des marchandises, des passagers, des batteries, de l'hydrogène et des piles à combustible.

### Relever le défi

La création d'un avion à hydrogène neutre en carbone et capable de parcourir de longues distances est une tâche complexe, et les limitations de coût, de temps et de ressources signifient que le développement d'une série de prototypes physiques n'est plus une stratégie de conception viable. La solution consiste à utiliser des simulations multi-physiques pour étudier le comportement des systèmes de production d'énergie, des moteurs et de l'avion tout entier dans un monde virtuel.

Il s'agit d'une entreprise monumentale, car elle nécessite une convergence des domaines de conception et un effort coordonné entre toutes les disciplines d'ingénierie impliquées dans le développement des avions. Cela va au-delà des seuls systèmes de propulsion et inclut les domaines fluides, thermiques, mécaniques, dynamiques, acoustiques, etc. Les données techniques de ces systèmes interdépendants doivent être partagées entre les équipes de manière efficace afin que les concepteurs puissent continuer à travailler efficacement dans leur environnement de développement d'origine.

L'une des façons d'y parvenir est d'adopter les outils de numérisation disponibles dans le portefeuille Xcelerator de Siemens, un portefeuille complet et intégré de logiciels, de matériel et de services. Les solutions de simulation et de test Simcenter, qui font partie du portefeuille Xcelerator de Siemens, sont utilisées pour éliminer les cloisonnements entre les différentes disciplines impliquées dans la construction d'un avion à hydrogène. Elles fournissent une suite de conception intégrée, capable de soutenir pleinement les équipes pluridisciplinaires d'ingénierie aéronautique, en les aidant à modéliser, analyser et tester l'impact des sources d'énergie et des systèmes de propulsion alternatifs.

En d'autres termes, elles permettent la création d'un jumeau numérique basé sur la physique (Schéma 3).

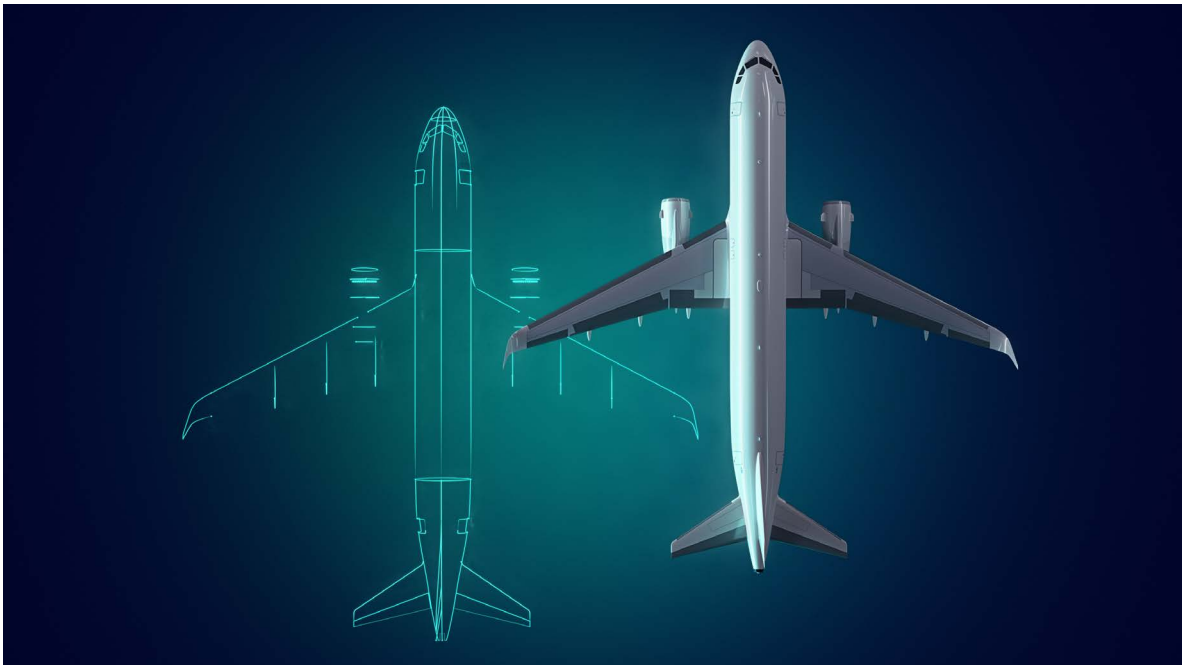


Schéma 3 : Grâce à Simcenter, les ingénieurs peuvent créer un jumeau numérique pour prédire avec précision les performances de l'avion, optimiser les conceptions et innover plus rapidement et en toute confiance.

