



Commission économique pour l'Europe**Comité des transports intérieurs****Groupe de travail chargé d'étudier les tendances et l'économie des transports****Trente-sixième session**

Genève, 4-6 septembre 2023

Point 8 a) de l'ordre du jour provisoire

Évaluation et suivi des questions nouvelles et des objectifs de développement durable : Tendances et difficultés concernant les transports routiers, les transports ferroviaires et les transports par voie navigable**Tendances générales et évolutions concernant les véhicules électriques et leurs infrastructures de recharge – Analyse des possibilités d'amélioration de la durabilité des systèmes d'alimentation en carburant dans le secteur des transports****Note du secrétariat****I. Introduction**

1. Le Groupe de travail chargé d'examiner les tendances et l'économie des transports (WP.5) ayant demandé à sa précédente session que la publication « Transport Trends and Economics 2022-2023 » (Tendances et économie des transports pour la période 2022-2023) soit consacrée aux tendances générales et aux évolutions concernant les véhicules électriques et leurs infrastructures de recharge, le secrétariat a établi, avec le concours d'un consultant externe, un projet de publication figurant dans les documents ECE/TRANS/WP.5/2023/4, ECE/TRANS/WP.5/2023/5, ECE/TRANS/WP.5/2023/6, ECE/TRANS/WP.5/2023/7 et ECE/TRANS/WP.5/2023/8, qui sera soumis pour observations.
2. On trouvera dans le présent document un aperçu des options relatives à la durabilité des systèmes d'alimentation en carburant dans les transports routiers, les transports ferroviaires, les transports par voie navigable et les transports maritimes.
3. Les membres du WP.5 sont invités à faire part de leurs observations et de leurs propositions d'amélioration du texte et à présenter des études de cas nationales et des exemples de bonnes pratiques à intégrer dans la version définitive de la publication.

II. Modes de transport durables : options et choix

4. Les chapitres précédents ont mis en évidence la mobilité électrique comme une solution prometteuse de remplacement des systèmes de transport conventionnels basés sur les combustibles fossiles. Dans cette optique, le présent chapitre offre une vue d'ensemble



du développement de la mobilité électrique dans les différents modes de transport. Il vise à mettre en évidence les progrès réalisés et les difficultés rencontrées lors de la transition. On y examine également l'électrification des véhicules privés et commerciaux, en tenant compte des progrès réalisés dans les transports routiers, les transports ferroviaires, les transports par voie navigable, les transports maritimes et les transports aériens. En outre, une comparaison est établie entre les véhicules électriques à batterie et d'autres types de véhicules électriques, ainsi qu'avec des véhicules utilisant d'autres carburants de substitution.

A. Transport routier

5. L'électrification des transports routiers a connu un essor remarquable avec la présence croissante des véhicules électriques à batterie et des véhicules électriques hybrides rechargeables. Cet essor est lié à divers facteurs tels que le lancement de divers modèles de véhicules électriques par les fabricants, l'installation d'infrastructures de recharge publiques par les exploitants de réseaux, et le soutien des gouvernements passant par le financement de démonstrations, la réalisation de projets expérimentaux et la mise en place de cadres réglementaires et d'incitations à l'adoption des véhicules électriques. En outre, la tendance à l'électrification du transport routier ne s'est pas limitée aux voitures particulières mais a également concerné, en particulier, les camionnettes de livraison, les véhicules utilitaires légers, les bus et les deux-roues. Par ailleurs, des prototypes de camions électriques de plus grande taille sont en cours d'élaboration. Les contraintes techniques pesant sur les véhicules électriques varient considérablement en fonction du mode de transport. Il est notamment indispensable de pouvoir compter sur des batteries puissantes et de grande capacité, des solutions efficaces pour la recharge, des technologies conviviales et des processus d'achat adaptés.

6. Le tableau 1 présente une vue d'ensemble des différents types de véhicules de transport routier ainsi que les termes et définitions correspondants auxquels il sera fait référence tout au long de la présente étude. Le poids brut des véhicules utilisé dans le tableau correspond aux définitions mondiales harmonisées de l'Agence internationale de l'énergie. Les poids lourds désignent à la fois les véhicules utilitaires moyens et les véhicules utilitaires lourds. Pour chaque type de véhicule de transport de marchandises, une série de cas d'utilisation potentiels est fournie. Toutefois, il est important de noter que ces cas d'utilisation ne sont pas figés et peuvent varier en fonction de divers facteurs.

Tableau 1

Définitions et caractéristiques de base des types de véhicules électriques de transport routier

<i>Catégorie de véhicule</i>	<i>Caractéristiques de base</i>
Voitures particulières	
Voitures particulières à usage privé	<ul style="list-style-type: none"> • La recharge se fait principalement à domicile, recharge rapide si nécessaire • La satisfaction de l'utilisateur est un facteur essentiel
Voitures particulières à usage commercial	<ul style="list-style-type: none"> • La recharge et la recharge rapide se font à domicile et sur le lieu de travail • Font partie du parc d'une grande organisation ou d'un gouvernement (achat en gros) • Le coût total de possession est un facteur important
Voitures particulières partagées	<ul style="list-style-type: none"> • Font souvent partie de la flotte d'une grande organisation ou d'un organisme public (achat en gros) • Cas d'utilisation : mobilité des employés, services commerciaux de mobilité partagée, taxis, services de chauffeurs privés à la demande, mobilité en tant que service

<i>Catégorie de véhicule</i>	<i>Caractéristiques de base</i>
Véhicules lourds de transport de voyageurs	
Autobus (publics)	<ul style="list-style-type: none"> • La recharge se fait souvent au dépôt et à la demande • Circulent sur des itinéraires fixes • Souvent achetés par des organismes publics ou des sociétés de transports en commun
Véhicules légers de transport de marchandises	
Véhicules utilitaires légers	<ul style="list-style-type: none"> • Poids total autorisé en charge <3,5 tonnes • Cas d'utilisation : dernier kilomètre, livraison de marchandises en ville, livraison de petits colis • Circulent sur des itinéraires généralement prévisibles • La recharge se fait souvent dans les locaux de l'entreprise
Poids lourds	
Véhicules utilitaires moyens	<ul style="list-style-type: none"> • Poids total autorisé en charge : 3,5 à 15 tonnes • Cas d'utilisation : dernier kilomètre, livraison de marchandises en ville, distribution de marchandises au niveau régional, services publics, livraison de marchandises réfrigérées, collecte des déchets, construction • Nécessitent généralement des batteries de grande taille et une recharge en courant continu
Véhicules utilitaires lourds	<ul style="list-style-type: none"> • Poids total autorisé en charge >15 tonnes • Cas d'utilisation : transport de marchandises sur de grandes distances, construction lourde, transport spécialisé (par exemple grosses machines)
Véhicules légers	
Motocycles de faible puissance	<ul style="list-style-type: none"> • Vitesse maximale : 45 km/h • Cas d'utilisation : service de mobilité partagée en zone urbaine • La recharge se fait généralement à domicile ou par échange de batteries
Véhicules à trois roues	<ul style="list-style-type: none"> • La recharge se fait généralement à domicile ou par échange de batteries • Cas d'utilisation : service de mobilité partagée dans les zones urbaines ou livraison de marchandises dans les zones rurales
Vélos électriques	<ul style="list-style-type: none"> • Cas d'utilisation : usage privé et service partagé • La recharge se fait généralement à domicile (pour un usage privé) ou dans les installations de l'exploitant (pour un service partagé)

