



# TRANSPORT DE MARCHANDISES

## LA RÉVOLUTION SE FAIT ATTENDRE

# SOMMAIRE

<b>SOMMAIRE</b>	<b>2</b>
<b>INTRODUCTION</b>	<b>3</b>
<b>QUELLES SOLUTIONS POUR DÉCARBONER LE TRANSPORT DE MARCHANDISES ?</b>	<b>4</b>
▪ <b>LE FRET ROUTIER OPÈRE UNE LENTE MUTATION</b>	<b>4</b>
▪ <b>NEOLINE VEUT DÉVELOPPER UN FRET MARITIME ZÉRO ÉMISSION</b>	<b>6</b>
▪ <b>AURA AERO, UN EXEMPLE DE DÉCARBONATION DU SECTEUR AÉRIEN</b>	<b>9</b>
▪ <b>LE FRET FERROVIAIRE NE DÉCOLLE PAS EN FRANCE</b>	<b>11</b>
<b>POUR ALLER PLUS LOIN</b>	<b>14</b>
▪ <b>L'ÉCOMOBILITÉ APPLIQUÉE AU SYSTÈME ROUTIER</b>	<b>14</b>
▪ <b>LES THÈSES DU MOIS : TRANSPORT DE MARCHANDISES, LA RÉVOLUTION SE FAIT ATTENDRE</b>	<b>15</b>
▪ <b>LES BATTERIES STRUCTURELLES POURRAIENT RÉVOLUTIONNER LE STOCKAGE DES VOITURES ÉLECTRIQUES</b>	<b>17</b>
▪ <b>ÉTUDIER L'IMPACT DE L'AJOUT DE BIOCARBURANTS DANS LES CARBURANTS CONVENTIONNELS</b>	<b>19</b>
▪ <b>AIRBUS DÉVOILE SES CONCEPTS D'AVION ZÉRO ÉMISSION À HYDROGÈNE</b>	<b>21</b>
▪ <b>« L'HYDROGÈNE DANS LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE » : UNE NOTE TECHNIQUE DE L'ADEME</b>	<b>22</b>

# INTRODUCTION

La transition écologique est un concept à la mode. Tous les secteurs d'activité sont, à différents degrés, impactés par les engagements nationaux et internationaux en faveur de l'environnement. Ces engagements prennent la plupart du temps la forme de promesses de baisses des émissions de carbone liées à l'activité en question.

Ainsi, le secteur des transports ne déroge pas à la règle. Qu'il soit routier, aérien, ferroviaire ou maritime, le transport de marchandises est concerné de près par la volonté de décarbonation. L'image du transport de marchandises auprès du grand public devenant déplorable, il est urgent de décarboner l'activité, pour la rendre plus attractive. La crise sanitaire ayant obligé beaucoup de particuliers à se faire livrer leurs produits, le secteur du transport de marchandises est paradoxalement honni par le grand public, tout en étant en forte croissance.

Alors comment décarboner ce secteur ? Tout d'abord, il s'agit de bien discerner les problématiques propres à chaque moyen de transport.

Pour ce qui est du routier, la problématique principale reste celle du transport de marchandises par les camions. Ce trafic augmente, et la marche arrière du gouvernement sur le fret ferroviaire, une promesse de campagne, n'est pas rassurante. Aujourd'hui, le trafic lié aux poids lourds est un problème majeur : en termes d'émissions de gaz à effet de serre, bien sûr, mais pas que. L'augmentation des poids lourds sur les routes françaises par exemple ne va pas sans poser des problèmes de circulation, sur les grands axes comme dans les villes. Les solutions existent, et sont actuellement développées par les constructeurs : carburants alternatifs, camions électrifiés, déplacement des volumes sur d'autres moyens de transports... Le problème est que le camion reste le moyen de transport le plus efficace pour ce que l'on appelle les premiers et les derniers kilomètres, c'est-à-dire pour des transports sur de courtes distances, où il est difficile d'imaginer des solutions alternatives.

# QUELLES SOLUTIONS POUR DÉCARBONER LE TRANSPORT DE MARCHANDISES ?

## LE FRET ROUTIER OPÈRE UNE LENTE MUTATION

*Le transport de marchandises par voie routière est extrêmement émetteur de CO2. Bien que des solutions émergent, il est aujourd'hui difficile de se passer des poids lourds, qui sont irremplaçables aux deux extrémités de la chaîne logistique.*

Le rapport de l'Etat sur l'environnement publié en 2019 indiquait que le [secteur des transports était responsable d'environ un tiers des émissions de gaz à effet de serre](#). Les poids lourds, au milieu de tout cela, généraient 22 % de la pollution totale due aux transports, soit 30 Mt eq CO2. Aussi, le transport routier est un secteur fortement émetteur d'oxydes d'azote, un autre gaz à effet de serre très puissant.

### **Le transport routier de marchandises, loin devant les autres**

Ces chiffres sont colossaux, alors que le parc de poids lourds français ne représente que 2 % en proportion du parc tricolore de véhicules routiers. Un dernier chiffre : si le transport routier de marchandises ne [représente que 6 % en distance parcourue du trafic routier total, il représente 80 % des marchandises transportées](#), toujours en 2019.

Ces chiffres ne sont pas voués à évoluer à la baisse. Le principal concurrent du camion, le train, coûte trop cher à mettre en place et les autorités françaises ont décidé de [ne pas faire du rail une priorité](#).

A partir de là, comment faire pour voir le transport routier réaliser sa propre transition énergétique, alors même que les habitudes des particuliers, dans le contexte actuel, vont vers toujours plus de commandes à distance, avec des délais de livraison toujours raccourcis ?

D'après le Forum International du Transport, le [volume des marchandises transportées dans le monde devrait tripler entre 2015 et 2050](#). Les engagements pris, au niveau

national et international pour faire baisser l'impact environnemental du secteur du fret routier sont d'autant plus ambitieux.

Ainsi, depuis la mise en place du [projet VECTO par l'Union Européenne en 2019](#), le renouvellement du parc de poids lourds doit répondre à deux contraintes fortes :

- un objectif de réduction des émissions de CO2 de 15 %, fixé pour 2025, en tant que réduction relative sur la base des émissions de CO2 moyennes des véhicules utilitaires lourds nouvellement immatriculés pendant la période allant du 1er juillet 2019 au 30 juin 2020 ;
- dès 2030, un objectif de réduction des émissions de CO2 fixé à - 30 %.

Un réexamen de ces dispositions est même prévu en 2022 pour potentiellement accélérer ce dispositif. Ensuite, le [Green Deal européen a vu la France s'engager sur une ambition de neutralité carbone à l'horizon 2040](#). Cette volonté s'accompagnera de l'interdiction de tous les véhicules fonctionnant grâce à des énergies fossiles. Plus près de nous, les collectivités locales ont déjà commencé à mettre en place une régulation contraignante concernant [l'accès des poids lourds dans leurs zones routières](#). Le but : favoriser un basculement progressif des flottes vers des motorisations à faibles émissions. L'entrée en vigueur de ces réglementations sera effective à Paris d'ici 2024.

[Les pistes pour améliorer le bilan carbone du fret routier](#) sont de trois ordres : l'optimisation des flux logistiques, les innovations technologiques sur les poids lourds, et le développement de nouveaux carburants.