Dans l'environnement Simcenter, les capacités de modélisation de la simulation de systèmes permettent d'évaluer les architectures des moteurs, les turbines à gaz, le stockage du carburant, les piles à combustible, les batteries et d'autres composants, ainsi que leur poids (Schéma 4).

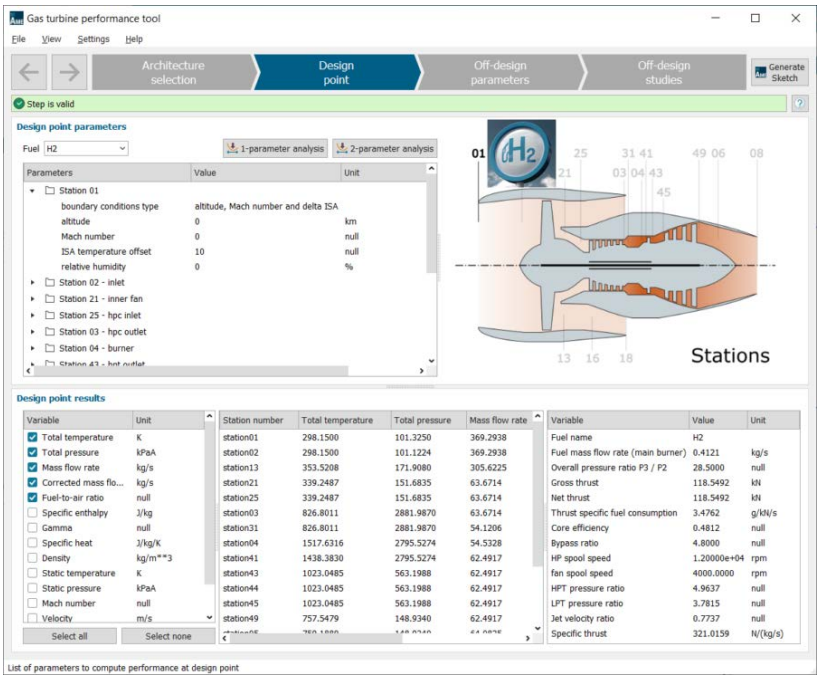


Schéma 4 : Le modèle Simcenter Amesim permet aux ingénieurs d'évaluer le cycle thermodynamique du turboréacteur à double flux alimenté à l'hydrogène.

Les ingénieurs peuvent ensuite exploiter en parallèle les simulations 3D des domaines fluides, thermiques et mécaniques, ainsi que les capacités de conception assistée par ordinateur (CAO) pour concevoir chacun des sous-systèmes.

Qu'il s'agisse de l'agitation des combustibles cryogéniques, de la combustion de l'hydrogène, de la mesure de la température à l'entrée de la turbine, des performances de durabilité ou de la réponse dynamique du système, diverses données physiques avancées sont fournies dans des modèles Simcenter robustes et validés (Schéma 5). Le processus de conception est ensuite exécuté dans le cadre de flux de travail automatisés et d'explorations de l'espace de conception afin de prendre en compte les intérêts conflictuels de diverses disciplines. Les composants tels que le brûleur et les aubes, les assemblages, le moteur, les différents sous-systèmes et finalement l'avion entier peuvent être conçus en utilisant une approche similaire pour répondre à différents objectifs de conception.

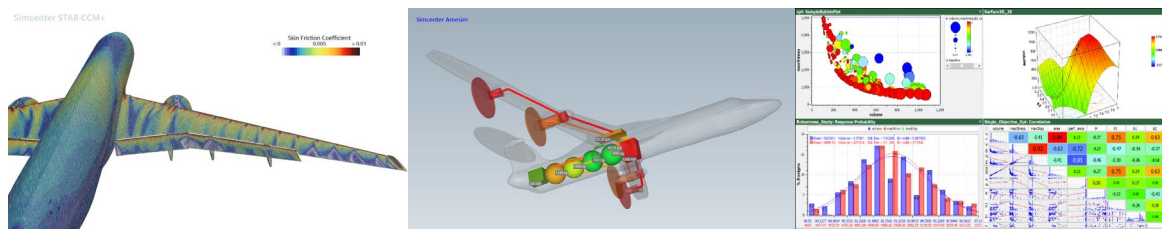


Schéma 5 : Ce rendu d'exploration de conception multi-domaine d'un système de propulsion hybride cryogénique à combustion H<sub>2</sub> a été généré à l'aide des outils logiciels Simcenter 3D, Simcenter STAR-CCM+, Simcenter Amesim et HEEDS pour représenter avec précision l'aéroélasticité de la conception.