B. Transport routier de voyageurs

7. Contrairement à l'usage qui en est fait en Afrique et en Asie, les trottinettes électriques sont, en Europe, principalement destinées aux services de mobilité partagée. Ce mode est souvent utilisé en milieu urbain sur de courts trajets. Il est donc essentiel de disposer de technologies rapides et efficaces pour le remplacement des batteries, permettant que le parc de véhicules fonctionne en continu sans qu'il soit nécessaire de prévoir des temps d'arrêt importants pour la recharge. Les voitures électriques partagées ont également gagné en popularité ces dernières années, car elles offrent de nombreux avantages, en particulier pour les citoyens, ainsi libérés de la charge financière associée à la possession d'un véhicule privé

et des frais de carburant. De nombreuses villes proposent des places de stationnement prioritaires aux voitures partagées, qui peuvent aussi utiliser les points de recharge comme des places de stationnement, ce qui améliore encore leur accessibilité. Beaucoup de grandes organisations et d'organismes publics agrandissent également leur parc de voitures électriques pour en faire bénéficier leurs employés. Lorsque ces véhicules sont utilisés à des fins commerciales, leur coût total de possession est une considération importante.

8. Dans le domaine des voitures particulières, la satisfaction du client est primordiale. La possibilité de recharger à domicile y contribue de manière importante, car il est pratique de pouvoir recharger le véhicule pendant la nuit ou pendant les périodes d'inactivité. Dans la plupart des pays, les parcs de voitures particulières à usage commercial ont constitué un bon point de départ pour l'électrification, car le coût élevé de l'acquisition est compensé par la faiblesse du coût d'entretien et d'amortissement, ce qui devrait bientôt conduire à un coût total de possession attractif. Par ailleurs, afin de garantir un processus convivial, les technologies doivent faciliter l'interaction entre le véhicule et la station de recharge.

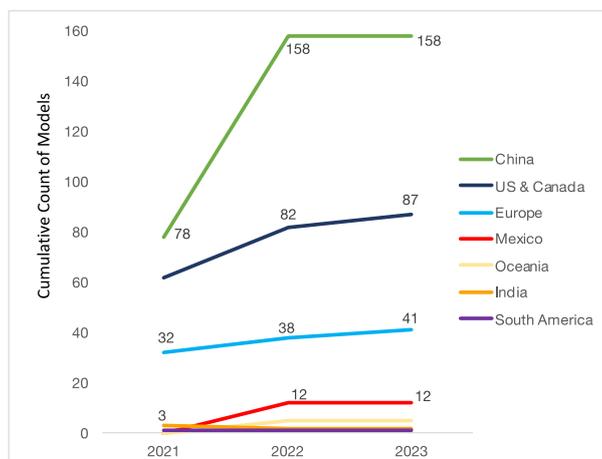
9. Les autobus publics, autre part cruciale du transport, circulent souvent sur des itinéraires fixes, ce qui les rend prévisibles pour l'infrastructure de recharge. Compte tenu de leur grande visibilité, ces véhicules jouent également un rôle important dans la manière dont le public perçoit la technologie des véhicules électriques. Le processus d'acquisition de ces véhicules implique généralement des organismes gouvernementaux et municipaux, ce qui nécessite de la transparence et des réglementations strictes.

C. Transport routier de marchandises

10. Par rapport aux voitures particulières, les véhicules de transport de marchandises présentent des besoins et des caractéristiques distincts. À l'instar des autobus publics, ils circulent principalement sur des itinéraires prédéterminés. Leurs caractéristiques entraînent certaines priorités pour l'achat et des besoins particuliers en matière d'infrastructure. Lors de l'acquisition de véhicules de transport de marchandises, la durabilité et la fiabilité sont de la plus haute importance. Cette considération découle de la haute fréquence d'utilisation des véhicules et du caractère essentiel de leurs tâches. En termes d'infrastructure, pour un accès facile, les installations de recharge sont principalement disposées dans les locaux des entreprises. Cela augmente le temps de disponibilité des véhicules et permet une gestion plus prévisible de l'énergie.

11. Dans le cas des véhicules utilitaires moyens et des véhicules utilitaires lourds, dont les besoins en énergie sont élevés, des batteries de grande capacité sont nécessaires. Par conséquent, ces véhicules sont conçus pour être rechargés en courant continu. Ce mode de recharge est avantageux en raison de sa rapidité, un facteur capital dans le secteur de la logistique, où la réduction des temps d'arrêt est une priorité. Actuellement, malgré une accélération récente, la croissance du taux d'adoption des camions électriques dans l'ensemble des modes de transport routier est la plus lente. Plusieurs facteurs peuvent expliquer ce constat, notamment les coûts initiaux plus élevés des camions électriques, les limitations technologiques des batteries capables de répondre aux besoins de ces véhicules, et l'absence d'infrastructure de recharge robuste. Néanmoins, les progrès dans ces domaines devraient favoriser le recours aux camions électriques dans les années à venir. En outre, le nombre de modèles de ces camions sur le marché a récemment augmenté (fig. I).

Figure I
Nombre de modèles de véhicules utilitaires moyens et de véhicules utilitaires lourds électriques à batterie et à pile à combustible disponibles



Source : ZETI Data Explorer¹. Consulté le 5 juin 2023.

D. Transport ferroviaire

12. Sur le plan énergétique, le rail est le mode de transport le plus efficace de tous les modes de transport de surface. En outre, c'est actuellement le seul mode qui offre une solution mûre et facilement disponible pour une utilisation généralisée dans le cadre d'un transport à émissions nulles (FIT (2021a)). L'électrification du rail élimine toutes les émissions directes (du réservoir à la roue) de CO₂ et d'autres polluants que pourraient produire les trains. Le diesel, qui est couramment utilisé comme source d'énergie de substitution pour les trains, émet entre 6 et 30 grammes de CO₂ par passager-kilomètre (ces valeurs peuvent varier considérablement en fonction de l'efficacité du moteur du train et du facteur de charge) (FIT (2021b)).

