

USAIRE STUDENT AWARDS 2025

-

Comment améliorer l'attractivité du secteur aérospatial durant les prochaines décennies ?



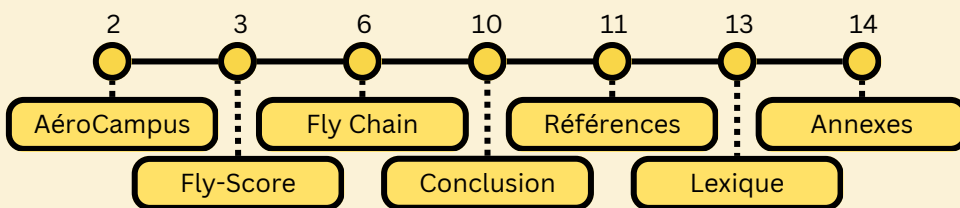
FLYSCORE

FLY CHAIN

Les piliers d'une aviation durable et innovante

1 | 13

Sommaire



Introduction

Le secteur aéronautique et spatial, pilier stratégique de la mobilité mondiale et de l'innovation technologique, se trouve aujourd'hui à la croisée des chemins. Malgré ses avancées, il souffre encore de lacunes : un manque de clarté sur ses **performances environnementales**, des difficultés persistantes à **attirer et former les talents de demain**, et une gestion des données **fragmentée** reposant sur des systèmes encore **vulnérables**. Ces insuffisances freinent l'atteinte des objectifs climatiques, limitent l'attractivité du secteur auprès des jeunes générations et ralentissent l'efficacité opérationnelle de la filière.

Chiffres clés

- 30 % des postes d'ingénieurs aéronautiques en France n'ont pas été pourvus en 2023. [1]
- 2,5 % des émissions mondiales de CO₂ proviennent du transport aérien. [2]
- 7 700 pièces aéronautiques suspectées d'être non conformes ou falsifiées en 2024, certaines intégrées aux appareils en service. [3]

Pour y remédier, nous avons imaginé trois solutions complémentaires :

➔ **Aérocampus** : un réseau mondial de formation intégrant réalité virtuelle, intelligence artificielle et doubles diplômes technologiques, afin d'attirer, former et fidéliser une nouvelle génération de professionnels

➔ **Fly-Score** [4] : un indicateur environnemental unique et transparent, inspiré du Nutri-Score, qui évalue les vols sur plusieurs critères (pas seulement le CO₂) pour offrir aux passagers, compagnies et décideurs un langage commun pour la transition écologique

➔ **Fly Chain** : une blockchain aéronautique sécurisée et interopérable, pour assurer la traçabilité des données, faciliter la certification numérique et optimiser les échanges dans la supply chain

Nous voyons ces trois projets comme les piliers d'une **même vision** : préparer une aviation plus durable, plus inclusive et plus innovante d'ici 2040.

Note méthodologique

Nos propositions ne sont pas le fruit du hasard, mais le résultat d'une réflexion orientée par un double objectif : apporter des solutions concrètes aux enjeux identifiés, tout en démontrant leur faisabilité par des prototypes fonctionnels.

A B C D E

Pour le **Fly-Score**, nous avons choisi de développer une **application**. Ce format permet de tester en conditions réelles notre **système de notation**, de simuler **différents scénarios** (type d'aéronef, carburant utilisé, conditions de vol) et de rendre immédiatement visibles les écarts de **performance environnementale**. L'application répond ainsi à deux besoins : valider notre méthodologie de calcul et offrir un outil pédagogique capable de sensibiliser passagers, compagnies et régulateurs



Pour **Fly Chain**, nous avons développé une **blockchain** de ce nom, ainsi qu'un **site web** permettant de l'exploiter. L'objectif est de rendre tangible la notion de **traçabilité**, en permettant à l'utilisateur de créer un « **jumeau numérique** » d'un avion ou d'une pièce, d'**enregistrer** des opérations, et de **consulter** leur historique. Plutôt qu'un schéma théorique, cette approche démontre concrètement comment la blockchain peut fluidifier les échanges, sécuriser les données et améliorer la confiance entre acteurs de la filière.

Nous avons privilégié ces approches visuelles et interactives car elles permettent de présenter des concepts complexes de manière claire, tout en constituant une base technique exploitable pour un déploiement ultérieur à grande échelle.

« La blockchain [...] a un rôle important à jouer dans l'engagement du secteur aéronautique à atteindre la neutralité carbone d'ici 2050. » [5]

Todd Siena, CEO de Block Aero Technologies

Aérocampus : Former, Inspirer et Fidéliser les talents

2 | 13

Un secteur en manque de talents

L'aéronautique est un secteur passionnant et en constante évolution. Cependant, il fait face à un vrai **défi** : attirer assez de jeunes talents et leur donner les compétences adaptées aux besoins d'aujourd'hui et de demain. Aujourd'hui, les formations spécialisées s'appuient sur des partenariats solides, tels que l'ISAE-Supaero avec Safran, ou les programmes développés par **Airbus**, **Boeing** et **Dassault**.



Ces initiatives restent **fragmentées**, **inégalement accessibles** et souvent centrées sur des **approches traditionnelles**. Pour relever les défis des prochaines décennies, il faut **élargir la base de talents**, **moderniser les méthodes d'enseignement** et créer un véritable **écosystème mondial de formation**.

Former le futur : Aérocampus

Dans le cadre de cette étude, nous avons imaginé **Aérocampus**, un réseau mondial regroupant un réseau d'universités et écoles spécialisées.

Notre solution

L'objectif est de créer un environnement d'**apprentissage sans frontières**, où les compétences sont **reconnues** et **transférables** à l'échelle internationale. Ce campus virtuel permettrait d'harmoniser les standards de formation, de faciliter les échanges entre établissements et de renforcer l'intégration avec l'industrie. Cela permet de préparer une nouvelle génération de professionnels capables de relever les défis technologiques et environnementaux de l'aéronautique.



Pour dépasser les limites des approches théoriques traditionnelles, **Aérocampus** intégrerait la **réalité virtuelle** dans ses programmes. Grâce à des simulateurs immersifs, les étudiants pourraient **concevoir**, **assembler** et **entretenir** des aéronefs dans un environnement virtuel réaliste, sans contrainte matérielle ni logistique. Les futurs

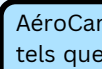
ingénieurs pourraient ainsi réaliser des diagnostics moteurs, simuler des opérations de maintenance ou tester de nouvelles configurations aérodynamiques comme s'ils étaient dans un hangar ou en vol.



Aérocampus proposerait des **MOOCs** sur edX ou Coursera, alliant quiz, études de cas et projets pratiques. Chaque module validé (4 à 8 semaines) délivrerait un badge numérique **Aérocampus Certified** valorisable sur LinkedIn. Les modules seraient conçus de manière collaborative :

- Les entreprises partenaires proposeraient des cas pratiques et des contenus liés à leurs besoins industriels.
- Les enseignants et chercheurs apporteraient la dimension académique, théorique et méthodologique.
- Des experts pourraient compléter l'offre sur des sujets émergents comme la blockchain ou l'IA.

Création de cours MOOCs



Aérocampus créerait des doubles diplômes en IA appliquée à différents domaines, tels que la maintenance prédictive, cybersécurité avionique et systèmes hydrogène, via des programmes intégrés sur 5 ans entre écoles spécialisées. Chaque diplôme serait co-certifié par les établissements et les industriels partenaires.

Doubles diplômes technologiques inter-écoles



La plateforme **Aérocampus Internships** serait lancée, regroupant toutes les offres réservées au réseau, inspirée du modèle Airbus Graduate Program, avec un quota annuel garanti par les industriels partenaires. Des bourses financées par le programme favoriseraient la mobilité internationale des étudiants.