Le secteur de la logistique est en pleine mutation. [Les innovations technologiques, le comportement des consommateurs et la structure des échanges vont considérablement évoluer dans les années qui viennent](#). Aussi l'[automatisation des flux](#), la généralisation de la RFID, la mise en place

de la robotique dans les entrepôts sont autant de solutions dont la généralisation participera à optimiser le transport global des marchandises, limitant ainsi le risque de voir des poids lourds circuler avec un chargement à moitié plein.

Les **innovations technologiques sur les poids lourds** vont de l'**automatisation** de la conduite au développement de matériaux plus légers, en passant par la **connectivité des véhicules**, entre eux et avec les plateformes logistiques. L'objectif, encore une fois, est d'optimiser les flux de marchandises et des poids lourds sur les routes, notamment en permettant aux camions de circuler les uns derrière les autres (**platooning**), ce qui permet d'économiser 10% de carburant en moyenne.

Enfin, le **développement de nouveaux carburants** est probablement la solution la moins complexe à mettre en place sur le court terme. Plusieurs carburants innovants sont développés : carburant 100% végétal, ED95 (biocarburant), biogaz... un **carburant à base d'eau** est même à l'essai aux Pays-Bas.

14/12/2021

# NEOLINE VEUT DÉVELOPPER UN FRET MARITIME ZÉRO ÉMISSION

*Neoline est une entreprise française, développée initialement par deux anciens de la marine marchande, Michel Péry et Jean Zanuttini. Ils développent des cargos à propulsion vélique.*

Michel Péry et Jean Zanuttini, anciens de la marine marchande, sont les co-fondateurs de Neoline. Convaincus que les enjeux climatiques vont devoir forcer les armateurs à développer de nouveaux types de propulsion plus neutres écologiquement, ils ont décidé de réfléchir à ces concepts de **navires de transport de marchandise** ayant comme source de propulsion principale le vent. C'est ainsi que l'entreprise Neoline est née. Si les premiers navires, qui vont bientôt entrer en construction, bénéficieront d'une assistance à la propulsion via un moteur diesel, la finalité de Neoline est bien de développer des bateaux zéro émission.

Jean Zanuttini, aujourd'hui président de **Neoline**, a expliqué à Techniques de l'Ingénieur les origines du projet Neoline, ainsi que les enjeux actuels autour du transport maritime, qui traversent une crise inédite depuis le début de la pandémie du Covid-19.

**Techniques de l'Ingénieur : Comment a démarré l'aventure Neoline ?**

**Jean Zanuttini :** La réflexion autour de ce qu'est aujourd'hui Neoline a débuté en 2011, impulsée par neuf personnes qui ont en commun une grande expérience dans le domaine de la marine marchande. C'est mon cas, puisque j'ai été marin de commerce, avant de migrer vers la conception, pour réaliser des études d'**aménagement portuaires** et d'ingénierie navale.

Ce qui nous a guidés dès le début, c'est la volonté de proposer une vision du navire du futur d'un point de vue prag-

matique, tout en étant ambitieux au niveau des objectifs de l'outil, à savoir : un outil qui s'inscrit dans un standard logistique ; un service de transport efficace ; réaliser des économies de carburant très importantes par rapport aux pratiques actuelles.

**Quels ont été les axes de travail pour développer des navires moins énergivores ?**

Avec un point de vue d'armateur, nous avons la possibilité de toucher à tous les leviers possibles, en premier lieu la vitesse. En abaissant la vitesse commerciale, on réduit d'ores et déjà substantiellement la consommation de carburant. C'est sur cet axe là que Neoline s'est développé, d'abord de manière associative.

A partir de 2015, nous avons créé la société Neoline et depuis fin 2016 je me consacre exclusivement à ce projet. Nous sommes donc depuis lors sur une dynamique de constitution d'équipe, de levées de fonds, et aujourd'hui nous nous apprêtons à passer à la phase de construction de notre premier navire.

Notre objectif reste de développer des services de transport qui sont à la fois industriels, compétitifs, tout en visant le zéro émission. Au niveau industriel, nous utilisons les structures portuaires classiques, il s'agit donc pour nous de pouvoir nous intégrer dans ce qui existe à l'heure actuelle. Nos cargos transportent des frets classiques et des containers.

Pour ce qui est du zéro émission, nous n'y sommes pas encore, mais cela reste le but à atteindre, et c'est une donnée qui guide le développement de nos projets de navires.

**Présentez-nous le premier navire que vous vous apprêtez à construire.**

Le premier concept que nous avons développé est le Neoliner 136 mètres, qui est un navire roulier, ayant une capa-

citée de 5500 tonnes et spécialisée dans le transport de frets hors gabarit. Cette dernière particularité lui offre une spécificité qui le distingue des navires classiques et lui donne une plus-value logistique propre.

Il sera équipé de 4200 mètres carrés de voile, avec un gréement voile souple. La surface vélique est considérable, surtout comparée aux autres projets qui existent dans le domaine. Étant donné que nous voulons faire de la voile notre mode de propulsion principal, nous sommes obligés de développer des surfaces véliques les plus grandes possible. Les navires seront également équipés de systèmes anti-dérive rétractables et rabattables, pour remonter au vent.

Pour nous, il y a un grand enjeu lié au tirant d'air [*hauteur maximale des superstructures ou mâts d'un bateau, au-dessus de la ligne de flottaison, NDLR*]. Il faut savoir qu'un des enjeux pour les navires comme le Neoliner 136 mètres est de pouvoir se rendre dans des ports plus petits, pour s'approcher au plus près des clients. Il faut donc que le navire soit en capacité de passer sous des ponts, ou d'évoluer dans des **zones à faible tirant d'eau par exemple** [*le tirant d'eau correspond à la distance verticale entre la ligne de flottaison d'un navire et le point le plus bas de la coque, NDLR*]. D'où le choix d'un gréement rabattable. Quand les mâts sont érigés, nous sommes à 67 mètres de tirant d'air, pour 41,5 mètres quand ils sont rabattus. Cela nous permet de passer sous les ponts quasiment partout.

En ce qui concerne le tirant d'eau, nous pouvons le réduire à 5,5 mètres pour l'entrée dans les ports, en relevant les systèmes anti-dérive. Cela nous donne une marge de manœuvre supplémentaire pour être en capacité d'entrer dans les ports plus petits.

La vitesse commerciale sur laquelle nous nous engageons est de 11 nœuds. C'est inférieur à ce qui se fait aujourd'hui sur les grandes lignes maritimes transatlantiques, mais cette vitesse nous permet d'aller chercher le vent, pour réduire autant que possible la consommation du navire.

Nous voulons pour le moment déployer deux navires sur

une ligne transatlantique nécessitant un mois de navigation (pour une rotation aller-retour complète). Nous visons donc un départ de chaque port toutes les deux semaines.

Ces navires disposent d'une motorisation auxiliaire, pour les manœuvres portuaires et le manque de vent, qui se produit surtout en été. Cette motorisation hybride est basée sur un moteur diesel avec du gazole, qui permet au navire d'atteindre une vitesse de 14 nœuds. Cette réserve de puissance constitue une assurance pour les marins et leur donne la possibilité d'aller chercher le vent au maximum : c'est tout l'intérêt du bateau.

### **Comment cela se traduit-il en termes d'économies de carburant ?**

L'économie de carburant sur laquelle nous tablons est de 80 à 90 %, en comparaison d'un navire conventionnel équivalent, et évoluant à une vitesse typique proche des 15 nœuds. Si on effectuait la comparaison avec un navire évoluant à la même vitesse, nous serions plus sur une économie de carburant de l'ordre de 70 %. Le vent apporte donc 70 % du besoin énergétique du navire.