13. Bien que l'Union européenne possède la plus forte densité de sections ferroviaires électrifiées de tous les continents, environ 45 % de l'ensemble de ses voies ferrées ne sont pas électrifiées². L'électrification de l'infrastructure ferroviaire nécessite des investissements importants, impliquant de construire de nouvelles lignes de chemin de fer ou d'ajouter des infrastructures aux lignes existantes afin d'alimenter les trains en courant continu. Les coûts d'électrification varient de 0,5 à 2 millions d'euros par kilomètre (FIT (2021b)). Par conséquent, l'électrification ne se justifie économiquement que dans les pays à fort trafic, où la faiblesse des coûts d'exploitation peut compenser l'importance des dépenses liées à la mise à niveau de l'infrastructure.

14. Dans les cas où des tronçons ferroviaires ne sont pas encore électrifiés, les technologies des batteries et de l'hydrogène constituent des solutions complémentaires. La technologie des trains électriques à batterie convient aux courtes distances, tandis que les trains à hydrogène sont bien adaptés aux tronçons de plus de 100 kilomètres dépourvus de câblage électrique aérien³.

E. Transport maritime et par voie navigable

15. L'adoption de systèmes de propulsion électrique est en hausse tant dans le transport maritime que dans le transport par voie navigable. Les systèmes intégrés de propulsion électrique intégrale sont de plus en plus répandus dans divers types de bateaux, notamment

¹ <https://globaldrivetozero.org/tools/zeti-data-explorer/>.

² www.railtech.com/rolling-stock/2023/05/04/will-battery-or-hydrogen-trains-be-the-future-the-vision-of-siemens-mobility/.

³ www.railtech.com/rolling-stock/2023/05/04/will-battery-or-hydrogen-trains-be-the-future-the-vision-of-siemens-mobility/.

les bateaux à passagers, les méthaniers, les bateaux-citernes, les bateaux de croisière, les transbordeurs et les bateaux de service pour la desserte des plateformes de forage⁴. Cette évolution est due aux progrès considérables réalisés dans le domaine de la technologie des batteries.

16. Les batteries au lithium ionique jouent un rôle crucial dans l'alimentation des bateaux électriques hybrides ou entièrement électriques. En effet, on assiste actuellement à l'apparition de bateaux entièrement électriques alimentés par des batteries, notamment des transbordeurs pour des trajets courts (jusqu'à 50 km). Toutefois, lorsqu'il s'agit de voyages plus longs, les limitations de la capacité des batteries et des capacités de stockage de l'énergie posent des problèmes. Pour y remédier, l'utilisation de piles à combustible à hydrogène comme source d'énergie présente un potentiel prometteur.

17. En matière d'infrastructure, la mise en place de systèmes d'alimentation électrique à quai est encouragée. Les ports et les terminaux fluviaux investissent dans de tels systèmes, ce qui permet aux bateaux de se connecter au réseau électrique lorsqu'ils sont à l'amarre. Il n'est ainsi plus nécessaire de faire tourner les moteurs des bateaux pendant leurs séjours au port, ce qui permet de réduire les émissions et la pollution sonore. En outre, l'alimentation électrique à quai permet aux bateaux d'utiliser de l'électricité provenant de sources renouvelables, ce qui contribue à rendre les ports et les terminaux plus propres et plus silencieux. Ces installations peuvent aussi être utilisées pour recharger les bateaux alimentés par batterie. L'installation d'équipements d'alimentation électrique à quai sera obligatoire dans les principaux ports de l'Union européenne à partir de 2025. Les connexions d'alimentation à quai sont les plus pertinentes pour les bateaux faisant régulièrement escale dans des ports déterminés, par exemple les transbordeurs et les bateaux de ligne (FIT (2021c)).

F. Transport maritime

18. La transition vers la mobilité électrique dans le transport maritime a été relativement lente en raison du manque de maturité du marché. Toutefois, grâce aux progrès réalisés dans le secteur automobile, l'adoption des technologies électriques et des batteries dans le secteur du transport maritime connaît un élan croissant. Des entreprises de renom telles que Maersk, Siemens et ABB participent activement à l'élaboration et aux essais de technologies de propulsion électrique et de stockage dans des batteries pour différents types de bateaux, notamment les transbordeurs, les remorqueurs et les bateaux de forage⁵.

19. Alors que les moteurs à combustion interne dominent actuellement le secteur, le développement des technologies électriques et des batteries dans le secteur maritime gagne du terrain. Les premières cibles de l'électrification sont les bateaux à courte distance dont l'exploitation est peu efficace, tels que les transbordeurs, pour lesquels les batteries peuvent fournir l'énergie nécessaire à l'ensemble du voyage. Des difficultés subsistent, notamment en ce qui concerne la capacité de recharge pour les voyages à longue distance. Cependant, le secteur envisage de résoudre ce problème en combinant le stockage dans des batteries avec des piles à combustible.

G. Transport par voie navigable

20. Le transport par voie navigable possède certains avantages concurrentiels par rapport aux autres modes de transport intérieur, notamment sa capacité à transporter des volumes importants sur de longues distances, son niveau de sécurité, son efficacité en matière d'énergie et de coûts, ses faibles émissions et l'absence d'encombrement des voies. Malgré ces avantages, les émissions de CO₂ provenant de ce type de transport connaissent une croissance à long terme, principalement en raison de l'expansion du transport par voie navigable et de l'adoption plus lente de sources d'énergie durables. Actuellement, un nombre

⁴ <https://trimis.ec.europa.eu/roadmaps/transport-electrification-elt>.

⁵ www.cleantech.com/shipping-pollution-and-technology-electrification-and-energy-storage-in-maritime-shipping/.

considérable de bateaux circulant sur les voies navigables européennes ont au moins 44 ans et sont équipés de leurs moteurs diesel d'origine (CEE (2020)).

21. Plusieurs déclarations faisant état de ce problème ont été publiées dans la région de la CEE, notamment :

- La déclaration ministérielle « La navigation intérieure dans le contexte international », adoptée lors de la Conférence internationale sur le transport par voie navigable, tenue à Wrocław (Pologne) le 18 avril 2018 (CEE (2018)), et le Livre blanc sur les progrès, les succès et les perspectives d'avenir dans le transport par voie navigable (CEE (2020)), visant à promouvoir l'utilisation de carburants de substitution et de l'électromobilité pour le transport par voie navigable en milieu urbain ;
- La déclaration de Mannheim « 150 ans d'existence de l'Acte de Mannheim – Un levier pour une navigation rhénane et intérieure dynamique », adoptée le 17 octobre 2018, qui vise à renforcer la durabilité écologique de la navigation intérieure en parvenant à réduire au plus tard en 2035 les émissions de gaz à effet de serre (GES) et de polluants d'au moins 35 % par rapport aux niveaux de 2015, et à éliminer ces émissions au plus tard en 2050⁶ ;
- Le plan d'action NAIADES III⁷, axé sur la pérennisation du transport européen par voie navigable, qui vise à augmenter le transport de marchandises par ce mode, à éliminer les émissions et à promouvoir la navigation intérieure intelligente⁸.

