

La propulsion propre

Un enjeu majeur dans le domaine de la mobilité durable



Sommaire

Introduction	3
Définition de la notion de mobilité durable et de propulsion propre	4
Les enjeux de la propulsion durable pour les territoires (textes, accords, lois)	5
À l'international	5
National.....	8
Régional.....	11
Local	12
Les technologies actuellement employées	13
Les types de motorisation	13
Moteurs à combustion	13
Moteurs électriques	15
Cas particuliers, la motorisation à hydrogène	17
L'hybride.....	18
Les types d'énergie.....	20
Le gaz naturel véhicule (GNV)	20
L'hydrogène	23
L'électricité.....	28
Les types de stockage.....	30
Stockage liquide	31
Stockage solide.....	32
Stockage gazeux	33
Stockage électrique	34
Les types de vecteur	36
Mer et fluvial.....	36
Terrestre	37
Aériens.....	39
Aéromobiles	40
L'analyse du cycle de vie pour la propulsion propre.....	41
Phase de production.....	42
Phase d'utilisation.....	43
Fin de vie et / ou recyclage	44
Conclusion.....	45
Les acteurs normands et d'ailleurs concourant au développement de la propulsion propre	46
Les projets en Normandie	49
Conclusion	50

Introduction

La région Normandie met en œuvre un nombre très important d'actions dans le domaine du développement durable dans le but d'assurer l'attractivité et la compétitivité du territoire. Elle s'engage à placer au cœur de ses ambitions le développement durable, elle ambitionne de devenir une "Éco Région" dans un futur proche.

Pour accompagner cet objectif de développement, des actions sont engagées par la Région Normandie qui dispose d'atouts. Les actions peuvent être : des actions innovantes pour promouvoir de nouvelles façons de penser de la part de la population comme le simple tri sélectif, des actions innovantes sur la mobilité durable impliquant des changements matériels importants et bien d'autres encore.

En s'appuyant sur les textes, les lois et règlements nous verrons que la Région met en place des plans et schémas afin de mener à bien le projet portant sur le développement durable. Elle s'inscrit pleinement dans la mise en place de modes de déplacements plus vertueux.

Dans le document présent, nous dresserons en premier lieu une liste de rappels des textes réglementaires ayant un lien avec la mobilité durable. Puis nous définirons le terme de « propulsion propre ». Dans un second temps, nous réaliserons une présentation des différentes technologies proposant des solutions tournées vers une mobilité plus propre. Ensuite nous examinerons les types d'énergies moteurs utilisés. Pour compléter ce panel, nous tenterons une approche succincte des différents moyens de stockage pour chaque énergie moteur utilisée.

Enfin, les vecteurs de propulsion seront présentés selon leurs voies de destination : terre, air et mer.

En dernier lieu, nous aborderons les acteurs présents en Normandie, leurs projets en cours et à venir. Grâce à des entretiens individuels, nous avons pu établir un point de situation, certes partiel, mais intéressant sur la situation normande. Enfin, une partie portant sur l'analyse du cycle de vie apportera un éclairage assez parlant sur la propulsion propre.

Le document réalisé ici s'adresse avant tout au public et aux décideurs pour les aider à se forger un avis personnel construit sur la problématique de la propulsion propre. Ce document n'a pas pour objectif d'être exhaustif, il est par nature évolutif tant la législation comme les avancées technologiques sont nombreuses et régulières dans ce domaine.

Ce document a été réalisé par Christopher HERAULT lors de son stage à la DREAL de Normandie, le projet a été tutoré par Wilfried DEHENRY chargé de mission DREAL. Le travail réalisé par le stagiaire a simplement été cadré. Aussi le stagiaire a pu librement exposer ses recherches, ses analyses et ses conclusions en apportant la perception de la nouvelle génération sur la propulsion propre.

Définition

de la notion de mobilité durable et de propulsion propre

Pour l'OCDE la définition de la mobilité durable retenue est la suivante :

« Il s'agit d'une mobilité qui ne met pas en danger la santé publique et les écosystèmes, respecte les besoins de transport tout en étant compatible avec une utilisation des ressources renouvelables à un taux inférieur à celui nécessaire à leur régénération et une utilisation des ressources non renouvelables à un taux inférieur à celui nécessaire à la mise au point de ressources renouvelables de remplacement ».

La mobilité durable consisterait à se déplacer en cherchant à diminuer l'impact des moyens de transport utilisés sur l'environnement.

Parler de mobilité durable mène alors spontanément à s'intéresser à l'impact environnemental des déplacements :

- ▶ le coût carbone,
- ▶ le coût énergétique,
- ▶ le coût en polluants atmosphériques et polluants environnementaux,
- ▶ le coût sur la biodiversité.

La notion de durabilité de l'objet permettant cette mobilité apparaît nécessaire à prendre en compte. Il s'agit donc de sa durée d'utilisation potentielle, de son cycle de vie partant de sa conception, puis de sa fabrication, de son utilisation jusqu'à son recyclage final.

Dans la conception française, trois notions semblent s'intégrer dans ce schéma de pensée : la notion économique, la notion environnementale et la notion sociétale.¹

Une mobilité durable serait donc une mobilité respectueuse de l'environnement.

Traditionnellement, pour le secteur du transport, la propulsion désigne un véhicule où les roues arrières sont motrices mais, pour notre étude, le mot propulsion sera utilisé comme le mode de mise en mouvement d'un corps ou d'un vecteur. Nous parlerons alors de « **propulsion propre** » .