Toute la réflexion autour de la taille des voiles se situe sur la proportion de propulsion vélique [*utilisation de l'énergie du vent, produite sur la voile, pour faire avancer le navire, NDLR*] que l'on veut pour son navire. Par exemple, les armateurs qui veulent équiper leurs navires existants d'une propulsion par le vent pour économiser du carburant vont pouvoir le faire, mais leur gain sera au maximum de l'ordre de 20% d'économies. Pour maximiser le rendement du bateau en termes de propulsion vélique, il est nécessaire que le bateau et son opération aient été pensés pour cela dès le départ. C'est aussi pour cela que nous avons fait le choix de nous engager sur une vitesse commerciale inférieure à ce qui existe aujourd'hui. Il s'agit d'être cohérent avec les caractéristiques des outils que nous développons et l'objectif de zéro émission que nous nous sommes fixés dès le départ.

### **Quelles sont les prochaines étapes pour Neoline ?**

Dans un premier temps, il est important de démontrer que développer des liaisons commerciales opérées par des

navires à propulsion vélique est possible. Notre choix de débiter par une liaison transatlantique par le nord, où le vent est relativement fort et constant toute l'année, doit nous permettre de montrer que notre ambition est une solution d'avenir. Se faisant, nous voulons montrer que le service que nous développons est fiable et constitue une réelle solution logistique.

### **La propulsion éolienne est-elle une solution pour les bateaux existants ?**

Oui bien sûr. Dans le domaine maritime, il existe une diversité immense en ce qui concerne les innovations autour de l'énergie éolienne. Étant tous rassemblés au sein des mêmes associations, nous nous connaissons bien. La plupart des innovations qui sont mises en œuvre à l'heure actuelle concernent des bateaux existants, ce qui est normal, vu le nombre de navires opérant à l'heure actuelle. Ce segment de marché est en forte progression et répond à un enjeu fondamental aujourd'hui, celui de la décarbonation de la flotte existante.

Ensuite, il y a toute une panoplie de projets développés par des armateurs, qui incluent dans le mix énergétique de leur bateau une propulsion vélique. C'est sur la quantité de propulsion vélique au sein du mix énergétique que va se faire une différence importante. Les navires construits avec une propulsion vélique auxiliaire gardent des caractéristiques de vitesse et de capacité élevées qui correspondent aux standards actuels. Les armateurs qui choisissent de faire du vent leur mode de propulsion principal sont obligés de se baser sur des standards de vitesse et de capacité inférieurs, de par la nature même du navire développé.

### **La décarbonation du transport maritime est-elle une priorité pour vos clients ?**

L'appétence sur le marché pour le type de service que nous développons est de plus en plus grande. C'est un phénomène intéressant, qui s'explique en partie par le contexte actuel. Aujourd'hui, le secteur du transport maritime rencontre de grandes difficultés, depuis le début de la crise sanitaire. Aussi, la situation sanitaire a obligé chacun à se faire livrer ses produits, et ces habitudes persistent. On est

aujourd'hui dans une situation d'explosion de la demande, avec des dérèglements dus à la crise sanitaire qui ne permettent pas de répondre correctement à cette demande. Par conséquent, les prix explosent, sans forcément de garantie sur les délais de livraison. La situation est donc très tendue.

La massification des transports maritimes est aujourd'hui extrême, et permet de proposer des services très efficaces. Mais on oublie les impacts du [dragage](#), de l'artificialisation des sols, des grues, des camions nécessaires pour gérer toute cette logistique... Notre proposition vient à contrecourant de cette tendance : nous développons des navires plus petits, plus lents, qui vont dans des ports plus locaux pour se rapprocher des clients et des usines.

### **Sur quels types d'offres serez-vous immédiatement concurrentiels ?**

Pour le moment, nous sommes concurrentiels sur les offres hors-conteneurs. Nous restons plus chers sur les conteneurs, même si les choses sont en train d'évoluer. Notre offre est indépendante des facteurs qui plombent aujourd'hui le secteur, et cette résilience est un argument de vente très efficace auprès des clients. Cette situation aujourd'hui contextuelle entre en résonance avec un enjeu plus large, celui des engagements environnementaux des entreprises qui examinent aujourd'hui scrupuleusement les solutions pour décarboner leur activité. C'est une évolution que nous ressentons fortement.

D'ailleurs, une coalition de chargeurs s'est mise en place, répondant au nom de France Supply Chain, avec l'objectif de publier un appel d'offres au début de l'année prochaine [pour que soit mis en place une ligne de transport transatlantique spécialisée sur les conteneurs et principalement propulsés par le vent](#). Cela illustre bien la tendance actuelle.

**Propos recueillis par Pierre Thouverez**

*Image de une ©Neoline*

13/12/2021



# AURA AERO, UN EXEMPLE DE DÉCARBONATION DU SECTEUR AÉRIEN

*Alors que le fret aérien subit de plein fouet la crise sanitaire, la nécessité de développer un transport aérien décarboné voit se multiplier les projets d'avions électriques. C'est le cas de l'entreprise Aura Aero, fondée en 2018. Entretien.*

Jérémy Caussade, Fabien Raison et Wilfried Dufaud ont créé [Aura Aero](#) en 2018 avec une ambition : produire un avion électrique pour le transport régional à motorisation hybride.

L'entreprise développe également des modèles d'avions plus petits, toujours avec l'ambition de produire des avions les plus neutres possible pour l'environnement, autant en termes de propulsion que de conception ([matériaux](#), recyclage...).

Jérémy Caussade, l'un des fondateurs d'Aura Aero, a expliqué à Techniques de l'Ingénieur la genèse de son entreprise, ainsi que l'importance de développer des avions décarbonés.

## **Techniques de l'Ingénieur : Quelle est la genèse de l'entreprise ?**

**Jérémy Caussade :** Nous avons fondé Aura Aero en 2018, après avoir constaté qu'un certain nombre de disruptions justifiait la création d'un constructeur d'avions « digital native », ceci dans le contexte de la décarbonation de l'aviation.

Notre objectif est de créer différents avions, chacun adapté aux différentes problématiques de l'aviation légère : aviation de loisir, de voltige, de formation ou transport régional... tout en œuvrant pour la mise en œuvre d'une aviation

plus verte. Aura Aero est une société hybride, basée sur une grande expertise de la technologie avion associée aux toutes dernières technologies digitales. Notre ambition est de créer une industrie aéronautique moderne, dotée d'une nouvelle approche, avec une prise de risque plus grande, mais surtout, avec la capacité d'aller plus vite.

## **Quels sont les différents prototypes développés ? Pour quels usages ?**

Nous proposons actuellement 2 familles d'avions : l'*INTEGRAL*, un avion biplace, dont le premier prototype vole actuellement, et qui est décliné en 3 versions, R (train classique), S (train tricycle), E (version électrique), et l'*ERA*, un avion de transport régional électrique de 19 places, qui fera son premier vol en 2024, et vise une mise service en 2027.

*INTEGRAL*, qui est actuellement en campagne d'essais en vol et devrait obtenir sa certification au premier trimestre de l'année prochaine, avec de premières livraisons dans la première moitié de l'année, offre des capacités complémentaires suivant les besoins des opérateurs, alliant hautes performances, sécurité optimisée, conception résolument tournée vers l'avenir et une efficacité opérationnelle jamais atteinte.