Réseau mondial de stages et alternances

Signature des accords avec Airbus, Safran, Boeing, premières universités partenaires

Conception et publication des 5 premiers MOOCs

2025

Développement **Aérocampus Internships**

Lancement premier double diplôme (IA & Maintenance prédictive)

2027-28

Extension du réseau (30 universités & 6 industriels)

Ajout de 3 nouveaux doubles diplômes et 10 MOOCs

Mise en ligne d'une base de données pour les stages

2032-33

Mondialisation du réseau (50 universités & 10 industriels)

Certifications **Aérocampus Certified** mondialement reconnues

Intégration **Aérocampus Internships** dans tous les cursus partenaires

2040

Projet Aérocampus - Timeline

Le Fly-Score : une métrique innovante pour une aviation durable

3 | 13

Un secteur clé, mais polluant

L'aviation est un pilier de la mondialisation, reliant les économies et les cultures. Cependant, cette mobilité a un **coût environnemental** considérable qui ne cesse de croître. Selon les dernières études, le secteur aérien représente environ **2.5 %** des émissions mondiales de CO₂, que l'on peut comparer aux émissions annuelles d'un pays comme l'Allemagne. Lorsque nous prenons en compte l'ensemble des effets climatiques, y compris les traînées de condensation et les émissions d'oxydes d'azotes (NOx), l'impact global de l'aviation atteint près de **3.8 %** du forçage radiatif anthropique [6].

Malgré ces constats alarmants, le trafic aérien continue sa progression avec une croissance annuelle oscillant entre **3 et 5 %** [7]. Les projections de l'IATA anticipent un doublement du nombre de passager d'ici 2035 [8]. Cette expansion fulgurante, si elle n'est pas accompagnée de mesures visant à la freiner, fera décoller l'impact environnemental du secteur, **compromettant** ainsi les objectifs internationaux de lutte contre le **changement climatique**.

Les lacunes des outils d'évaluation existants

Les solutions actuelles pour mesurer l'empreinte environnementale de l'aviation présentent des **limites** évidentes. Les calculateurs d'émissions proposés par les compagnies aériennes se concentrent presque **exclusivement** sur le CO₂. Cette approche ne prend pas en compte les effets "Non-CO₂" comme les émissions de NOx ou encore les traînées de condensation. Pourtant, selon le GIEC, ces effets représentent environ deux tiers du forçage radiatif total de l'aviation et peuvent multiplier par deux à quatre fois l'impact climatique selon l'EASA [9] [10].

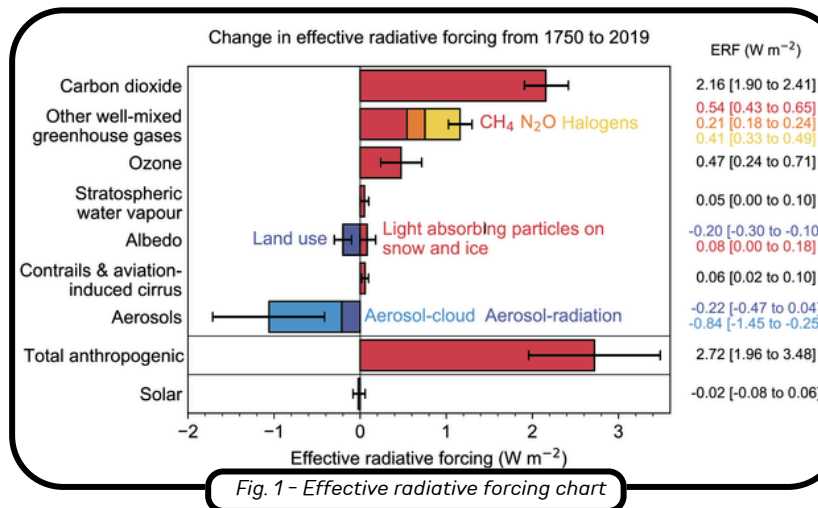
À cela s'ajoute l'ignorance quasi-totale d'autres **impacts environnementaux** documentés comme le **bruit** qui a été reconnu par l'OMS comme facteur de risque cardiovasculaire [11], ou les **émissions de particules fines** issues de la combustion du kérosène qui sont nocives pour la santé respiratoire. [12]

Le problème est amplifié par **l'absence de standardisation** dans le secteur : chaque secteur applique sa propre méthodologie, ce qui empêche toute comparaison fiable entre compagnies [13].

La difficulté d'accessibilité des données environnementales

Au-delà des limites méthodologiques, le secteur aérien souffre d'un **déficit structurel de transparence**. Les données précises sur la performance environnementale des appareils et des compagnies sont rarement publiées et, lorsqu'elles le sont, restent souvent **fragmentaires, non comparables**, ou soumises à des **clauses de confidentialité**.

Ce manque de transparence concerne autant le grand public que les régulateurs : même l'OACI reconnaît que l'accès aux données exhaustives est **limité**, ce qui complique l'évaluation des politiques environnementales. En l'absence d'harmonisation, il est impossible pour les passagers, les investisseurs ou les décideurs politiques de comparer **objectivement** les performances environnementales des différents acteurs du secteur. Cette situation freine également l'adoption de mesures incitatives ou réglementaires efficaces.



Notre solution

FLYSCORE

Face à ces lacunes, il devient urgent de disposer d'un outil d'évaluation **complet et standardisé**. Cet outil doit intégrer l'ensemble des dimensions environnementales du transport aérien : émissions de CO₂ et de polluants atmosphériques, nuisances sonores, et utilisation de carburants alternatifs comme le SAF. Mais pour être efficace, un tel instrument doit être **accessible et compréhensible** pour l'ensemble des parties prenantes.

Au-delà du suivi, il doit servir de **levier stratégique**, en orientant les choix technologiques et opérationnels vers une aviation alignée avec les objectifs climatiques internationaux. C'est précisément l'ambition du **Fly-Score** : proposer un **indicateur global, transparent** et scientifiquement **fiable**, capable de rendre compte de la performance environnementale réelle de chaque vol et de stimuler une concurrence vertueuse dans le secteur.

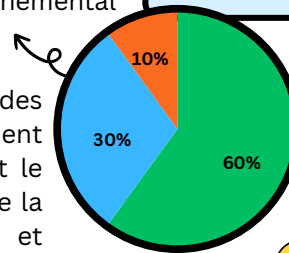
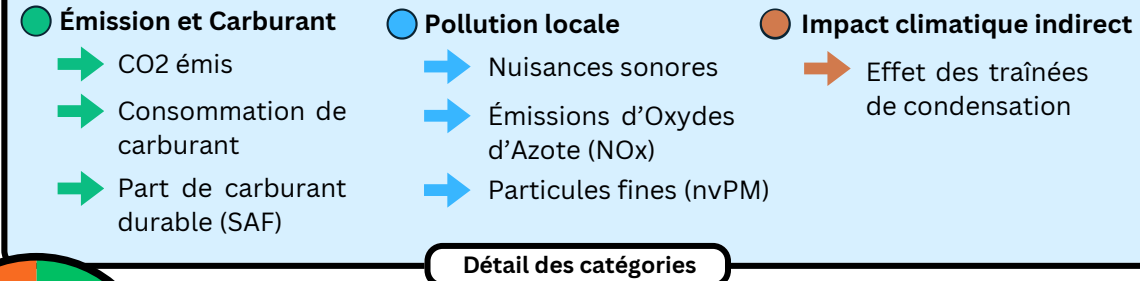
Qu'est-ce que le Fly-Score ?