Les modèles Simcenter, y compris ceux qui sont co-développés avec les partenaires de Siemens, sont générés et exécutés de façon fidèle à la réalité, pour permettre aux entreprises aéronautiques de concevoir et de livrer des systèmes réels (Schéma 6). Les résultats de Simcenter peuvent être combinés avec le portefeuille Xcelerator de Siemens pour tenir compte de la fabricabilité des composants et des systèmes.

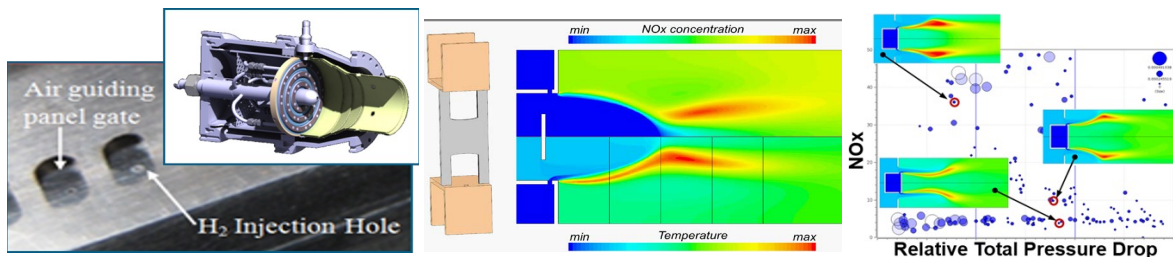


Schéma 6 : Cette exploration de la conception multi-physique d'un brûleur Micromix H<sub>2</sub> utilise NX CAD, Simcenter STAR-CCM+ et Simcenter 3D, pilotés par l'outil d'optimisation automatisé HEEDS. (Source : B&B AGEMA, RWTH Aachen et Kawasaki)

## Conclusion

Des entreprises comme Siemens Energy<sup>17</sup>, Rolls-Royce<sup>18</sup> et Airbus<sup>19</sup> procèdent actuellement à des évaluations approfondies et, dans certains cas, créent des concepts et des prototypes d'avions à hydrogène et à hydrogène hybride.

Toutefois, il est important de comprendre que l'abandon des combustibles fossiles implique de mettre à jour bien plus que l'avion. Ces activités ne sont que le début d'un effort qui s'étendra sur plusieurs décennies et qui consistera à repenser la configuration des avions et à s'intéresser aux chaînes d'approvisionnement en matériaux, à la production d'énergie, aux réseaux de distribution et de logistique, aux systèmes de livraison de carburant dans les aéroports, etc. (Schéma 7).

Les capacités du portefeuille Xcelerator de Siemens et de la suite d'outils Simcenter visent à soutenir les efforts de numérisation qui seront nécessaires pour faire évoluer l'industrie aéronautique vers cet avenir durable.



Schéma 7 : Pour abandonner les combustibles fossiles, il est nécessaire de moderniser les réseaux de production d'énergie et de logistique, y compris les systèmes de livraison de carburant dans les aéroports.

### Références :

1. <https://bit.ly/3CxFPTC>
2. <https://www.spikeaerospace.com/how-many-passengers-are-flying-right-now/>
3. <https://www.bbc.com/future/article/20210401-the-worlds-first-commercial-hydrogen-plane>
4. <https://aerospaceamerica.aiaa.org/features/faith-in-batteries/>
5. <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/customers/bye-aerospace/78928/>
6. <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/renewable-energy/hydrogen-solutions.html>
7. <https://www.airbus.com/en/innovation/zero-emission/hydrogen>
8. [https://afdc.energy.gov/fuels/hydrogen\\_production.html](https://afdc.energy.gov/fuels/hydrogen_production.html)
9. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage-basics-0>
10. <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/customers/siemens-energy/93022/>
11. <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/customers/b-b-agema/98716/>
12. <https://webinars.sw.siemens.com/en-US/simulation-for-digital-testing-with-bb-agema/>

13. <https://webinars.sw.siemens.com/en-US/aerospace-defense-aircraft-propulsion-system-simulation>
14. <https://www.airbus.com/en/innovation/zero-emission/hydrogen/zeroe>
15. <https://www.siemens.com/global/en/products/xcelerator.html>
16. <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/simcenter/>
17. <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/renewable-energy/hydrogen-solutions.html>
18. <https://www.airbus.com/en/innovation/zero-emission/hydrogen>
19. <https://www.rolls-royce.com/innovation/net-zero/decarbonising-complex-critical-systems/hydrogen.aspx>

## Siemens Digital Industries Software

Amériques : +33 1 71 22 54 62

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](https://siemens.com/software), ou suivez-nous sur [LinkedIn](#), [Twitter](#), [Facebook](#) ou [Instagram](#).

[siemens.com/software](https://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.

85068-D3-FR 2/23 LOC