## **Quels sont les facteurs de différenciation de ce modèle sur le marché ?**

La maîtrise des coûts d'opération est un critère majeur qui a guidé le développement de cette nouvelle famille d'avions. La maintenance, par exemple, a été optimisée dès la conception, avec la présence d'une soute « systèmes », et la possibilité d'un changement moteur en moins d'une heure via un ensemble propulsif « plug and play ». L'accès aux organes vitaux de l'avion est immédiat pour permettre

un gain de temps lors des visites périodiques. Un système digital de suivi d'opérations aériennes et de maintenance dédié est également proposé aux clients. Ensuite, La sécurité est au cœur du design des appareils de la famille *INTEGRAL* : les aéronefs sont tous équipés d'un parachute balistique de cellule et de réservoirs anti-crash, ce qui est inédit pour cette gamme d'appareils. La préoccupation environnementale est également une composante-clé de cet avion, par l'utilisation du bois-carbone, un **matériau composite** qui permet d'allier légèreté, résistance et facilité de mise en œuvre et de réparation. Enfin, l'ergonomie est primordiale : le cockpit est le plus large de sa catégorie, le tableau de bord de nouvelle génération et les sièges ergonomiques permettent une utilisation maximisée de l'avion.

15/12/2021

#### **Et le second modèle ?**

Le second modèle, nommé *ERA*, pour *Electric Regional Aircraft*, est un avion de transport régional électrique de 19 places, qui vise à offrir des solutions de mobilité point à point, par exemple des vols Toulouse-Lyon. Il sera capable de parcourir jusqu'à 1 800 km, dont 400 km en tout électrique. Alimenté par des batteries au lithium, cet avion offrira de nombreux avantages tels que la diminution du bruit et une baisse du prix du billet.

L'idée est de décliner l'avion en version cargo dans le futur. Pour le moment, le premier vol de cet avion est prévu pour 2024, pour une entrée en service en 2027. A l'heure actuelle nous avons déjà enregistré 200 intentions de commandes pour ce modèle.

#### **Comment Aura Aero s'inscrit-il dans l'évolution à venir du transport aérien et de la transition énergétique ?**

Avec *INTEGRAL* et *ERA*, nous répondons aux enjeux du transport aérien décarboné. Que ce soit en termes de matériaux, de propulsion et de maintenance par exemple. Tout est mis en place pour réduire au maximum l'impact de nos avions.

#### **Propos recueillis par Pierre Thouverez**

Image de une : modèle Era ©AuraAero

# LE FRET FERROVIAIRE NE DÉCOLLE PAS EN FRANCE

*Alors que l'état français a réussi à développer un réseau ferré efficace pour le transport des personnes, il n'en est pas de même pour le transport de marchandises. Ce secteur, sous perfusion financière depuis des années, ne parvient pas à développer un modèle d'exploitation rentable.*

« La France a un potentiel ferroviaire de premier plan qui doit être sauvegardé et développé. C'est pourquoi pour la première fois tous les acteurs de la filière fret se sont mobilisés dans une alliance et travaillent main dans la main pour proposer un plan qui réponde aux grands enjeux environnementaux et sociétaux. » Cette phrase a été prononcée il y a à peine un an par Marc Tuffereau, coordinateur de 4F, l'alliance qui réunit les acteurs du fret ferroviaire en France. Créée en 2020, l'alliance 4F vise à redynamiser une filière en difficulté, et à s'adapter au contexte inédit depuis plus de deux ans. Le plan en question, adopté par le gouvernement, entend doubler la part du fret ferroviaire d'ici à 2030, avec trois objectifs :

- Trois fois plus de transport combiné rail route et 50 % de plus de transports de fret conventionnels ;
- Des trains longs (750 à 1 500 mètres) et lourds (jusqu'à 3 000 tonnes), transeuropéens et à haute productivité, sur des artères électrifiées et permettant le transport de semi-remorques ;
- Des plateformes territoriales pour alimenter les trains européens, avec la réappropriation de leur potentiel ferroviaire par les Régions, les métropoles et les territoires.

## Un secteur sous perfusion

Pour mener à bien ces missions, l'Etat a annoncé au mois de septembre dernier, par l'intermédiaire du Ministre des transports, Jean-Baptiste Djebbari, un plan de soutien pour le fret ferroviaire de 170 millions d'euros par an jusqu'en 2024. Le tout pour soutenir et relancer une filière sous-utilisée en France, malgré un réseau ferré très performant. Est-

ce que cette enveloppe suffira à relancer une filière nationale en difficulté depuis plusieurs décennies - en 1984, le transport de marchandises par voie ferroviaire assurait 30 % du trafic, contre 9 % en 2018, avant la crise sanitaire - et qui n'arrive pas à s'imposer, alors qu'elle a de nombreux atouts ? Ainsi, le transport de marchandises par train est beaucoup moins polluant que son équivalent routier. D'ailleurs, la volonté de développer un modèle de fret mixant ferroviaire et routier est encore aujourd'hui la volonté de l'Etat, et aussi celle des citoyens qui ont exprimé cet avis à l'occasion de la convention citoyenne sur le climat.

## L'objectif reste le transport combiné

Aujourd'hui, le fret ferroviaire ne représente que 9% du transport de marchandises en France. Il est pourtant neuf fois moins polluant que le fret routier, et six fois moins énergivore.

Alors pourquoi ? Les avantages écologiques de fret ferroviaires sont incontestables, l'Etat soutient la filière, et pourtant les lignes de fret continuent de fermer, comme la très symbolique ligne Perpignan-Rungis. Cette ligne historique, fermée car les trains circulaient à vide, a depuis repris son activité.

Le fret ferroviaire n'est pas compétitif économiquement aujourd'hui, et a absolument besoin des perfusions de l'Etat pour continuer son service : les convois de wagons ne sont pas assez longs, les wagons circulent parfois à vide, les incidents (pannes, arbre sur la voie, souci mécanique...) sont nombreux, qui plombent la compétitivité du secteur dans un secteur -la logistique- ultra concurrentiel. La volonté de l'Etat de développer les transport combinés, qui pourraient voir un conteneur être déchargé d'un navire pour être chargé sur un train, et in fine sur un camion implique que le fret ferroviaire puisse s'intégrer dans cette chaîne logistique sans la ralentir. Aujourd'hui ce n'est pas

le cas, alors même que l'Etat cherche désespérément des solutions pour diminuer le fret routier.

Selon les experts de l'alliance 4F, il faudrait 15 milliards d'euros pour réellement relancer la filière, et mettre en place, au niveau des infrastructures et du réseau, les solutions d'exploitation qui permettront de rattraper le retard français sur le fret ferroviaire, en termes de compétitivité.

Le prix par kilomètres du fret ferroviaire tricolore est 30% plus cher que chez nos voisins allemands. Concrètement, le réseau ferré français est exploité en premier lieu pour le transport de passagers. C'est cette dichotomie que l'Etat n'arrive pas à résoudre. Comment développer à la fois un service de transport de voyageurs et de marchandises sur un réseau commun en grande partie, et faire en sorte que ces deux services soient compétitifs ?