Le Fly-Score est une **note environnementale** simple (de A à E) à l'image du Nutri-Score. Son objectif est de rendre l'information accessible aux voyageurs, compagnies aériennes et régulateurs pour encourager une aviation plus durable.

Comment fonctionne le Fly-Score ?

Le score repose sur **sept critères** clés, définis à partir de travaux scientifiques et de recommandations d'organismes internationaux (ICAO, IATA, NASA, DGAC). Ces critères couvrent trois dimensions (**Émissions et carburant**, **Pollution locale**, et **Impact climatique indirect**) pour évaluer précisément l'impact environnemental d'un vol.

La pondération attribuée à chaque catégorie reflète l'importance relative des impacts mesurés. Les émissions et la consommation de carburant dominent avec **60%** du score car le **CO2** issu de la combustion de kérosène est le principal contributeur climatique et l'efficacité énergétique en détermine la réduction. La pollution locale (**30%**) regroupe **NOx**, **particules fines** et **nuisances sonores** qui ont des effets sanitaires avérés. Quant aux impacts climatiques indirects, nous leur avons attribué un poids de **10%** car, bien que leur **effet radiatif** puisse dépasser celui du CO2 à court terme, leur durée de vie est bien plus brève, ce qui justifie une pondération inférieure dans un indicateur global. De plus, leur évaluation reste incertaine : les traînées de condensation peuvent à la fois accentuer l'effet de serre ou, au contraire, réfléchir une partie du rayonnement solaire, rendant leur impact global difficile à prédire avec précision.



Comment est calculé le Fly-Score ?

Le calcul du Fly-Score suit un processus en trois étapes :

1 Normalisation

Pour chaque indicateur, nous nous intéressons à la valeur donnée. Lorsqu'elle est meilleure que la moyenne, la valeur est normalisée relativement à la moyenne et les meilleures performances du secteur. Si la valeur est pire que la moyenne, la normalisation se fait par rapport aux pires performances possible. On obtient ainsi une note de 0 à 100, afin de garantir la compatibilité entre avions et vols.

2 Pondération

Chaque note est ensuite multipliée par un coefficient reflétant l'importance de ce critère dans l'impact environnemental global.

3 Comparaison

Le score final est confronté à une base de données de 500 vols similaires, permettant de situer la performance relative de celui-ci (*exemple* : "Ce vol est plus performant que 85% des vols de sa catégorie"). À noter que, faute d'accès gratuit à des bases de données réelles, cette base a été générée de façon aléatoire dans des intervalles réalistes.

Notre solution

Le **Fly-Score** est un outil innovant au service de la **transition écologique** du transport aérien. Il propose une analyse environnementale complète par le biais d'un indicateur unique, clair et **compréhensible par tous** : une lettre de **A à E** associée à un code couleur.

En intégrant **sept critères** qui couvrent les principaux impacts environnementaux, il dépasse les limites des calculateurs actuels centrés seulement sur le CO2. Grâce à sa méthodologie **rigoureuse** et **transparente**, le **Fly-Score** établit un langage commun entre passagers, compagnies et régulateurs, rendant l'impact environnemental des vols **visibles, comparable**, et **actionnable**.

Le Fly-Score : une méthode innovante pour une aviation durable

5 | 13

Cas pratique : Comparaison de deux avions - l'A350 et le Douglas DC-10

Pour illustrer concrètement l'utilité du **Fly-Score**, nous avons développé une **application interactive** permettant de calculer et comparer l'impact environnemental des vols en temps réel. Afin d'illustrer son fonctionnement, nous avons choisi la comparaison de deux avions - l'**A350** et le **Douglas DC-10** - comme cas pratique. Cette analyse compare deux configurations : un **appareil moderne** utilisant du carburant d'aviation durable et un **avion plus ancien** fonctionnant exclusivement au kérosène fossile.

Cas 1 : Airbus A350

Type de Vol : Long-courrier
Consommation de carburant (L/100 pax-km) : 2,5
Émissions CO₂ (g/pax-km) : 80
Niveau de bruit (dB) : 82
Émissions NO_x (g/kg de carburant) : 11
Carburant durable (SAF, %) : 40
Particules fines (g/kg de carburant) : 0.02
Traînées de condensation (W/m²) : 0.08

VS

Cas 2 : McDonnell Douglas DC-10

Type de Vol : Long-courrier
Consommation de carburant (L/100 pax-km) : 5,1
Émissions CO₂ (g/pax-km) : 75
Niveau de bruit (dB) : 86
Émissions NO_x (g/kg de carburant) : 8
Carburant durable (SAF, %) : 0.1
Particules fines (g/kg de carburant) : 0.045
Traînées de condensation (W/m²) : 0.18

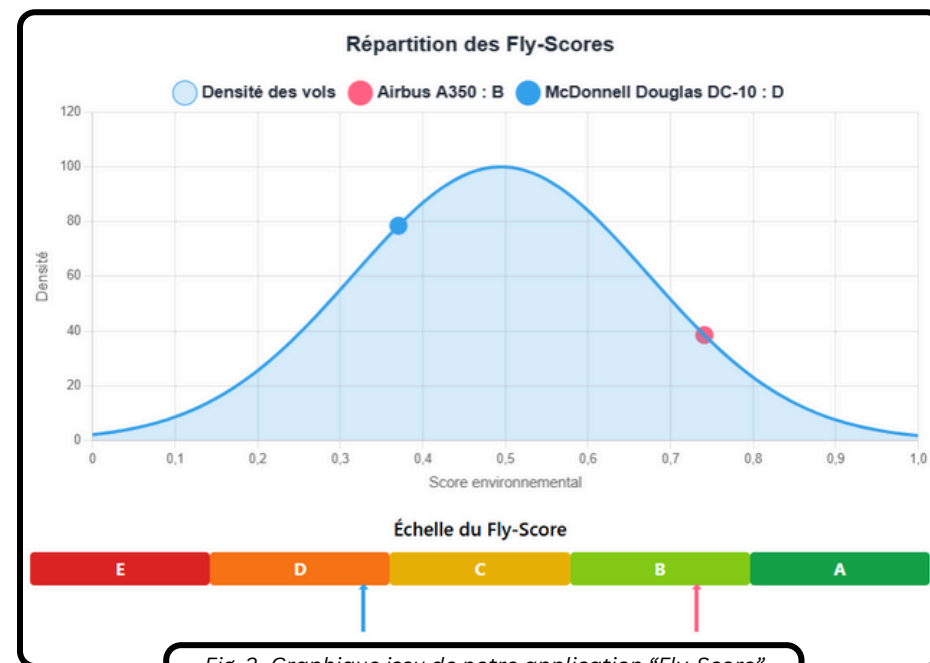


Fig. 2 - Graphique issu de notre application "Fly-Score"



Note méthodologique

Les données présentées dans ce rapport proviennent d'un **prototype** élaboré en **trois mois**. En l'absence d'accès aux API professionnelles, nous nous sommes appuyés sur des bases publiques et avons calculé à titre d'exemple. L'objectif à ce stade est de **démontrer** la méthodologie et le **potentiel** du **Fly-Score** et non de fournir des valeurs certifiées.

Note finale

Cet exemple démontre l'efficacité du **Fly-Score** : en un coup d'œil, il met en lumière l'écart environnemental entre deux vols comparables, révélant l'impact concret des choix technologiques et énergétiques. Là où les chiffres bruts peuvent perdre le lecteur, le Fly-Score **synthétise** l'information en un indicateur **unique, clair et universel**, rendant les comparaisons immédiates et actionnables. Cette capacité à transformer une analyse complexe en un outil **simple et fiable** en fait un levier puissant pour accélérer la transition vers **une aviation plus durable**.