22. Si les batteries destinées aux systèmes de propulsion électrique offrent un potentiel prometteur de réduction de 100 % des émissions d'équivalent CO₂, de NO_x et de particules, elles présentent un niveau de maturité technologique légèrement inférieur à celui des moteurs à combustion interne (tableau 2). D'un point de vue environnemental, l'huile végétale hydrotraitée et le biométhane liquéfié offrent des avantages importants et leur développement est plus avancé.

Tableau 2

Comparaison de l'état de maturité des technologies énergétiques pour le transport par voie navigable

Technologies envisagées dans les filières	Description	Niveau de maturité technologique (1-9) (application au bateau)	Niveau de maturité technologique (1-9) (production et fourniture de carburant ou d'énergie)	Potentiel de réduction des émissions (dans une chaîne en amont idéale)		
				GES/équivalent CO ₂	NO _x	Matières particulaires
CCNR 2 ou inférieur, diesel	Diesel fossile dans un moteur à combustion interne conforme aux limites d'émission CCNR 2 ou un moteur plus ancien	9	9	0 %	0 %	0 %
CCNR 2 + SCR, diesel	Diesel fossile dans un moteur à combustion interne conforme aux limites d'émission CCNR 2 et équipé d'un système supplémentaire de réduction catalytique sélective	9	9	0 %	82 %	54 %
Phase V, diesel	Diesel fossile dans un moteur à combustion interne conforme aux limites d'émission de la phase V de l'Union européenne	9	9	0 %	82 %	92 %

⁶ www.ccr-zkr.org/files/documents/dmannheim/Mannheimer_Erklaerung_en.pdf.

⁷ Communication de la Commission européenne au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions.

⁸ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021DC0324>.

Technologies envisagées dans les filières	Description	Niveau de maturité technologique (1-9) (application au bateau)	Niveau de maturité technologique (1-9) (production et fourniture de carburant ou d'énergie)	Potentiel de réduction des émissions (dans une chaîne en amont idéale)		
				GES/équivalent CO ₂	NO _x	Matières particulaires
GNL	Gaz naturel liquéfié dans un moteur à combustion interne conforme aux limites d'émission de la phase V de l'Union européenne	9	9	10 %	81 %	97 %
	Huile végétale hydrotraitee dans un moteur à combustion interne conforme aux limites d'émission de la phase V de l'Union européenne					
Phase V, HVH	HVH désigne l'huile végétale hydrotraitee elle-même (sans mélange avec des combustibles fossiles) et tous les biocarburants comparables (y compris les e-carburants) ainsi que le diesel synthétique fabriqué à partir de CO ₂ capté et d'énergie électrique durable	9	9	100 %	82 %	92 %
Biométhane liquéfié	Biométhane liquéfié (ou bio-GNL) dans un moteur à combustion interne conforme aux limites d'émission de la phase V de l'Union européenne	9	8	100 %	81 %	97 %
Batterie	Systèmes de propulsion électrique à batterie (systèmes de batteries fixes ou interchangeables)	8	7	100 %	100 %	100 %
H ₂ , PC	Hydrogène stocké sous forme liquide ou gazeuse et utilisé dans les piles à combustible	7	7	100 %	100 %	100 %
H ₂ , MCI	Hydrogène stocké sous forme liquide ou gazeuse et utilisé dans les moteurs à combustion interne	5	7	100 %	82 %	92 %
MeOH, PC	Méthanol utilisé dans les piles à combustible	7	6	100 %	100 %	100 %
MeOH, MCI	Méthanol utilisé dans les moteurs à combustion interne	5	6	100 %	82 %	92 %

Source : CCR (2022).

23. Néanmoins, la technologie des batteries a fait des progrès notables. Des bateaux alimentés par des batteries fonctionnent dans les ports de Rotterdam et d'Anvers depuis 2017 (CCNR (2020)). Au moment de la rédaction du présent rapport, l'entreprise Emperium⁹, pionnière de la construction de bateaux électriques, basée en Fédération de Russie, lance des bateaux électriques pour le transport régulier de voyageurs et les voyages d'agrément dans plusieurs villes russes¹⁰. En outre, des bateaux électriques utilisant des conteneurs d'énergie circulent sur les voies navigables des Pays-Bas depuis 2021 (encadré 1).

Encadré 1

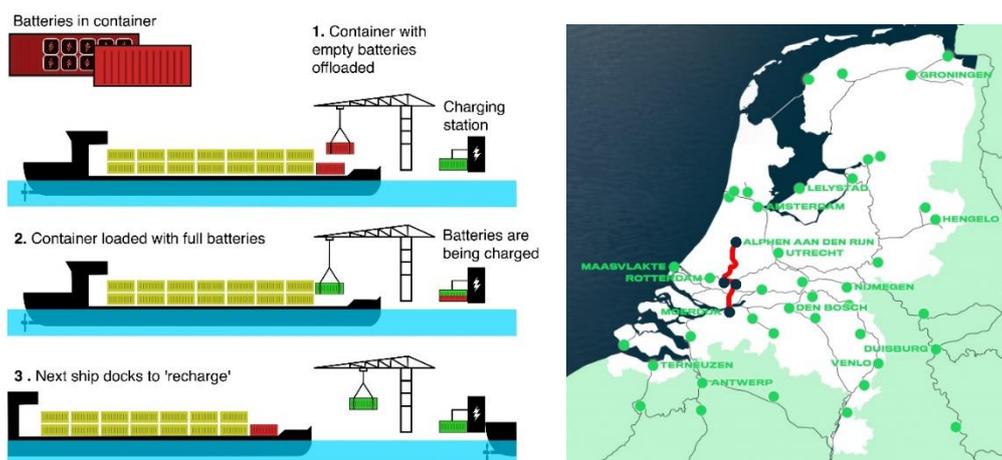
Premier bateau de navigation intérieure électrique aux Pays-Bas

L'*Alphenaar*, premier bateau de navigation intérieure électrique néerlandais, a été lancé en septembre 2021, ce qui constitue un grand pas en avant vers une navigation intérieure sans émissions. Construit par Zero Emission Services (ZES), dont le siège est à Rotterdam, le bateau opère entre Alphen-sur-le-Rhin et Moerdijk, en transportant des centaines de conteneurs de bière exportée le long de cet itinéraire pour le compte du géant néerlandais Heineken. L'*Alphenaar* utilise des ZESpacks, qui sont des conteneurs standard de 20 pieds remplis de batteries chargées d'énergie verte. Ces conteneurs d'énergie sont équipés de systèmes de sécurité et de communication et se composent de 45 modules de batteries totalisant 2 MWh, ce qui équivaut à la capacité des batteries d'environ 36 voitures électriques.