13/12/2021



## POUR ALLER PLUS LOIN

# L'ÉCOMOBILITÉ APPLIQUÉE AU SYSTÈME ROUTIER

*L'écomobilité est apparue avec les crises pétrolières. Elle conçoit, développe et met en oeuvre des modes de transport moins nuisibles à l'environnement. Elle est le plus souvent pratiquée en milieu urbain, où les difficultés de la circulation routière et la pollution atmosphérique y justifient la recherche systématique de déplacements alternatifs à l'automobile et aux véhicules lourds.*

Un extrait de « [Ecomobilité dans la transition énergétique](#) » par Jean-Louis LEGRAND

Du côté du système énergétique, l'électricité décarbonée est le point de passage obligé. Pour la produire, l'alternative se situe entre l'énergie nucléaire et les énergies dites renouvelables. S'agissant du stockage de l'énergie électrique dans des [batteries](#) électrochimiques, à 30 Wh par kg, pour atteindre 20 % d'éolien dans l'électricité, le calcul aboutit à deux tonnes de batteries par Français. Donc ce n'est envisagé que pour des sites isolés et des productions de faible importance. L'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique est une des pistes envisagées, car l'électrolyse est un procédé connu et maîtrisé qui permet d'utiliser le surplus d'énergie pour produire de l'hydrogène. Malheureusement, on introduit alors une chaîne d'opérations successives dont le rendement énergétique global est très faible. Reste le stockage hydraulique, qui consiste à remonter de l'eau dans un réservoir d'altitude. Mais, toujours pour atteindre les 20 %, le calcul aboutit à doubler la superficie des lacs de barrage et à multiplier par 5 le nombre des stations de pompage.

### Autopartage et services de transport personnalisé

L'[autopartage](#) grand public fait coexister deux modes : le mode traditionnel (prise et remise du véhicule dans une station et à une heure convenue) et le mode free floating (sans point d'attache fixe et en libre-service). Ce deuxième

mode va sans doute prédominer car il permet une économie des ressources engagées, tant sur le plan de la rotation des véhicules que des infrastructures nécessaires (parking et recharge), tout en augmentant la satisfaction des consommateurs. Dans le cas d'un véhicule mono-usage à tendance « servicielle », l'objectif est de faire mieux avec moins, en spécialisant les objets aux usages. Cette reconception aura des conséquences sur les véhicules standard, sur les modèles d'affaires de tous les véhicules, et sur le partage de la voirie en obligeant à reconsidérer les contraintes/rétributions (temps et/ou argent) associées aux différents modes.

Ces objets ne devront pas être regardés comme des automobiles mais comme des services de transport personnalisé (STP). Ils désignent à la fois des services de partage de la voiture (autopartage ou covoiturage) ou du vélo qui ne relèvent ni des modes individuels (marche à pied ou voiture particulière) ni des transports en commun réguliers (bus, tramway, métro, train). Ils se distinguent des premiers car ils sont organisés de manière collective par une [autorité ou une entreprise privée](#), et ne relèvent pas simplement d'une initiative individuelle. Ils diffèrent des seconds car ils apportent une réponse personnalisée aux besoins de mobilité, avec une variabilité du tracé et du parcours selon l'utilisateur.

Exclusif ! L'article complet dans les ressources documentaires en accès libre jusqu'au 31 décembre 2021 !

« [Ecomobilité dans la transition énergétique](#) » par Jean-Louis LEGRAND

16/12/2021

# LES THÈSES DU MOIS : TRANSPORT DE MARCHANDISES, LA RÉVOLUTION SE FAIT ATTENDRE

Pour vous accompagner et vous fournir une information toujours plus riche, Techniques de l'Ingénieur s'associe au Réseau National des Ecoles Doctorales - Sciences Pour l'Ingénieur (REDOC SPI). Chaque mois, notre partenaire sélectionne des thèses en lien avec notre dossier mensuel afin de vous permettre de creuser plus loin les thématiques développées dans le dossier.

Pour notre dossier de décembre, "Transport de marchandises : la révolution se fait attendre", voici les thèses sélectionnées par le REDOC SPI. Retrouvez le résumé de ces thèses ainsi que les thèses des mois précédents sur [le site de notre partenaire](#).

**Les transports face au défi de la transition énergétique. Explorations entre passé et avenir, technologie et sobriété, accélération et ralentissement.** Aurélien Bingo Thèse de doctorat en économie, gestion, sciences sociales, 23-11-2020 Centre de recherche en économie et statistique

**Beyond mobility : On the economics of electric vehicle's multiple roles in an energy transition framework.** Ivestre Freitas Gomes Thèse de doctorat en Sciences économiques, 10-09-2021 Réseaux, innovation, territoires et mondialisation

**Rupture technologique et dynamique d'une industrie : la transition vers l'électromobilité** Marc Alochet Thèse de doctorat en économie, gestion, sciences sociales,

18-12-2020 Centre de recherche en gestion

**Gestion d'énergie optimisée étendue véhicules infrastructures** Yassir Dahmane Thèse de doctorat en Génie électrique, 16-12-2020 Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes

**Electric vehicle integration into distribution systems : Considerations of user behavior and frameworks for flexibility implementation** Felipe Gonzalez Venegas Thèse de doctorat en Génie électrique, 09-07-2021 Laboratoire de Génie électrique et électronique de Paris

**Conception intégrée optimale du système propulsif d'un avion régional hybride électrique** Matthieu Pettes-Duler Thèse de doctorat en Génie électrique, 23-04-2021 Laboratoire Plasma et Conversion d'énergie

**Energy management strategies for battery electric bus fleet** Hussein Basma Thèse de doctorat en énergétique et génie des procédés, 03-12-2020 CES - Centre Efficacité énergétique des Systèmes

**Méthodologie et outils pour l'optimisation multicritères d'une architecture de train hybride électrique à hydrogène.** Charles Lorenzo Doctorat en Génie électrique, 17-11-2021 FEMTO-ST

**De la conception et de l'intégration des systèmes avion à la simulation de scénarios environnementaux soutenables pour le secteur aérien**

*Thomas Planès*  
Projet de thèse en énergétique et transferts, depuis le 01-01-2020  
ISAE-ONERA CSDV - Commande des Systèmes et Dynamique du Vol

**Optimisation énergétique des navires marchands dans le cadre OMI d'une marine de commerce durable en 2050.**

*Alexandre Bellot*  
Projet de thèse en énergétique et génie des procédés, depuis le 09-12-2019  
CES - Centre Efficacité énergétique des Systèmes

16/12/2021



# LES BATTERIES STRUCTURELLES POURRAIENT RÉVOLUTIONNER LE STOCKAGE DES VOITURES ÉLECTRIQUES

*Grâce aux matériaux multifonctionnels, il va être possible à l'avenir de stocker l'électricité dans la structure même des voitures, notamment la carrosserie. Cette prouesse technologique permettra d'alléger les véhicules et donc augmenter leur autonomie.*

Et si demain, l'énergie des voitures électriques n'était plus stockée dans des **batteries** telles qu'on les connaît aujourd'hui, mais dans la structure même des véhicules, comme le plancher ou la carrosserie ? Ce changement de paradigme pourrait devenir une réalité et repose sur une nouvelle technologie, celle des batteries structurelles. Ces dernières ont la particularité d'être conçues à partir de matériaux dits multifonctionnels, capables à la fois de **stocker de l'électricité** tout en possédant une intégrité mécanique. L'intérêt est double : gagner en encombrement, mais surtout en poids, afin d'alléger les véhicules et donc augmenter leur autonomie. Au-delà des voitures, cette technologie pourrait intéresser toutes les applications de transport, allant des vélos électriques jusqu'aux avions de petite taille.