Voir, Comprendre, Agir - C'est toute la promesse du Fly-Score.

Fly Chain : Transformer l'aéronautique par la blockchain

6 | 13

Une gestion des données actuellement fragmentée

Dans l'aéronautique, la fiabilité, la traçabilité et la sécurité des données sont essentielles. Pourtant, le secteur repose encore sur une **multitude de systèmes numériques propriétaires**, souvent fermés et peu interopérables. Cette fragmentation complique les échanges entre constructeurs, compagnies aériennes, fournisseurs, autorités de régulation et acteurs du MRO. Elle entraîne des **coûts supplémentaires**, des **retards logistiques** et un risque accru de **non-conformité**. Les audits sont ralentis par le manque de visibilité en temps réel, tandis que les documents papier ou PDF restent largement utilisés et vulnérables à la **falsification**. En parallèle, la digitalisation croissante expose le secteur à des **cyberattaques** de plus en plus fréquentes, ciblant notamment les systèmes de maintenance, les documents techniques et les outils de gestion de flotte.

Dans ce contexte, la **blockchain** offre une solution technologique robuste et décentralisée. Le marché mondial de la blockchain liée à l'aviation était estimé à environ **687 millions de dollars en 2023** et devrait être multiplié par près de cinq d'ici le début des années 2030 [14]. Elle permet de garantir l'intégrité des données, de fluidifier les échanges, d'automatiser certains contrôles et de renforcer la traçabilité documentaire. La suite de cet article détaillera les éléments clés pour concevoir une blockchain adaptée aux besoins aéronautiques et **corriger les limites actuelles**. Vous pourrez ensuite découvrir notre solution Fly Chain, utilisable via notre site web.

Comprendre le fonctionnement d'une blockchain

La blockchain est une technologie de stockage et de transmission d'informations, **transparente, sécurisée**, et fonctionnant **sans organe central de contrôle** [15]. Elle permet d'enregistrer des transactions ou événements dans des **blocs** liés entre eux de façon chronologique et immuable. Contrairement à une base de données traditionnelle centralisée, la blockchain est répliquée sur un ensemble de **nœuds (ordinateurs)** du réseau, ce qui garantit sa résilience et sa transparence. Concrètement, chaque bloc contient trois éléments fondamentaux :

- 
- ➔ Un **horodatage** précis
 - ➔ Un ensemble de **données ou transactions** (opération de maintenance, émission d'un certificat, transfert d'une pièce)
 - ➔ Son **hash** cryptographique et celui du bloc précédent, agissant comme une **empreinte unique liant les blocs**. Toute modification ultérieure des données change le hash, rendant l'altération immédiatement détectable par le réseau.

La sécurité de la blockchain repose principalement sur des **algorithmes cryptographiques**. Les transactions sont souvent validées par un mécanisme de consensus, c'est-à-dire une méthode pour faire accepter une transaction à l'ensemble du réseau. Le mécanisme **PBFT** (Practical Byzantine Fault Tolerance) est généralement utilisé dans les **blockchains privées** (type de blockchain le plus pertinent pour notre usage, pour un contrôle strict des participants et de leur droits

Qu'est-ce qu'un algorithme cryptographique ?

C'est une **méthode mathématique** permettant de transformer les données en empreintes uniques. Trois mécanismes principaux assurent la sécurité d'une blockchain :

- Le **chiffrement** de données, afin de garantir la confidentialité
- Le **hachage** de données, afin de garantir leur intégrité
- La **signature** des données, afin de garantir leur authenticité

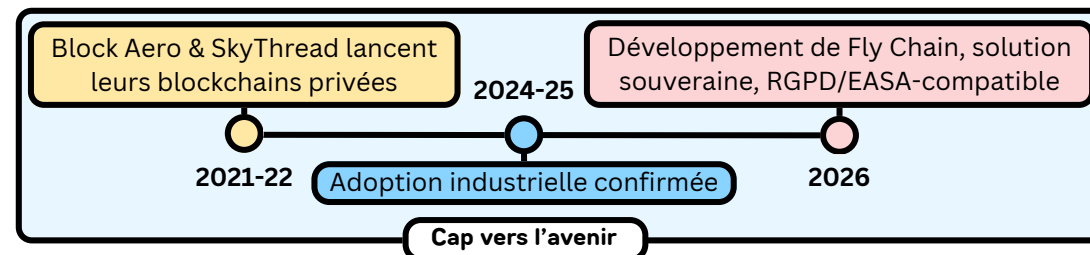
d'accès). Il permet à un réseau de se mettre d'accord de façon fiable, en partant du principe qu'au minimum 2/3 des participants au réseau sont honnêtes, rendant cet algorithme très utilisé à un niveau industriel (IBM Blockchain, Hyperledger Fabric, Quorum sont parmi les infrastructures les plus utilisées avec PBFT). Nous choisirons préférentiellement cet algorithme car il demande une **faible consommation énergétique** (réduction de plus de 99 % en comparaison du Proof of Work, utilisé par Bitcoin [16]).

Dans une blockchain publique, n'importe qui peut **participer au réseau** et **lire l'historique des transactions**. À l'inverse, les blockchains privées (plus pertinentes ici) restreignent l'accès à un ensemble d'acteurs préalablement identifiés. Ces modèles permettent de mieux **contrôler les droits d'écriture, lecture, et validation**, tout en conservant les avantages d'une architecture distribuée et sécurisée.

Notre solution

FLY CHAIN

- Infrastructure technique : **Hyperledger Fabric** retenu pour sa modularité, sa gestion des permissions octroyant de nombreuses options et son intégration naturelle avec **PBFT**.
- Données chiffrées en **AES-256** (norme internationale particulièrement rapide)
- Bloc hashés en **SHA-3** (très bon rapport vitesse/sécurité)
- Données signées en **EdDSA** (signatures légères et adaptées à l'aéronautique)



Fly Chain : Transformer l'aéronautique par la blockchain

7 | 13

Des bases de données traditionnelles centralisées

⚠ La majorité des acteurs utilisent encore des systèmes de gestion de maintenance assistée par ordinateur (**GMAO**) basés sur des bases de données relationnelles classiques (MySQL, Oracle, SQL Server). Ces systèmes gardent les **données centralisées**, sans réelle interopérabilité, et les échanges — souvent via formats rigides ou PDF envoyés par email — entraînent des délais et un risque accru d'erreurs humaines. La **chaîne d'information peut également être compromise**, passant par de nombreuses installations différentes.