Avec un ZESpack de 2 MWh, une péniche peut naviguer pendant 2 à 4 heures. Avec deux ZESpacks à bord, elle peut parcourir 60 à 120 km. Au départ, lorsqu'il n'y avait qu'une seule station de recharge, deux ZESpacks étaient nécessaires pour faire l'aller-retour entre Alphen-sur-le-Rhin et Moerdijk, un pour l'aller et l'autre pour le retour. En termes d'expansion, ZES envisage de mettre en place 30 itinéraires à émissions nulles d'ici à 2030.

Batteries interchangeables et infrastructure de recharge

Un bateau part avec des conteneurs de batteries chargées et, à l'arrivée au terminal suivant, les conteneurs sont remplacés en 15 minutes seulement par des batteries entièrement chargées. Cette initiative innovante a établi une nouvelle norme pour la technologie des conteneurs d'énergie. La station de charge rapide a une capacité de 1 MWh et peut recharger simultanément deux ZESpacks en 2,5 heures. Son prix est d'environ un million d'euros et elle peut également être utilisée pour stabiliser le réseau électrique ou fournir temporairement de l'électricité à une installation. Vingt stations de recharge seront nécessaires pour couvrir le réseau néerlandais de transport par voie navigable¹¹.



Source : de Volkskrant (2021).

⁹ <https://emperium.ru/en/>.

¹⁰ <https://en.portnews.ru/news/338161/>.

¹¹ www.volkskrant.nl/nieuws-achtergrond/containers-vol-met-accu-s-vervangen-diesel-in-de-binnenvaart-hier-gebeurt-echt-iets-voor-milieu-en-klimaat-bf53e963/.

Principaux facteurs de succès

- Les batteries sont compatibles avec les bateaux neufs et existants, qui doivent être équipés d'une ligne de propulsion électrique. L'*Alphenaar* lui-même a été équipé du connecteur standard pour accueillir les ZESpacks ;
- L'interchangeabilité est une caractéristique qui était auparavant limitée aux installations fixes. Les conteneurs d'énergie peuvent être facilement remplacés et les connecteurs normalisés sont conçus pour s'adapter aux progrès de la technologie de stockage de l'énergie, ce qui garantit que le système reste à l'épreuve du temps ;
- Le modèle adopté repose sur le paiement à l'utilisation : les armateurs louent le conteneur de batteries et ne paient que l'énergie qu'ils utilisent ;
- L'accès est ouvert, ce qui permet à plusieurs fournisseurs d'utiliser les ZESpacks et les stations de charge selon diverses modalités.

La coopération entre les parties prenantes joue un rôle crucial. ZES a été fondé par ENGIE, ING (responsable du financement et du développement du système de paiement à l'utilisation), Wärtsilä (fournisseur des premiers ZESpacks, responsable de l'assemblage et des essais des conteneurs d'énergie) et le Port de Rotterdam, avec le soutien du Ministère de l'infrastructure et de la gestion de l'eau.

Source : Port de Rotterdam. Disponible à l'adresse <https://www.portofrotterdam.com/nl/nieuws-en-persberichten/eerste-emissievrije-binnenvaartschip-op-energiecontainers-in-de-vaart>. Consulté le 29 mai 2023.

H. Transport aérien

24. Le transport aérien représente actuellement environ 2,5 % des émissions mondiales de CO₂¹². Selon la Commission européenne, la demande de transport aérien devrait augmenter de plus de 300 % par rapport aux niveaux de 2005 vers le milieu du XXI^e siècle, et si aucune mesure importante n'est prise pour réduire les émissions, cela entraînera une hausse substantielle des émissions de gaz à effet de serre de l'aviation¹³. Cependant, le secteur de l'aéronautique étudie des méthodes novatrices pour intégrer la mobilité électrique. Actuellement, la mobilité électrique dans le transport aérien s'applique principalement aux petits véhicules qui peuvent fonctionner à l'électricité. Toutefois, le poids des systèmes électriques et des batteries réduit la capacité de charge utile de ces véhicules.

25. En septembre 2020, ZeroAvia, une société récemment créée, a réalisé le premier vol au monde d'un avion commercial de six places alimenté par une pile à hydrogène. Au cours de ce vol, le rayon d'action de l'appareil était similaire à celui d'itinéraires majeurs très fréquentés tels que Los Angeles-San Francisco ou Londres-Édimbourg¹⁴.

26. En ce qui concerne l'aviation commerciale, et plus particulièrement les avions de ligne à voilure fixe, la mise au point de modèles électriques hybrides avec la technologie existante présente des difficultés importantes. Le passage à la propulsion électrique dans les grands aéronefs, notamment les avions de ligne, présente de nombreuses difficultés techniques et fonctionnelles. Concevoir un avion commercial hybride ou entièrement électrique qui soit efficace est un défi redoutable en raison des limites de la densité énergétique des batteries actuelles, de la nécessité d'effectuer des vols à long rayon d'action et de la charge importante que représentent les passagers ou les cargaisons. Néanmoins, ces difficultés ne sont pas insurmontables et de nombreux experts de l'industrie aéronautique reconnaissent le potentiel de développement des aéronefs électriques et électriques hybrides. Des efforts de recherche

¹² <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-aviation#:~:text=L'aviation%20compte%202,5%25%20des%20émissions%20de%20CO2&text=La%20majorité%20des%20vols%20sont%20alimentés%20par%20le%20CO2%20lorsqu'ils%20sont%20brûlés.>

¹³ www.weforum.org/agenda/2021/07/targeting-true-net-zero-aviation/.

¹⁴ www.zeroavia.com/press-release-25-09-2020.

et de développement sont déployés dans le monde entier pour faire de l'aviation commerciale électrique une réalité.

27. Airbus a récemment dévoilé trois projets d'avions commerciaux à émissions nulles qui devraient entrer en fonction au plus tard en 2035. Ces projets comprennent un avion à turbopropulseur pouvant accueillir jusqu'à 100 passagers, un avion à turbosoufflantes d'une capacité de 120 à 200 passagers et un avion à ailes mixtes d'une capacité de 200 passagers¹⁵. Parallèlement, Boeing travaille à la certification d'un avion électrique à batterie par l'intermédiaire de sa coentreprise Wisk, et se fixe aussi pour objectif de rendre tous ses avions compatibles avec des carburants d'aviation durables à l'échéance de 2030¹⁶.