Ces batteries structurelles fonctionnent selon le même principe que les batteries électrochimiques au lithium, sauf que les matériaux utilisés ne sont pas les mêmes. Ici, elles peuvent par exemple être constituées de **polymères renforcés par des fibres** de carbone qui servent à la fois d'électrode et de renforcement structurel mécaniquement porteur. Plus précisément, les fibres de carbone sont noyées dans un matériau formant une matrice à l'image d'un composite. Plusieurs couches sont ainsi formées et empilées les unes

sur les autres. « Cette configuration permet le transfert de charge entre les fibres ainsi que le transport des ions lithium, explique Gaël Guégan, ingénieur veille stratégique au Cetim, et [auteur d'une note sur ce sujet](#). Ce qui n'est pas le cas des batteries standard qui sont constituées de matrices, par exemple en vinylester ou époxy sur des composites thermodurcissables. »

D'importants obstacles restent à surmonter avant de voir cette technologie sur le marché, notamment en matière de conception de ces matériaux multifonctionnels et d'industrialisation. Néanmoins, les perspectives sont très encourageantes. Ainsi, l'entreprise américaine Kitty Hawk a mis au point un petit avion électrique dénommé Cora, au gabarit proche de celui d'un taxi volant, et équipé de batteries structurelles dont l'énergie spécifique atteint 220 wattheures par kilogramme. « Pour développer le marché des voitures volantes, il est couramment admis qu'il faudrait atteindre 400 wattheures par kilogramme, complète l'ingénieur du Cetim. Cela signifie qu'il ne reste plus qu'un facteur de deux pour atteindre cet objectif. »

## **Le plancher de certaines voitures du constructeur Tesla stockera l'électricité**

Tesla semble très avancé dans ce domaine puisque le constructeur de voitures électriques a annoncé que son modèle Y, construit dans sa *gigafactory* à Berlin, sera équipé de batteries structurelles, tout comme son modèle S Plaid. « Leur technologie a été annoncée il y a plusieurs années à travers des brevets, mais c'était tellement avant-gardiste qu'on s'est demandé comment ils allaient s'y prendre pour l'intégrer dans leurs voitures. Ils ont non seulement une lon-

*gueur d'avance sur les aspects électriques, mais aussi en l'occurrence sur les systèmes de stockage. » Ces batteries structurelles devraient être intégrées dans le plancher des véhicules, à l'aide d'une presse hydraulique de 8 000 tonnes qui sera capable de fabriquer à terme ces planchers en une seule pièce. La firme automobile a annoncé que cette nouvelle technologie lui permettrait de multiplier par 5 l'énergie stockée, par 6 la puissance, et d'augmenter de 16 % l'autonomie du véhicule. « L'intérêt de cette technologie pour le secteur automobile est qu'en réduisant le poids de la voiture, vous pouvez massivement améliorer son autonomie, puisque retirer la moitié du poids du véhicule permet de doubler son autonomie, analyse Gaël Guégan. Ainsi, choisir un matériau qui stocke l'énergie nécessaire à la propulsion et sert également à supporter la charge mécanique de la voiture sera considéré comme un réel avantage. »*

En Europe, plusieurs projets de développement de cette technologie sont menés, notamment celui baptisé SORCERER (*Structural pOweR CompositEs foR futurE civil aiRcraft*). Il réunit quatre universités européennes : l'Imperial College London au Royaume-Uni, l'IMDEA (Instituto Madrileño de Estudios Avanzados) en Espagne ainsi que le KTH (Kungliga Tekniska högskolan) et l'Université technologique de Chalmers en Suède. En plus d'améliorer les performances électriques et mécaniques de ces matériaux multifonctionnels, son objectif est de résoudre les problèmes liés à leur intégration et à leur mise à l'échelle. Les applications visées sont cette fois-ci à destination de futurs avions électriques et hybrides. À terme, il est question de construire un démonstrateur à vocation industrielle, en partenariat entre autres avec Airbus.

03/12/2021

# ÉTUDIER L'IMPACT DE L'AJOUT DE BIOCARBURANTS DANS LES CARBURANTS CONVENTIONNELS

*Un projet de recherche vient de démarrer pour évaluer les conséquences de l'ajout de biocarburants dans les carburants conventionnels vis-à-vis de la stabilité à l'oxydation. Il aura aussi pour objectif d'étudier les nouveaux polluants émis lors de la combustion de ces mélanges.*

Pour réduire leur impact carbone, certains secteurs du transport, comme celui de l'aviation, vont difficilement pouvoir remplacer les moteurs thermiques (alimentés par des carburants fossiles) par de l'énergie électrique. La solution envisagée est alors l'utilisation de **biocarburants** issus de la biomasse. Or, ces carburants alternatifs sont réputés comme moins stables dans le temps. Un projet de recherche, baptisé Bioscope, vient de démarrer dans le but d'évaluer l'impact de l'ajout de biocarburants dans les carburants conventionnels.

Le premier objectif sera d'évaluer le degré d'oxydation des biocarburants au cours de leur vieillissement. Actuellement, la littérature scientifique s'est principalement attachée à observer ce phénomène sur les carburants conventionnels. Face à ce problème, les compagnies pétrolières ont pris l'habitude de rajouter des additifs à l'intérieur pour améliorer la stabilité à l'oxydation. Et lors de leur commercialisation, ces carburants sont garantis avec un temps d'utilisation limité d'environ 12 mois.

« Les biocarburants sont réputés comme ayant une résistance au vieillissement moins importante que les carburants conventionnels, explique Baptiste Sirjean, chargé de recherche CNRS au sein du LRGP (Laboratoire réactions et génie des procédés) et lauréat d'une bourse ERC (European Research Council) pour mener à bien le projet Bioscope. Lors d'un précédent travail de recherche, j'ai décou-

*vert qu'une famille de biocarburants améliorerait la résistance des carburants conventionnels sur le plan de l'oxydation. Il s'agit de biocarburants de type alcools provenant de la fermentation de sucres issus par exemple du blé ou de la canne à sucre, pour ceux dits de première génération, ou de la biomasse non comestible comme le bois pour ceux de deuxième génération. C'est un résultat très surprenant, mais qui sera à confirmer au cours de ce nouveau projet de recherche. »*

L'étude de l'oxydation des carburants est d'autant plus importante que ce phénomène peut provoquer d'importants problèmes dans les systèmes motorisés. Lorsque ce processus va jusqu'à son terme, il conduit en effet à la formation de dépôts ou de gommages qui vont alors **encrasser** les filtres, les pompes et jusqu'aux injecteurs des moteurs. Dans l'aviation, cette problématique peut entraîner de graves risques pour la sécurité des appareils. Dans ce secteur, les carburants sont en plus confrontés à une accélération du processus d'oxydation, car ils servent également à refroidir le moteur des avions, à l'image d'un liquide de refroidissement. Les carburants ont pour fonction de capter l'énergie dégagée par le moteur, et par conséquent se réchauffent jusqu'à environ 150 degrés. Autant à température ambiante, l'oxydation des carburants est un phénomène relativement lent, autant leur réchauffement va provoquer une accélération de ce processus. Actuellement, l'industrie aéronautique maîtrise bien cette problématique, car les carburants conventionnels utilisés sont des produits ultra-normés.