Il apparaît essentiel de créer une blockchain décentralisée, permettant aux acteurs de communiquer **directement entre eux**. Cela élimine le besoin d'intermédiaire et simplifie la transmission d'informations, selon un modèle **pair-à-pair** (P2P). Dans ce type d'architecture, chaque participant dispose d'une **copie** complète ou partielle du registre et peut échanger directement avec les autres, sans passer par un **serveur central**. Les données circulent ainsi de manière distribuée, chaque nœud jouant à la fois le rôle de client et de serveur. Ce fonctionnement renforce la résilience du réseau : même si un nœud rencontre un quelconque problème, les autres continuent de fonctionner et d'assurer la disponibilité des informations. Toutefois, dans ce modèle, la structure même de la

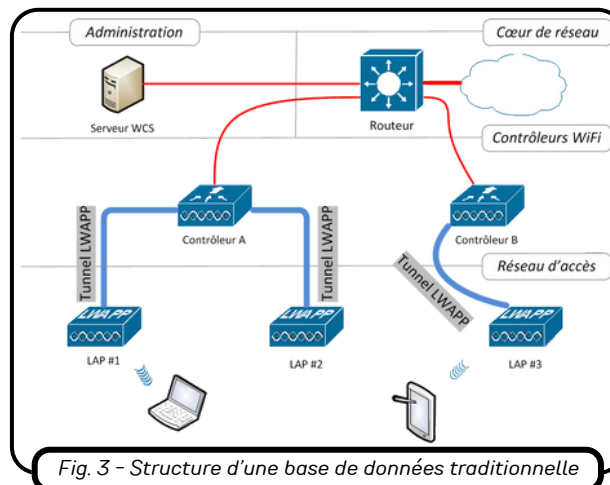


Fig. 3 - Structure d'une base de données traditionnelle

De plus, la transmission des certificats de navigabilité, comme le **Form 1 (EASA)** ou le **FAA 8130-3 [19]**, se fait encore très souvent sous format PDF scanné, avec des signatures manuscrites ou numériques qui ne garantissent pas l'authenticité ni l'origine de manière **inviolable [20]**. En cas de maintenance, de vente ou de transfert d'avion, la traçabilité documentaire devient un processus long, fastidieux et peu fiable.

Il est possible de **tokeniser** un **actif réel** (par exemple un composant aéronautique ou un appareil complet), en le liant à un **actif virtuel [21]**. Ensuite, l'actif est chiffré dans la blockchain, et seul un **acteur autorisé** sera en capacité d'ajouter un nouveau bloc modifiant le statut de cet actif (maintenance, pièce retirée, certification EASA délivrée...). Les informations sont ainsi **certifiées** !



Cas d'usage

Lorsqu'un **certificat est émis**, son empreinte numérique (hash) peut être inscrite sur la blockchain avec une signature cryptographique qui garantit **l'authenticité et l'origine**.

De cette manière, les échanges documentaires sont **instantanés, inviolables et vérifiables**. Tous les acteurs se réfèrent aux **même standards**, et les documents sont automatiquement vérifiés lorsque leur lien est ajouté sur la blockchain. Ces liens stockés via un **hash unique**, rendant toute falsification détectable immédiatement : Toute modification d'un document entraîne la génération d'un nouveau hash. Cela permet également à l'ensemble du réseau d'être certain de visionner le **document source**.

FLY CHAIN

Notre solution

- **Décentralisation** : Mises à jour **en temps réel**, visibles par tous les acteurs autorisés (doublons impossibles)
- Accès aux **données externes** par le biais d'**API** directement intégrées à la blockchain

Des standards d'échange peu intégrés et peu automatisés

⚠ Historiquement, l'industrie a tenté d'unifier les échanges avec des standards comme **SPEC2000 [17]** pour les transactions logistiques, ou **S1000D [18]** pour la documentation technique. Bien que ces standards soient utilisés par les grands acteurs, leur **complexité technique** et leur **manque d'automatisation** en temps réel limitent leur adoption chez les acteurs plus petits.

Notre solution

- **Tokenisation** de chaque actif réel via un **NFT** — Jeton **unique et infalsifiable**. Ainsi, toutes les informations liées à un actif sont mises à jour via ce "jumeau numérique".
- Stockage des fichiers PDF via **Clever Cloud**, un hébergeur français au chiffrement fort, conforme RGPD, et permettant une intégration simple avec les **API**.
- Utilisation de **smart contracts**. Permet de **valider automatiquement une opération** uniquement si tous les certificats requis sont bien enregistrés et valides.

À noter que Fly Chain n'a pas vocation à remplacer les normes actuelles, telles que l'ISO 9001, mais à les compléter. Les normes fixent le cadre qualité, tandis que Fly Chain assure la traçabilité et l'intégrité documentaire pour faciliter la conformité.

Fly Chain : Transformer l'aéronautique par la blockchain

8 | 13

Des difficultés de traçabilité

⚠ Le suivi complet d'une pièce aéronautique, de sa fabrication à son retrait du service, implique souvent plus de **5 à 7 intervenants** différents. Selon une étude de Sift, **63%** des organisations rencontrent des blocages liés à la traçabilité et la gestion des données [22].

La **capture des événements** tout au long du cycle de vie d'une pièce ou d'un appareil peut être **automatisée**. Chaque étape – fabrication, tests, transport, installation, opérations de maintenance, retrait – génère un enregistrement numérique enrichi d'informations contextuelles : horodatage précis, position GPS, identifiant de l'opérateur et paramètres techniques relevés par les capteurs.



➡ Historique **continu** pour une **vision complète** du parcours de chaque composant

➡ **Détection** des anomalies en **temps réel**

Notre solution

- **Horodatage** précis des opérations (via NTP ou GPS)
- Données collectées via des **dispositifs IoT** (RFID, NFC, capteurs environnementaux) ou des systèmes de **suivi industriel** (MES)
- Informations ensuite envoyées **directement** sur la blockchain

Une cybersécurité perfectible

⚠ Enfin, l'augmentation du volume de données échangées et la montée en puissance des solutions numériques exposent les acteurs à des risques accrus de **cyberattaques**. Le dernier rapport de Thalès (juin 2025) [23] sur la cybersécurité révèle une **augmentation de 600%** des cyberattaques dans le secteur aéronautique entre janvier 2024 et avril 2025. 71% de ces attaques impliquent la **vol** ou l'**accès non autorisé** à des **systèmes critiques** (dont notamment les plateformes MRO et la documentation).

On relève également d'important problèmes de **non-conformités de pièces**. En 2024, ce n'étaient pas moins de **7700 pièces** [24] qui étaient suspectées d'être non conformes ou falsifiées selon la base de données **Safety Information Bulletin (SIB)** de l'EASA, certaines ayant échappé à la détection lors de leur intégration à des appareils.

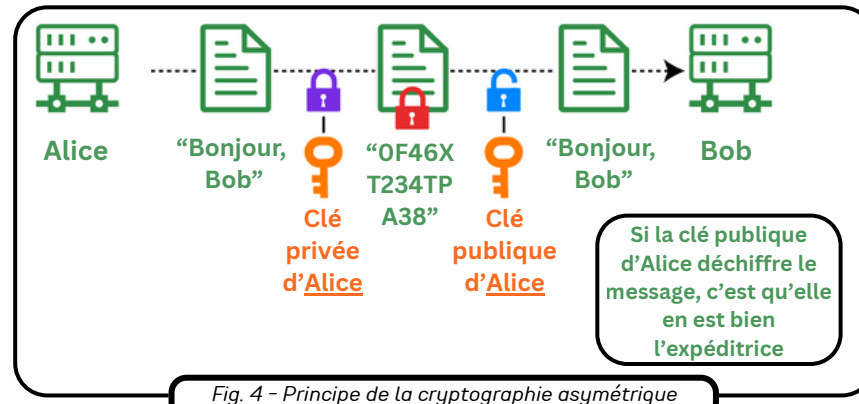


Fig. 4 - Principe de la cryptographie asymétrique

Cela permet de détecter immédiatement toute tentative d'introduction d'un élément frauduleux. Les données sont immuables une fois validées, ce qui empêche toutes manipulations sans qu'elles ne soient détectées. Les mécanismes de **consensus** et de **cryptographie** assurent que seuls les blocs valides et autorisés sont ajoutés au registre. Ainsi, toute tentative de piratage est soit bloquée, soit **immédiatement visible**.

L'architecture **décentralisée** de la blockchain réduit considérablement la surface d'attaque : il n'existe pas de serveur central unique à compromettre, et chaque nœud du réseau détient une copie vérifiée du registre.