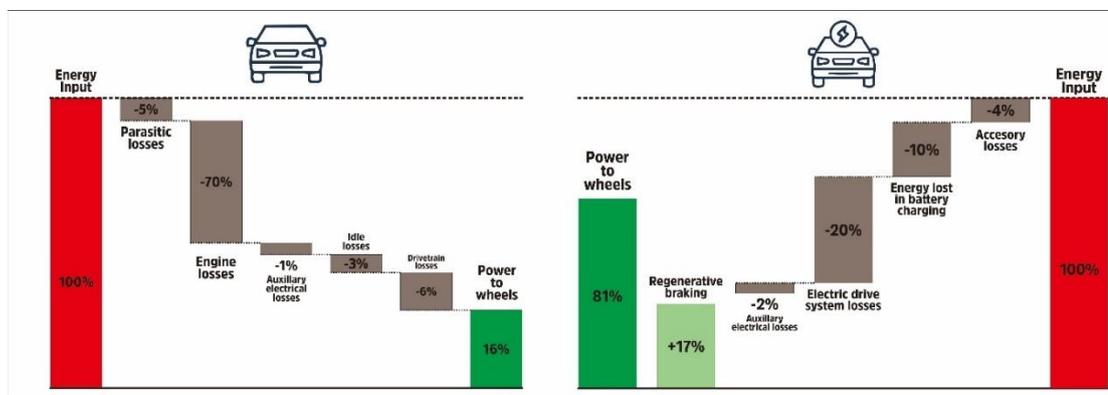
III. Batteries électriques et carburants de substitution

A. Batteries électriques

28. Les systèmes de propulsion électrique à batterie sont en voie de s'imposer comme une solution solide et durable en remplacement des sources de carburant conventionnelles dans tous les modes de transports intérieurs. Cette technologie offre des avantages importants par rapport aux autres solutions. Les batteries permettent de réduire de 100 % les émissions de gaz à effet de serre, y compris le CO₂, et de polluants nocifs, ce qui contribue à atténuer les effets des changements climatiques. En outre, les véhicules électriques à batterie sont très efficaces sur le plan énergétique, car ils permettent d'appliquer aux roues environ 80 % de l'énergie tirée du réseau électrique. Par comparaison, les véhicules à moteur à combustion interne sont cinq fois moins efficaces, en raison des pertes d'énergie subies lors de la production, du transport et de la conversion des carburants (fig. II).

Figure II

L'efficacité des véhicules électriques à batterie est cinq fois supérieure à celle des véhicules à moteur à combustion interne



Source : Auteur, d'après Energi Media (2021).

29. Si le coût initial des véhicules électriques à batterie peut être supérieur à celui des véhicules à combustible, leurs coûts de fonctionnement sont généralement inférieurs. En effet, au kilomètre parcouru, l'électricité est moins chère que les combustibles fossiles et l'hydrogène, ce qui entraîne des coûts moins élevés sur l'ensemble de la durée de vie. Toutefois, pour atteindre les objectifs de durabilité, les batteries doivent présenter des performances ultraélevées qui dépassent leurs capacités actuelles. Ces performances ultraélevées nécessitent de se rapprocher des limites théoriques en termes d'énergie et de puissance, de parvenir à une durabilité et à une fiabilité excellentes et d'améliorer la sûreté et la durabilité environnementale. En outre, pour rencontrer un succès commercial,

¹⁵ www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2020-09-airbus-reveals-new-zero-emission-concept-aircraft.

¹⁶ <https://investors.boeing.com/investors/news/press-release-details/2023/Boeing-Doubles-Sustainable-Aviation-Fuel-Purchase-for-Commercial-Operations-Buying-5.6-Million-Gallons-for-2023/default.aspx>.

les batteries doivent pouvoir être produites en série de manière rentable. Les batteries rechargeables d'une efficacité exceptionnelle pour des trajets aller-retour constituent une technologie indispensable permettant le stockage de l'énergie pour une multitude d'applications. Leur importance est également soulignée dans le pacte vert pour l'Europe. Ces batteries sont susceptibles d'accélérer le passage à une mobilité durable et intelligente, de faciliter la fourniture d'une énergie propre, abordable et sûre, et d'encourager le secteur à adopter une économie plus propre et plus circulaire (Batterie 2030+ (2022)).

B. Véhicules hybrides

30. Les véhicules électriques hybrides sont à mi-chemin entre le véhicule à moteur à combustion interne et le véhicule électrique à batterie. Certains utilisent de l'essence ou du gazole pour alimenter un générateur qui charge une batterie ou alimente un moteur électrique qui propulse le véhicule. D'autres utilisent un moteur à combustion interne pour propulser le véhicule tandis qu'un moteur électrique aide à l'accélération. Les véhicules électriques hybrides rechargeables sont des véhicules électriques hybrides dont les batteries peuvent également être chargées en branchant le véhicule sur une source d'énergie. Cela signifie qu'ils peuvent fonctionner comme des véhicules électriques à batterie ou comme des véhicules électriques hybrides.

31. Les véhicules hybrides représentent une étape importante dans la transition vers les véhicules électriques à batterie. Cette technologie a été largement adoptée en raison de ses nombreux avantages, mais il existe aussi plusieurs inconvénients à prendre en compte lorsqu'on la compare à d'autres sources de carburant de substitution (tableau 3).

Tableau 3

Avantages et inconvénients de la technologie hybride

<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
a) Meilleur rendement énergétique que les véhicules à moteur à combustion interne classiques	a) Coût initial plus élevé que celui des véhicules à moteur à combustion interne classiques
b) Moins d'émissions que les véhicules à moteur à combustion interne classiques, mais pas aussi propre que les véhicules électriques à batterie	b) Pour les longs trajets, les véhicules hybrides dépendent de leur moteur à combustion interne, ce qui annule certains des avantages environnementaux
c) Ne dépend pas totalement de l'infrastructure de recharge, contrairement aux véhicules électriques à batterie	c) La double nature des véhicules hybrides est plus complexe que celle des véhicules à moteur à combustion interne classiques et que celle des véhicules électriques à batterie, ce qui peut entraîner des coûts d'entretien plus élevés
d) Permet de parcourir sans ravitaillement en carburant des distances plus longues que les véhicules électriques à batterie	d) Bien qu'ils soient plus propres que les véhicules à moteur à combustion interne classiques, les véhicules hybrides ne peuvent pas rivaliser avec les véhicules électriques à batterie ou les véhicules électriques à pile à combustible. Ils ne tirent pas non plus pleinement parti des biocarburants renouvelables, contrairement à d'autres types de véhicules

C. Hydrogène

1. Camions à hydrogène

32. La technologie des piles à hydrogène est apparue comme une solution prometteuse pour le transport routier à longue distance, qui pose une série de défis tels que la taille du parcours, l'imprévisibilité des itinéraires, la rigidité des réglementations en matière de temps de conduite, les exigences élevées en ce qui concerne le temps de fonctionnement et la nécessité d'une grande capacité de charge utile. Pour relever ces défis, le carburant à base d'hydrogène offre plusieurs avantages, notamment une densité énergétique élevée, un ravitaillement rapide et une grande autonomie. Cette technologie consiste à convertir l'hydrogène gazeux en électricité par l'intermédiaire d'une pile à combustible qui alimente le moteur électrique du véhicule. Contrairement aux combustibles fossiles traditionnels, le seul sous-produit des piles à hydrogène est de la vapeur d'eau, ce qui en fait une solution de rechange propre et durable pour le transport routier longue distance.