**Retirer l'oxygène des biocarburants pour les utiliser dans l'aviation**

« Lorsqu'on rajoute des biocarburants dans des carbu-

*rants conventionnels, on ne sait plus très bien comment ce mélange évolue, poursuit le chercheur. Alors, avant d'en ajouter, le secteur de l'aviation procède à leur traitement pour retirer l'oxygène présent à l'intérieur afin qu'ils ressemblent à des carburants d'origine fossile d'un point de vue chimique. Bien sûr, ce traitement entraîne un surcoût sur le plan économique et n'est pas neutre non plus sur le plan des émissions de carbone. La biomasse est en effet traitée deux fois, la première lors de sa transformation en carburant et la seconde pour lui retirer son oxygène. Ces carburants sont appelés SAF pour Sustainable Aviation Fuel et sont actuellement ajoutés en toute petite quantité dans les carburants conventionnels. »*

Le deuxième objectif du projet Bioscope va consister à étudier les différents polluants émis par les biocarburants lors de leur combustion. Tout comme l'oxydation, ces rejets vont dépendre de la famille à laquelle appartient le biocarburant. Il en existe principalement trois : les esters méthyliques d'acide gras (EMAG) obtenus à partir d'huiles végétales, les biocarburants de type alcools issus de la fermentation et enfin ceux de type éthers issus de la biomasse lignocellulosique. « *En règle générale, l'ajout de biocarburants provoque une diminution des émissions de suie, mais peut entraîner l'apparition de nouveaux types de polluants comme de petits composés oxygénés, par exemple des aldéhydes, ajoute Baptiste Sirjean. Ceci s'explique par la présence d'oxygène dans ces carburants alternatifs, alors que les carburants conventionnels n'en contiennent pas. Même produits en faible quantité, ces composés oxygénés peuvent avoir un impact sur l'environnement. »*

08/11/2021

# AIRBUS DÉVOILE SES CONCEPTS D'AVION ZÉRO ÉMISSION À HYDROGÈNE

*Airbus veut mettre sur les pistes le premier avion commercial zéro émission en 2035. L'entreprise fait le pari de l'hydrogène et dévoile trois concepts d'avions.*

L'avion zéro émission carburera à l'**hydrogène** pour Airbus. L'entreprise vient de dévoiler trois concepts d'avion préfigurant le premier avion commercial zéro émission au monde. Trois concepts qui permettront d'explorer différentes pistes technologiques et configurations aérodynamiques. Nom de code de ces concepts : « ZEROe », pour « zéro émission ». Sa feuille de route prévoit un premier démonstrateur au sol en 2021, un vol de démonstration en 2023 et la sélection de la technologie d'ici 2024.

Airbus estime que l'hydrogène est la solution la plus prometteuse comme carburant aéronautique pour atteindre les objectifs de neutralité climatique. Remplacer le kérosène par l'hydrogène demande toutefois de repenser l'**architecture de l'avion**. En effet, l'hydrogène demande un volume de stockage quatre fois plus grand que le kérosène pour fournir la même énergie. En plus, il nécessite d'être refroidi à près de -253°C pour être **liquide**.

## **Un turboréacteur, un turbopropulseur et un fuselage intégré**

L'hydrogène peut directement être utilisé dans une turbine à gaz modifiée ou être converti en électricité grâce à une pile à combustible. Airbus prévoit d'allier ces deux solutions sur ses avions. Ainsi, un premier concept de turboréacteur pouvant embarquer entre 20 et 200 passagers imagine une turbine à gaz modifiée fonctionnant à l'hydrogène. Il serait capable d'effectuer des vols intercontinentaux de plus de 3 500 km. Les réservoirs d'hydrogène liquide sont situés derrière la cloison étanche arrière.

Le deuxième concept de turbopropulseur serait capable d'embarquer jusqu'à 100 passagers. Son moteur turbopropulseur serait également alimenté par la combustion d'hydrogène dans des turbines à gaz modifiées. Il serait capable de parcourir plus de 1 800 km.

Le dernier concept repense complètement l'architecture de l'avion afin d'offrir de multiples possibilités pour le stockage et la distribution d'hydrogène. Son fuselage intégré permettrait d'embarquer jusqu'à 200 passagers et repense l'aménagement de la cabine. Il pourrait également parcourir près de 1 800 km.

*« Nous avons 3 architectures d'avion différentes, mais il est trop tôt pour prédire laquelle sortira gagnante », prévient Jean-Brice Dumont, directeur de l'ingénierie chez Airbus. L'entreprise souhaite jouer le rôle de chef de fil pour la transition de l'écosystème aéronautique. Avec l'hydrogène, les aéroports auront par exemple besoin de nouvelles infrastructures de transport et de ravitaillement pour répondre aux besoins des opérations quotidiennes.*

22/09/2020

# « L'HYDROGÈNE DANS LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE » : UNE NOTE TECHNIQUE DE L'ADEME

L'ADEME vient de publier le 3 avril 2018 sa note technique « L'hydrogène dans la transition énergétique ». Si le remplacement par de l'hydrogène « vert » de l'hydrogène fossile utilisé dans l'industrie, par exemple pour produire de l'ammoniac, semble aller de soi, les autres usages envisagés par l'ADEME se heurtent à des obstacles économiques significatifs.

L'ADEME mentionne dans [son document](#) l'expérimentation de l'hybridation batterie + hydrogène au niveau d'un magasin Biocoop d'Avignon ainsi que sur un site isolé sur l'île de La Réunion : « Le village de La Nouvelle, au cœur du Cirque de Mafate à La Réunion, expérimente depuis l'été 2017 un système de stockage hybride batterie / chaîne hydrogène, dans le cadre d'un projet porté par EDF SEI et le Sidélec (Syndicat d'électrification de La Réunion) et soutenu par la Direction Régionale ADEME. L'installation comprend une production PV (7,8 kWc), des batteries lithium (15,6 kWh), un électrolyseur et une pile (3 kW) et un stockage d'hydrogène (3 kg). L'ensemble permet à trois bâtiments (le dispensaire, l'école et le bâtiment de l'ONF) d'être 100% autonome en énergie. Si l'expérimentation est concluante, elle sera étendue à l'ensemble du village qui pourra alors se passer du fioul qui alimente ses groupes électrogènes. »

La [batterie](#) assure le stockage quotidien. Le système [hydrogène](#) n'intervient de son côté que pendant les longues périodes de pénurie solaire-éolienne. Ce « *prolongateur d'autonomie* » a donc un rôle marginal. Utiliser des générateurs thermiques classiques à leur place est bien meilleur marché. Et probablement acceptable sur le plan écologique étant donné qu'il s'agit d'usages très ponctuels.

Selon l'agence [Bloomberg](#) « pour être une solution, les

coûts du stockage hydrogène devront baisser drastiquement. Un système à base d'hydrogène coûte environ 10 fois plus cher qu'un back-up à base de générateurs diesel ayant une puissance équivalente, selon une présentation de Toshiba Corp durant la World Smart Energy Week à Tokyo en mars 2017 ».