➡ Chaque lot, composant ou certificat est lié à un identifiant unique et vérifiable, tandis que chaque acteur possède une **clé privée** qui lui est propre.

Cas d'usage

SITA et **ILS** ont déployé une solution blockchain de traçabilité des pièces aéronautiques. Les acheteurs du marketplace ILS peuvent consulter **l'origine, l'état et l'historique** complet des propriétaires d'une pièce avant de l'acquérir. Ce système garantit une chaîne de confiance entre fournisseurs, compagnies et autorités, améliorant ainsi la transparence.

Notre solution

- **Cryptographie asymétrique** : Chaque acteur possède une **clé privée** lui permettant de créer une **signature numérique**. Les autres membres du réseau vérifient ensuite cette signature à l'aide de leur **clé publique**.
- **Données croisées** avec les systèmes de contrôle qualité et les bases de référence réglementaires.

FLY CHAIN

Fly Chain : Transformer l'aéronautique par la blockchain

9 | 13

Une adoption croissante des cryptomonnaies



Enfin, que serait un article sur la blockchain sans évoquer les **cryptomonnaies** ? En Europe, le téléchargement d'applications de trading crypto a bondi de 94 % au premier trimestre 2024 [25], signe d'un engouement croissant qui pourrait bien trouver sa place dans le secteur aéronautique. En permettant l'**achat direct** de billets d'avion en cryptomonnaies, les compagnies aériennes pourraient toucher un public plus large, comme les voyageurs internationaux souhaitant éviter les frais de change et les délais bancaires.

De plus, l'utilisation de cryptomonnaies améliorerait l'expérience client en intégrant des **programmes de fidélité tokenisés**. Ces jetons, utilisables pour des services additionnels (bagages, surclassements, salons), offriraient plus de flexibilité que les points traditionnels.

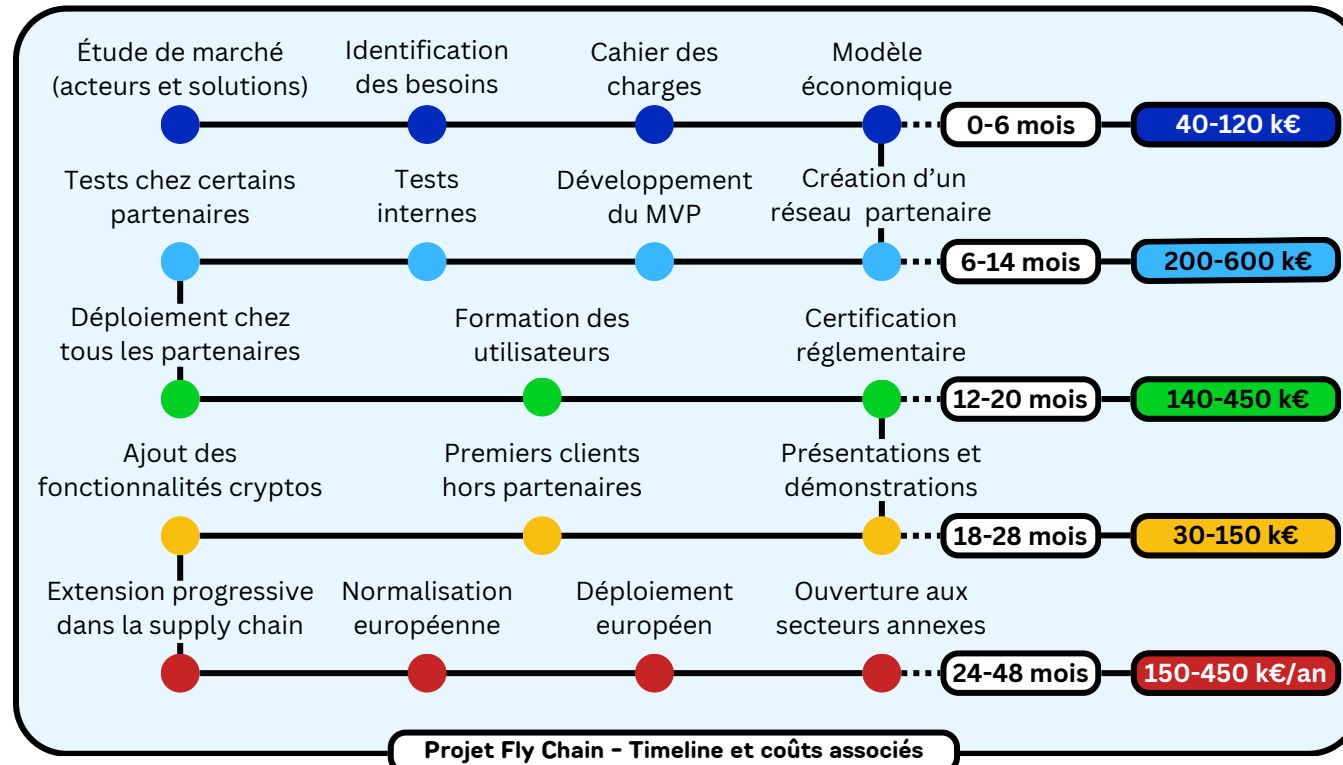
Depuis août 2023, Lufthansa propose une application mobile basée sur une blockchain permettant aux passagers de scanner leur billet pour obtenir des NFTs échangeables contre des avantages, avec déjà plus de 20 000 utilisateurs et 200 000 cartes émises [26].

FLY CHAIN

Notre solution

- Programme de **fidélité tokenisé** : création de **jetons ERC-20** ou équivalents, utilisables dans l'écosystème de la compagnie.
- **Conversion en temps réel** : conversion automatique cryptomonnaie vers monnaie fiduciaire pour limiter l'exposition à la volatilité.
- **Passerelle de paiement** : intégration d'un processeur compatible (BitPay, Coinbase Commerce) relié au système de réservation.

Fly Chain : Notre solution en 5 étapes



Note méthodologique

Les éléments présentés reposent sur une analyse documentaire et des hypothèses techniques réalistes (blockchain privée Hyperledger, consensus PBFT, intégration API...). En l'absence de développement complet et d'accès aux systèmes industriels, les durées et coûts sont estimés à partir de projets comparables (SITA, SkyThread, Block Aero). L'objectif est de démontrer la faisabilité technique, réglementaire et économique de Fly Chain et de proposer une feuille de route pour une adoption européenne d'ici 2028-29, puis son expansion dans les décennies suivantes.

Note finale

Nous avons débuté le développement de Fly Chain, qui ambitionne d'être la **première solution française** de blockchain dédiée à l'aéronautique.. À ce stade, il s'agit encore d'un prototype opérationnel : la blockchain est fonctionnelle et permet de **créer des copies digitales d'aéronefs et de leurs pièces**, ainsi que de **rechercher les modifications** effectuées sur ces éléments selon différents critères. Un **site web** [27] dédiée donne accès à ces fonctionnalités, permettant à l'utilisateur d'interagir directement avec la blockchain.

Tracer, Sécuriser, Partager les données – C'est toute la promesse de Fly Chain.

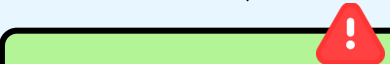
FLYSCORE

Le **Fly-Score** s'appuie sur un calcul multi-critère qui évalue l'impact environnemental d'un vol à partir de données reconnues par l'**ICAO**, l'**IATA**, la **NASA** et la **DGAC**. Chaque indicateur est noté sur 100 en le comparant à des valeurs de référence du secteur, puis pondéré selon son importance dans l'empreinte écologique globale.