33. McKinsey a prédit qu'en 2035, pas moins de 850 000 véhicules utilitaires moyens et véhicules utilitaires lourds alimentés à l'hydrogène pourraient circuler en Europe¹⁷. Cet organisme affirme également qu'en 2030, le coût total de possession d'un poids lourd parcourant 500 kilomètres par jour en Europe devrait atteindre 1,13 euro par kilomètre pour le diesel, 1,03 euro pour les camions électriques à batterie et 1,02 euro pour les camions à pile à combustible.

34. Malgré ces progrès importants, il reste un certain nombre de défis à relever pour réaliser pleinement le potentiel de la technologie des piles à combustible à hydrogène pour les transports par poids lourds. L'un des défis les plus urgents est la nécessité de disposer d'une infrastructure solide pour la production, le stockage et la distribution de l'hydrogène. Dans de nombreuses régions du monde, cette infrastructure est encore limitée, ce qui rend difficile l'augmentation de l'utilisation de l'hydrogène dans les transports par poids lourds. Il est nécessaire de développer des modèles commerciaux susceptibles de faciliter ce processus. Un autre défi majeur est le coût de la technologie des piles à hydrogène par rapport aux moteurs diesel conventionnels. Bien que ce coût ait diminué ces dernières années, il reste plus élevé que celui des moteurs diesel dans la plupart des cas. Toutefois, à mesure que la technologie s'améliore et que des économies d'échelle sont réalisées, l'écart devrait se réduire.

Encadré 2

La Suisse va de l'avant avec son parc de camions à hydrogène

La Suisse ouvre la voie à la décarbonation du transport par poids lourds en déployant des camions électriques à pile à combustible. En octobre 2022, les 47 camions Hyundai XCIENT Fuel Cell de 20 entreprises exploitant au moins un poids lourd électrique à hydrogène chacune avaient parcouru ensemble plus de 5 millions de kilomètres, à raison de plus de 10 000 km par jour à eux tous, soit une économie de plus de 4 000 tonnes d'émissions de CO₂¹⁸. Il est prévu de déployer au total 1 600 camions à l'échéance de 2025 (AIE (2022a)).

Le succès de la Suisse dans le déploiement des camions à pile à combustible peut être attribué à une combinaison de facteurs, notamment des politiques gouvernementales favorables, une infrastructure de l'hydrogène bien développée et un engagement fort de la part des acteurs du secteur. Le pays s'est fixé pour objectif que les poids lourds électriques à pile à combustible représentent 8 % des ventes d'ici à 2025 et 19 % en 2050¹⁹. Il a également adopté en 2018 la redevance sur la circulation des poids lourds liée aux prestations (RPLP), qui concerne les camions de plus de 3,5 tonnes mais dont sont exonérés les véhicules à émissions nulles (AIE (2022a)). Cet allègement fiscal devrait permettre d'économiser environ 60 000 francs suisses par camion et par an²⁰.

¹⁷ www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/global-infrastructure-initiative/voices/unlocking-hydrogens-power-for-long-haul-freight-transport.

¹⁸ <https://hyundai-hm.com/en/2022/10/15/on-the-road-together-20-hydrogen-electric-trucks-drive-the-5-millionth-kilometer-together-2/>.

¹⁹ www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/global-ev-policy-explorer.

²⁰ www.linkedin.com/pulse/switzerland-champion-hydrogen-roland-jansen/.

2. Trains à hydrogène

35. L'utilisation de l'hydrogène dans le transport ferroviaire de voyageurs commence à décoller, en particulier en Europe. L'hydrogène offre une solution pour décarboner les lignes ferroviaires diesel lorsque l'électrification est difficile et que les distances sont trop longues pour être couvertes par des trains électriques à batterie (AIE (2022a)). Des efforts sont actuellement menés pour améliorer la technologie et l'infrastructure des trains à hydrogène, car de plus en plus de pays et de régions investissent dans cette technologie. Le déploiement des trains à hydrogène dans la région de la CEE a été motivé par la nécessité de disposer d'options de transport durables et propres, en particulier sur les lignes ferroviaires non électrifiées.

36. Plusieurs pays, dont l'Allemagne, l'Autriche, l'Italie et les Pays-Bas, ont mis à l'essai le déploiement de trains à hydrogène dans des services réguliers de transport de voyageurs. L'Allemagne a ainsi fait fonctionner deux trains à hydrogène en service régulier de transport de voyageurs pendant plus d'un an et demi entre 2018 et 2020, soit plus de 180 000 kilomètres parcourus. En 2022, le pays a mis en service les 14 premiers trains à hydrogène d'une commande totale de 41 trains destinés à remplacer le parc diesel existant. L'autonomie des trains à hydrogène est d'environ 1 000 kilomètres²¹.

Figure III

Le train à hydrogène Corodia iLint d'Alstom



Source : Alstom²².

D. Autres carburants de substitution

37. Les biocarburants, dérivés de matières organiques telles que les plantes ou les déchets animaux, peuvent jouer un rôle crucial dans la réduction des émissions de GES du secteur des transports, en particulier s'agissant du transport de marchandises, car ils sont bien adaptés aux déplacements sur de longues distances. Les biocarburants sont considérés comme neutres en carbone, car les émissions de CO₂ résultant de la combustion du carburant sont compensées par le CO₂ absorbé pendant la croissance des plantes servant à produire le carburant. Le B100 réduit les émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie de plus de 50 %, et le B20 d'au moins 10 % (EPA (2014)). Les biocarburants peuvent être utilisés dans la plupart des moteurs à essence et diesel moyennant des modifications minimales. En outre, ils offrent l'avantage supplémentaire de promouvoir la demande de produits agricoles. Toutefois, il est essentiel d'être conscient de la concurrence potentielle avec les cultures vivrières et de prendre les précautions nécessaires pour éviter tout effet négatif. En conclusion, le rôle des biocarburants en complément de la mobilité électrique dans le transport de marchandises sur de longues distances doit être renforcé.