L'ADEME envisage par ailleurs de recourir à l'hydrogène pour les véhicules lourds professionnels. Ceci en phase avec la déclaration d'Emmanuel Macron du 22 mars 2018 : « Ils'agit de s'engager dans une révolution des transports en généralisant les véhicules électriques et à hydrogène et en convertissant les flottes de poids lourds au gaz. C'est une stratégie nationale que nous avons engagée. Elle doit aussi s'accélérer sur le plan Européen ». Là encore il est permis de douter. C'est précisément pour les véhicules lourds (et donc fortement consommateurs en énergie) et pour les [longs kilométrages](#) quotidiens que les véhicules électriques à batteries sont les plus pertinents économiquement. Recourir à des [camions électriques à batterie](#) sera bien plus économique que tout autre mode de transport des marchandises : par exemple [\\$0.85](#) par mile avec une flotte de camions Tesla contre [\\$1.51](#) avec un train (un mile = 1,6 kilomètre). La banque Morgan Stanley estime que les camions Tesla auront un coût de fonctionnement 70% moins élevé que les camions Diesel. « Ce n'est pas seulement un suicide économique pour les camions diesel, c'est une suicide économique pour le transport ferroviaire » a estimé Elon Musk. L'analyste Adam Jonas [a déclaré](#) : « Nous pensons que les révélations de Tesla sur leur camion semi-remorque autonome et électrique de classe 8 pourraient constituer le plus grand déclencheur de l'industrie des camions et séparer définitivement les leaders en matière de technologie de ceux qui sont à la traîne ».

Selon l'ADEME, « De récentes simulations technicoéconomiques réalisées par Artelys pour l'ADEME indiquent qu'à l'horizon 2035, le système électrique (français nldr), comprenant 64% de renouvelables, peut fournir 30 TWh/an d'hydrogène pour un coût inférieur à 5 €/kg, qui est compétitif pour des usages dans la mobilité et l'industrie. Dans ces simulations, le coût moyen de l'électricité consommée par les électrolyseurs s'établit à 42 €/MWh ».

05/04/2018

Mais « le rendement énergétique de la chaîne hydrogène et les risques accidentels associés à son utilisation sont des questions qui font régulièrement débat. Ces débats sont légitimes, ils pointent les contraintes attachées à cette technologie, qui doivent être prises en compte dans sa mise en œuvre concrète.

L'hydrogène n'étant qu'un vecteur énergétique, il suppose une succession de transformations, entre source primaire d'énergie et énergie finale utilisée. Le rendement de l'électrolyse - permettant via un courant électrique de décomposer la molécule d'eau en hydrogène et oxygène - est actuellement de l'ordre de 70%. La compression de ce gaz est également consommatrice d'énergie, et la recombinaison de la molécule d'eau dans la pile, pour fournir de l'électricité à nouveau, se fait avec un rendement de l'ordre de 45%. Le rendement global de la chaîne, de l'électricité primaire à l'électricité utile restituée, se situe ainsi dans une fourchette de 20 à 30% selon les applications, la pression de stockage considérée, les schémas logistiques...

Pour cette raison, et dans le but d'une efficacité globale des systèmes énergétiques, le stockage électrochimique à batterie est à privilégier lorsque cela est possible. Le rendement de ce type de stockage est en effet meilleur, supérieur à 80%. Par exemple, dans le domaine de la mobilité, le véhicule électrique à batterie seule est à préférer pour les profils d'usage qui peuvent être couverts par ce type de véhicule, selon l'autonomie énergétique souhaitée, la disponibilité du véhicule requise... Le recours à l'hydrogène est à considérer lorsque cette solution n'est plus opérante ».

**Jean-Gabriel Marie**

# Gagnez du temps et sécurisez vos projets en utilisant une source actualisée et fiable



RÉDIGÉE ET VALIDÉE  
PAR DES EXPERTS




MISE À JOUR  
PERMANENTE



100 % COMPATIBLE  
SUR TOUS SUPPORTS  
NUMÉRIQUES



SERVICES INCLUS  
DANS CHAQUE OFFRE

- + de 340 000 utilisateurs chaque mois
- + de 10 000 articles de référence et fiches pratiques
- Des Quiz interactifs pour valider la compréhension 

## SERVICES ET OUTILS PRATIQUES



### Questions aux experts\*

Les meilleurs experts techniques et scientifiques vous répondent



### Articles Découverte

La possibilité de consulter des articles en dehors de votre offre



### Dictionnaire technique multilingue

45 000 termes en français, anglais, espagnol et allemand



### Archives

Technologies anciennes et versions antérieures des articles



### Info parution

Recevez par email toutes les nouveautés de vos ressources documentaires

\*Questions aux experts est un service réservé aux entreprises, non proposé dans les offres écoles, universités ou pour tout autre organisme de formation.

## Les offres Techniques de l'Ingénieur

### INNOVATION

- Éco-conception et innovation responsable
- Nanosciences et nanotechnologies
- Innovations technologiques
- Management et ingénierie de l'innovation
- Smart city – Ville intelligente

### MATÉRIAUX

- Bois et papiers
- Verres et céramiques
- Textiles
- Corrosion – Vieillessement
- Études et propriétés des métaux
- Mise en forme des métaux et fonderie
- Matériaux fonctionnels. Matériaux biosourcés
- Traitements des métaux
- Élaboration et recyclage des métaux
- Plastiques et composites

### MÉCANIQUE

- Frottement, usure et lubrification
- Fonctions et composants mécaniques
- Travail des matériaux – Assemblage
- Machines hydrauliques, aérodynamiques et thermiques
- Fabrication additive – Impression 3D

### ENVIRONNEMENT – SÉCURITÉ

- Sécurité et gestion des risques
- Environnement
- Génie écologique
- Technologies de l'eau
- Bruit et vibrations
- Métier : Responsable risque chimique
- Métier : Responsable environnement

### ÉNERGIES

- Hydrogène
- Ressources énergétiques et stockage
- Froid industriel
- Physique énergétique
- Thermique industrielle
- Génie nucléaire
- Conversion de l'énergie électrique
- Réseaux électriques et applications

### GÉNIE INDUSTRIEL

- Industrie du futur
- Management industriel
- Conception et production
- Logistique
- Métier : Responsable qualité
- Emballages
- Maintenance
- Traçabilité
- Métier : Responsable bureau d'étude / conception

### ÉLECTRONIQUE – PHOTONIQUE

- Électronique
- Technologies radars et applications
- Optique – Photonique

### TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION

- Sécurité des systèmes d'information
- Réseaux Télécommunications
- Le traitement du signal et ses applications
- Technologies logicielles – Architectures des systèmes
- Sécurité des systèmes d'information

### AUTOMATIQUE – ROBOTIQUE

- Automatique et ingénierie système
- Robotique

### INGÉNIERIE DES TRANSPORTS

- Véhicule et mobilité du futur
- Systèmes aéronautiques et spatiaux
- Systèmes ferroviaires
- Transport fluvial et maritime

### MESURES – ANALYSES

- Instrumentation et méthodes de mesure
- Mesures et tests électroniques
- Mesures mécaniques et dimensionnelles
- Qualité et sécurité au laboratoire
- Mesures physiques
- Techniques d'analyse
- Contrôle non destructif

### PROCÉDÉS CHIMIE – BIO – AGRO

- Formulation
- Bioprocédés et bioproductions
- Chimie verte
- Opérations unitaires. Génie de la réaction chimique
- Agroalimentaire

### SCIENCES FONDAMENTALES

- Mathématiques
- Physique Chimie
- Constantes physico-chimiques
- Caractérisation et propriétés de la matière

### BIOMÉDICAL – PHARMA

- Technologies biomédicales
- Médicaments et produits pharmaceutiques

### CONSTRUCTION ET TRAVAUX PUBLICS

- Droit et organisation générale de la construction
- La construction responsable
- Les superstructures du bâtiment
- Le second œuvre et l'équipement du bâtiment
- Vieillessement, pathologies et réhabilitation du bâtiment
- Travaux publics et infrastructures
- Mécanique des sols et géotechnique
- Préparer la construction
- L'enveloppe du bâtiment
- Le second œuvre et les lots techniques