Les données utilisées proviennent de **compagnies aériennes**, le **constructeurs** ainsi que d'**organismes publics**. Ainsi, elles peuvent être mises à jour régulièrement pour refléter les performances réelles.

Le processus est **simple** : les informations sur le vol sont collectées, vérifiées, normalisées, pondérées, puis transformées en un score final. Ce score peut ensuite être **affiché** sur des sites de réservation, dans des rapports, ou intégré à des comparateurs de vols.

Notre **objectif pour 2040** est le suivant : que **80%** des vols internationaux affichent leur **Fly-Score** au moment de la réservation, permettant ainsi de réduire les émissions de CO2 par siège de **10 à 15%** grâce à plus de transparence et à de meilleures décisions opérationnelles.



Pour rappel : nous avons développé le **Fly-Score** sous forme de **prototype** en seulement trois mois, en nous appuyant sur des données publiques. Sans accès aux API professionnelles, notre objectif n'était pas d'atteindre la précision maximale mais de **montrer** qu'un **indicateur unique** et **multi-critères** pour l'aviation est possible. Ce premier essai prouve déjà qu'on peut rendre l'impact environnemental des vols **clair, comparable** et **utile** pour agir.



Aérocampus vise à devenir une référence mondiale en termes de formation aéronautique en réunissant universités et écoles spécialisées autour d'un réseau **certifié** et **interopérable**. Sa structure repose sur **trois piliers** :



Des parcours académiques standardisés et internationaux avec des doubles diplômes intégrant l'IA, cybersécurité, et maintenance prédictive. Ces programmes seraient certifiés par les établissements et les partenaires industriels, garantissant leur reconnaissance mondiale.



Des outils pédagogiques immersifs tels que la réalité virtuelle permettant aux étudiants de concevoir, assembler et entretenir des avions dans des environnements simulés réalistes et sans contrainte matérielle.



Une plateforme mondiale de stages et d'alternances inspirée de l'Airbus Graduate Program, centralisant toutes les offres réservées au réseau et facilitant la mobilité internationale par le biais de bourses dédiées.

Notre **objectif pour 2040** est le suivant : **+50%** d'inscriptions dans les filières aéronautiques partenaires et un minimum de **30%** de présence féminine.

Aérocampus ne se contente pas de combler le manque de talents : Il prépare une génération de professionnels qui seront **opérationnels** dès leur arrivée sur le marché. Ce projet pose les bases d'une aviation plus **inclusive, compétitive** et **écologique** face aux défis des prochaines décennies.

FLY CHAIN

À son déploiement, **Fly Chain** se présente techniquement comme une **blockchain privée**, hébergée en France via **Clever Cloud**, utilisant le protocole **PBFT** sur **Hyperledger Fabric**.

Les blocs sont hachés en **SHA-3** et les données sensibles sont chiffrées en **AES-256**, avec signature EdDSA (**Ed25519**). Chaque pièce ou appareil possède une **empreinte numérique unique** (hash, numéro de série, référence constructeur, date de certification chiffrés). Notre réseau inclut **fournisseurs, compagnies aériennes, autorités réglementaires** et **centres de maintenance**, avec chacun des accès à certaines données spécifiques en fonction de leur besoin.

Les documents sont stockés et chiffrés hors chaîne sur **Clever Cloud** et référencés par un hash. Des **smart contracts** gèrent la certification, l'installation, les alertes de maintenance et les anomalies. Des **API** sécurisée permettent l'intégration avec **MES** et autres systèmes industriels. Chaque actif est tokenisé en **NFT**, et des dispositifs **IoT** (RFID, NFC, capteurs environnementaux) connectés aux MES assurent la collecte et la mise à jour automatique des cycles de vie.



Pour rappel : **Fly Chain** est actuellement une blockchain permettant d'**enregistrer** des éléments correspondant à des avions ou à leurs pièces, d'accéder à l'**historique** des opérations et d'effectuer des **recherches** ciblées dans ces données. À terme, notre ambition est de déployer cette solution à l'échelle européenne, afin de constituer une **infrastructure de référence** pour la traçabilité, la certification et l'échange sécurisé de données dans l'ensemble de la filière aéronautique.

En réunissant **Fly-Score**, **AéroCampus** et **Fly Chain**, nous proposons une solution globale où la conscience environnementale, la formation et la traçabilité de la chaîne aéronautique s'articulent pour répondre aux défis actuels de la filière. AéroCampus prépare tout d'abord les **talents de demain**. Puis, Fly Chain offre à ces personnes un cadre de travail dans lequel chaque pièce, chaque appareil et chaque donnée circulent de façon **sécurisée et transparente**, tout en permettant des **transactions simplifiées** entre tous les acteurs de la chaîne. Le Fly-Score se charge ensuite d'apporter des indicateurs clairs pour mesurer et améliorer l'**empreinte carbone** des avions. Ces trois piliers permettent ensemble d'améliorer l'attractivité du secteur aéronautique par leur complémentarité. Cela ouvre la voie à une aviation plus innovante, responsable et fiable dans les prochaines décennies.

“Plus que jamais, anticiper et se transformer devient, pour l'aviation [...], un enjeu de survie dans le monde bas carbone de demain”

- The Shift Project & Supaéro Décarbo [28]