38. Les carburants synthétiques, créés par un processus chimique à partir d'une source de carbone, peuvent être utilisés dans les moteurs à combustion interne. Ces carburants, comme

²¹ <https://fuelcellsworld.com/news/friday-fallback-story-worlds-first-hydrogen-trains-enter-regular-passenger-service-july-26-2022/#:~:text=BREMER%20VORDE%20Germany%20-%20The%20world%27s%20first,of%20the%20city%20of%20Hamburg.>

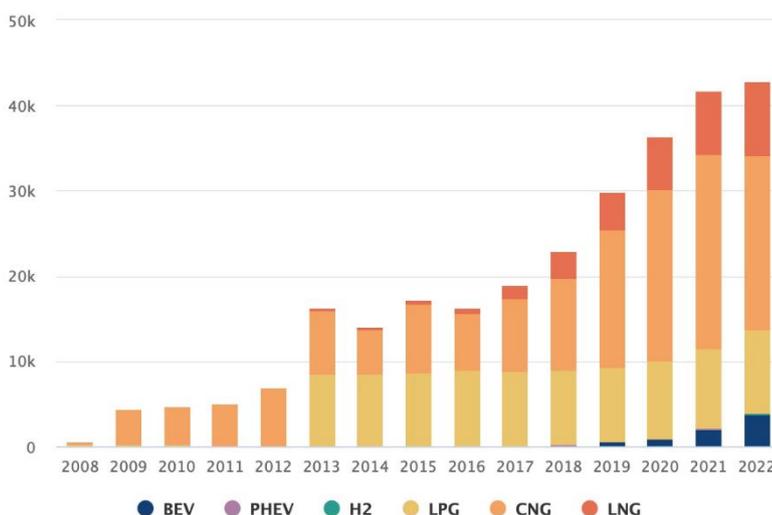
²² <https://www.alstom.com/press-releases-news/2021/6/corodia-ilint-alstom-presents-worlds-first-hydrogen-passenger-train.>

le méthanol ou l'éther diméthyle, ont généralement une empreinte carbone plus élevée que les biocarburants en raison de l'origine fossile de la source de carbone. L'utilisation de carburants synthétiques peut nécessiter de modifier de façon importante la conception des moteurs et l'infrastructure de ravitaillement.

39. Le gaz naturel devient une solution de plus en plus viable en remplacement de l'essence et du gazole grâce aux progrès technologiques. Il offre un meilleur rapport coût-efficacité, son prix étant généralement 30 % à 40 % inférieur à celui du gazole²³, ce qui explique pourquoi son utilisation s'est répandue dans plusieurs pays. Le gaz naturel comprimé (GNC) et le gaz naturel liquéfié (GNL) sont les formes les plus courantes. Les pays disposant d'importantes réserves de gaz naturel ont adopté ce gaz comme source de carburant. Le GNC est principalement utilisé pour les véhicules commerciaux et les véhicules utilitaires légers à moyens, tandis que le GNL est un meilleur substitut au diesel pour les véhicules utilitaires lourds, ce qui correspond aux indications fournies par l'Union européenne (2014), qui suggère des distances entre les points de ravitaillement : 150 km pour le GNC et 400 km pour le GNL. Dans l'Union européenne, le GNC s'est imposé comme le choix de carburant dominant sur le marché des poids lourds, suivi par le GNL. Au cours de la dernière décennie, ces deux types de carburant ont connu une augmentation significative (fig. IV).

Figure IV

Marché des véhicules utilitaires lourds dans l'Union européenne, répartition par type de carburant



Source : Observatoire européen des carburants alternatifs²⁴. Consulté le 5 juin 2023.

IV. Les véhicules électriques à batterie, l'avenir des transports intérieurs durables

40. La durabilité et l'efficacité futures des transports intérieurs reposent essentiellement sur les véhicules électriques à batterie, principalement car ils sont capables de réduire de manière importante les émissions de GES/CO₂e et les polluants nocifs, une caractéristique essentielle dans la lutte contre les changements climatiques. Leur taux d'efficacité élevé (80 % de l'énergie électrique du réseau atteignant les roues) permet aux véhicules électriques à batterie de dépasser largement les véhicules à moteur à combustion interne et les hybrides, qui sont cinq fois moins efficaces sur le plan énergétique.

²³ www.iru.org/system/files/IRU%20Position%20-%20Accelerating%20the%20decarbonisation%20of%20road%20transport%20through%20the%20faster%20update%20of%20alternative%20fuels.pdf.

²⁴ <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/transport-mode/road/european-union-eu27>.

41. Si leur coût initial est plus élevé que celui des autres véhicules à moteur, les coûts de fonctionnement des véhicules électriques à batterie sont généralement plus faibles. Cela s'explique par le fait que l'électricité est moins chère au kilomètre parcouru que les combustibles fossiles et que l'hydrogène, ce qui se traduit en fin de compte par une réduction du coût total sur la durée de vie. En outre, les progrès en cours dans la technologie des batteries visent à améliorer les performances, la durabilité, la sûreté et l'évolutivité, des facteurs essentiels pour parvenir à une production en série rentable et favoriser une économie plus propre et plus circulaire.

42. Les véhicules hybrides constituent un intermédiaire essentiel dans la transition vers les véhicules entièrement électriques, car ils combinent des éléments des véhicules à moteur à combustion interne et des véhicules électriques à batterie. Ils présentent néanmoins plusieurs inconvénients, notamment un coût initial plus élevé, une dépendance à l'égard du moteur à combustion interne pour les longs trajets, des coûts d'entretien potentiellement plus élevés en raison de la complexité du double système et, surtout, ils continuent à produire des émissions, bien qu'elles soient inférieures à celles des véhicules à moteur à combustion interne traditionnels.

43. Les piles à hydrogène constituent une évolution prometteuse pour le transport routier à longue distance grâce à leur densité énergétique élevée, des temps de ravitaillement courts et la production d'énergie propre, comme le montre l'exemple phare de la Suisse. Toutefois, des difficultés importantes liées à l'infrastructure, à la distribution et au coût doivent être réglées avant que leur potentiel puisse être pleinement exploité.

44. Les biocarburants, les carburants synthétiques et le gaz naturel sont d'autres carburants de substitution viables, chacun ayant ses points forts et ses limites. Mais leurs avantages ne surpassent pas l'impact positif profond sur l'environnement et l'efficacité économique offerts par les véhicules électriques à batterie. C'est la raison pour laquelle ces derniers, soutenus par les progrès constants de la technologie des batteries, restent les avant-coureurs d'un avenir durable pour les transports intérieurs. Il est donc urgent que les professionnels du secteur, les États et la société s'attachent à accélérer l'adoption des véhicules à batterie et le développement de la technologie de ces véhicules.

45. À la lumière de l'analyse exposée dans le présent chapitre, on peut conclure que l'électrification du secteur des transports routiers semble être la solution la plus mûre et la plus prometteuse à court terme. Compte tenu des avantages de la technologie des batteries électriques par rapport à d'autres solutions, les chapitres suivants de cette publication (que l'on trouvera dans les documents ECE/TRANS/WP.5/2023/6, ECE/TRANS/WP.5/2023/7 et ECE/TRANS/WP.5/2023/8) se concentreront sur les différents modes de transport routier électrique à batterie.