- [1] : 20 % d'experts, <https://www.aerocontact.com/actualite-aeronautique-spatiale/81590-la-filiere-aeronautique-et-spatiale-recrute-30-d-ingenieurs-25-de-techniciens-et-20-d-experts>
- [2] : Our World in Data. Global aviation emissions, <https://ourworldindata.org/global-aviation-emissions>
- [3] : SasSofia. With over 7,700 suspect parts, EASA faces uphill battle to regulate the aviation supply chain, <https://sassofia.com/blog/with-over-7700-suspect-parts-easa-faces-uphill-battle-to-regulate-the-aviation-supply-chain>
- **[4] : Fly-Score. Application de calcul et de comparaison de l'impact écologique des avions, <https://fly-score.onrender.com>**
- [5] : IATA. Blockchain technology today, <https://airlines.iata.org/2023/05/22/sponsored-blockchain-technology-today>
- [6] : AirportWatch. The challenge of tackling the non-CO₂ impacts of aviation explained by Carbon Brief, <https://www.airportwatch.org.uk/2017/03/the-challenge-of-tackling-the-non-co2-impacts-of-aviation-explained-by-carbon-brief>
- [7] : Ministère de la Transition Écologique. Statistiques du trafic aérien, <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/statistiques-du-traffic-aerien>
- [8] : IATA. Global outlook for air transport – June 2025, <https://www.iata.org/en/publications/economics/reports/global-outlook-for-air-transport-june-2025>
- [9] : ScienceDirect. Contrail cirrus and their climate impact, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231020305689>
- [10] : EASA. Updated analysis of non-CO₂ climate impacts of aviation, https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/201119_report_com_ep_council_updated_analysis_non_co2_climate_impacts_aviation.pdf
- [11] : OMS Europe. How much does environmental noise affect our health? WHO updates methods to assess health risks, <https://www.who.int/europe/news/item/04-08-2024-how-much-does-environmental-noise-affect-our-health--who-updates-methods-to-assess-health-risks>
- [12] : EASA. Aviation environmental impacts, <https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/eaer/aviation-environmental-impacts>
- [13] : IATA. Beginner's guide to airline sustainability reporting, avril 2024, <https://www.iata.org/contentassets/77ec9a8c8a864daaa00bdb7f5de02902/beginners-guide-to-airline-sustainability-reporting-april2024.pdf>
- [14] : AATech. Blockchain in aviation – Transparency & efficiency 2025, <https://www.aatech.aero/blockchain-aviation-transparency-efficiency-2025/>
- [15] : CNIL. Définition : Blockchain, <https://www.cnil.fr/fr/definition/blockchain>
- [16] : GrillApp. Proof of Work vs Proof of Stake – Detailed comparison, <https://grillapp.net/28096/proof-of-work-vs-proof-of-stake-detailed-comparison-198341>
- [17] : ATA e-Business Program. Spec 2000, <https://ataebiz.org/spec-2000/>
- [18] : Aircraft IT. Early adaptors – S1000D, <https://www.aircraftit.com/articles/early-adaptors-s1000d/>
- [19] : HRD Aero Systems. What is an 8130 form?, <https://www.hrd-aerosystems.com/blog/what-is-an-8130-form/>
- [20] : Aviation Supply Chain Integrity. Recommended actions – Documents traceability verification, <https://aviationsupplychainintegrity.com/recommended-actions/documents-traceability-verification>
- [21] : Village de la Justice. Tokenisation des actifs du monde réel – Problématiques juridiques, <https://www.village-justice.com/articles/tokenisation-des-actifs-monde-reel-problematiques-juridiques,51325.html>
- [22] : PR Newswire. Report reveals data infrastructure becoming major bottleneck in aerospace development, <https://www.prnewswire.com/news-releases/report-reveals-data-infrastructure-becoming-major-bottleneck-in-aerospace-development-302310149.html>
- [23] : EASA. Cybersecurity, <https://www.easa.europa.eu/en/domains/cybersecurity>
- [24] : SasSofia. With over 7,700 suspect parts, EASA faces uphill battle to regulate the aviation supply chain, <https://sassofia.com/blog/with-over-7700-suspect-parts-easa-faces-uphill-battle-to-regulate-the-aviation-supply-chain/>
- [25] : TechRound. Cryptocurrency comeback in Europe, <https://techround.co.uk/cryptocurrency/cryptocurrency-comeback-europe>
- [26] : NFT Now. Lufthansa airline group introduces NFT loyalty program "Uptrip", <https://nftnow.com/news/lufthansa-airline-group-europe-introduces-nft-loyalty-program-uptrip-app>
- **[27] : Fly Chain. Plateforme blockchain aéronautique, <https://bit.ly/47tYUG1>**
- [28] : The Shift Project. Pouvoir voler en 2050 – Synthèse, février 2025, https://theshiftproject.org/app/uploads/2025/02/Pouvoir-voler-en-2050_Synthese.pdf

- **Figure 1** : Effective radiative forcing chart, https://www.researchgate.net/publication/391650070_Green_respiratory_healthcare_what_really_matters/figures?lo=1
- **Figure 2** : Graphique issu de notre application Fly-Score, <https://fly-score.onrender.com>
- **Figure 3** : Structure d'une base de données traditionnelle, https://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2009/reseaux_802.11_architecture_centralisee/archi_centra.html
- **Figure 4** : Principe de la cryptographie asymétrique, <https://www.geeksforgeeks.org/computer-networks/blockchain-private-key-cryptography/>

- **AES-256** : Algorithme de chiffrement symétrique utilisant une clé de 256 bits, considéré comme l'un des plus sûrs et utilisé pour protéger les données sensibles.
- **Algorithme cryptographique** : Suite d'instructions mathématiques servant à chiffrer, déchiffrer ou signer numériquement des données.
- **API (Application Programming Interface)** : Interface permettant à différentes applications ou systèmes de communiquer et d'échanger des données de manière structurée et sécurisée.
- **Bloc** : Unité de données dans une blockchain, contenant un ensemble de transactions ou d'enregistrements, reliée aux blocs précédents par un hash.
- **Blockchain** : Base de données distribuée et immuable, organisée en blocs liés entre eux, permettant d'enregistrer et de valider des informations sans autorité centrale.
 - **Blockchain privée** : accès et validation réservés à des participants autorisés.
 - **Blockchain publique** : ouverte à tous, validation décentralisée sans permission préalable.
- **Capteurs environnementaux** : Dispositifs mesurant des paramètres comme température, humidité, vibrations ou pression pour surveiller l'état d'un équipement.
- **Chiffrement** : Processus de transformation de données en un format illisible sans la clé adéquate, afin d'en garantir la confidentialité.
- **Clé privée** : Suite de caractères secrète utilisée par un acteur pour chiffrer ses données : Cela devient alors sa signature numérique. Peut également être utilisée pour déchiffrer des données ayant été chiffrée avec la clé publique de cette même personne. Doit rester confidentielle.
- **Clé publique** : Suite de caractères associée à une clé privée, utilisée dans trois cas précis : vérifier que la signature numérique est authentique, que les données n'ont pas été modifiées, et chiffrer des données destinées au détenteur de la clé privée.
- **Cryptographie asymétrique** : Méthode utilisant une paire de clés (publique et privée) pour le chiffrement, le déchiffrement et la signature numérique.
- **EdDSA (Ed25519)** : Algorithme de signature numérique basé sur des courbes elliptiques, offrant rapidité, sécurité et faible consommation de ressources.
- **ERC-20** : Standard technique de la blockchain Ethereum qui définit comment créer et gérer des jetons interchangeables. Dans un programme de fidélité tokenisé, ces jetons peuvent représenter des points, miles ou avantages, échangeables dans l'écosystème de la compagnie. Cela garantit leur compatibilité avec tout l'écosystème Ethereum (portefeuilles, échanges, smart contracts).
- **Hash / Hachage** : Fonction mathématique transformant des données en une empreinte unique et de longueur fixe, utilisée pour garantir l'intégrité.
- **IoT (Internet of Things)** : Réseau d'objets physiques connectés capables de collecter et d'échanger des données via Internet.
- **MES (Manufacturing Execution System)** : Système informatique qui contrôle et suit la production industrielle en temps réel.
- **MOOC (Massive Open Online Course)** : Formation en ligne ouverte à tous, souvent gratuite, accessible via Internet.
- **MVP (Minimum Viable Product)** : Version initiale d'un produit contenant les fonctionnalités essentielles pour valider un concept auprès des utilisateurs.
- **NFT (Non-Fungible Token)** : Jeton unique et non interchangeable enregistré sur blockchain, servant à prouver l'authenticité et la propriété d'un actif.
- **Noeud** : Ordinateur participant au réseau blockchain, stockant tout ou partie du registre et validant les transactions.
- **NTP (Network Time Protocol)** : Protocole synchronisant les horloges d'ordinateurs sur un réseau avec une référence horaire fiable.
- **PBFT (Practical Byzantine Fault Tolerance)** : Algorithme de consensus optimisé pour réseaux privés, tolérant jusqu'à 1/3 de nœuds malveillants, rapide et économe en énergie.
- **Proof of Origin** : Mécanisme attestant l'authenticité et la provenance exacte d'un bien ou document.
- **RFID (Radio Frequency Identification)** : Technologie utilisant des ondes radio pour identifier et suivre des objets via des puces électroniques.
- **SHA-3** : Algorithme de hachage cryptographique standardisé (Keccak), offrant une sécurité renforcée et pensé pour résister aux attaques futures (comme celles à venir avec l'informatique quantique).
- **Signature numérique** : Valeur calculée à partir d'un message et d'une clé privée, permettant de vérifier l'intégrité et l'authenticité des données.
- **Smart contract** : Programme autonome exécuté sur une blockchain, déclenchant automatiquement des actions lorsque des conditions prédéfinies sont remplies.
- **Tokenisation** : Conversion d'un actif physique ou numérique en jeton blockchain pour en faciliter l'échange et la gestion.