Une « propulsion propre » s'inscrirait dans la démarche de mobilité durable et serait donc une composante d'une mobilité qui répond aux besoins en déplacement de tous et cela sans compromettre les capacités futures tant sur le plan environnemental que sur le plan énergétique.

Pour notre part, nous cantonnerons volontairement notre étude à une analyse technique. Ces moyens de « propulsion propre » se distinguent principalement par trois éléments : tout d'abord par le type de vecteur utilisé, puis en second lieu par le type de motorisation inséré dans un vecteur, enfin par le type d'énergie utilisé pour faire fonctionner le moteur et permettre le déplacement du vecteur. L'objet de notre étude se focalisera enfin sur cette troisième partie, à savoir les **types d'énergie nécessaires à la propulsion**.

1- www.avise.org/articles/mobilite-durable-de-quoi-parle-t-on

Les enjeux

de la propulsion durable pour les territoires
(textes, accords, lois)

À l'international



Les COP² (Conference Of Parties) : il s'agit des conférences internationales portant sur le climat qui réunissent les États engagés depuis 1992 grâce à la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques³ (CCNUCC). Ces COP sont composées d'un total de 195 pays ainsi que l'Union Européenne ayant pour objectif de faire le point sur l'application de la Convention et y négocier de nouveaux engagements.

Nous sommes actuellement (2020) à la 25^e conférence et elle est issue d'un long processus de négociations internationales portant sur le climat.

En premier lieu, en 1992, avec le Sommet de la Terre⁴, les états prennent connaissance et sont conscients de l'existence du changement du climat ayant pour origine l'activité humaine et s'engagent donc à lutter contre ce problème à travers une convention internationale.

Quelques années plus tard, en 1997, le protocole de Kyoto⁵, qui est appliqué à travers le monde, engage les pays industrialisés à réduire de 5 % les émissions de gaz à effet de serre (GES).

En 2009, la Conférence de Copenhague met en place un engagement des pays à limiter le réchauffement de la planète à plus de 2°C sans pour autant donner d'objectifs contraignants pour y parvenir.

Enfin, en 2014, la Conférence de Lima permet de préparer les négociations de 2015 qui doivent se traduire par un accord final à Paris.

C'est donc le 12 décembre 2015, à la fin de la COP21, que l'accord de Paris est adopté, et entre en vigueur le 4 novembre de l'année suivante.

Cette conférence se démarque des autres, car elle débute le programme préparé en amont depuis des décennies et met en place les actions contraignantes pour les pays pour la réduction des gaz à effet de serre. L'accord de Paris⁶ définit à travers des articles, des points bien précis quant à la possible modification des objectifs prévus pour chaque pays et cela dans l'objectif d'augmenter le niveau d'ambition de l'accord. Elle prévoit de limiter l'augmentation de la température moyenne du globe à 2°C par rapport à l'ère préindustrielle et de ramener cette limitation à 1,5 °C grâce au développement durable et la lutte contre la pauvreté. Le plafonnement

À l'international	5
National	8
Régional	11
Local	12

2- <https://unfccc.int/process/bodies/supreme-bodies/conference-of-the-parties-cop>

3- <https://unfccc.int/fr>

4- https://fr.wikipedia.org/wiki/Sommet_de_la_Terre

5- https://fr.wikipedia.org/wiki/Protocole_de_Kyoto

6- https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_fr

ainsi que l'équilibre des émissions anthropiques sont des points majeurs de cet accord. Les pays développés auront pour mission de montrer la voie en assumant des objectifs de réduction d'émissions en concordance avec leur niveau d'échelle économique.

L'accord demande aussi à chaque partie de faire un rapport sur l'évolution des ambitions et des émissions en montrant les systèmes mis en place afin de modifier ou non les possibles mesures pour tenir les ambitions fixées. Les pays développés ont demandé à aider financièrement les parties en développement afin de mener à bien leurs obligations définies par la Convention, les autres pays sont incités à faire de même à titre volontaire bien entendu.

En termes de budget, les pays développés communiqueront, tous les deux ans, des informations sur les budgets disponibles pour l'action climatique, de façon à aider les pays dans le besoin afin d'amortir le coût et obtenir un équilibre entre l'adaptation et l'atténuation. En contrepartie, les pays en développement doivent communiquer les ressources dont ils ont besoin et ce qu'ils ont reçu, quelle que soit leur nature.

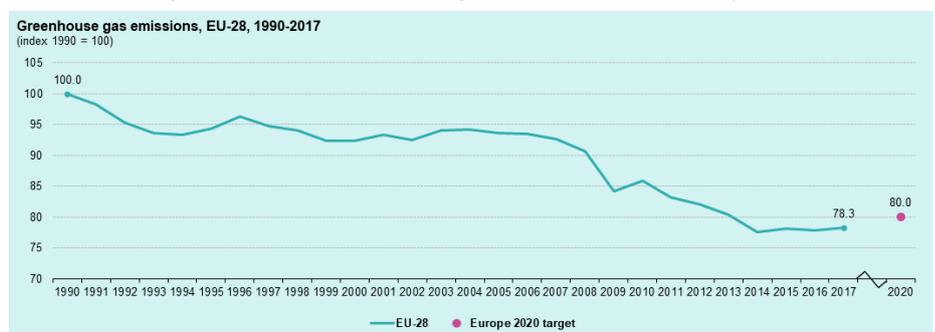
La COP25 est dans la continuité de ce qui a été énoncé précédemment et apporte une partie plus technique. La conférence qui s'est déroulée du 2 au 13 décembre 2019 avait pour mission d'être le déclencheur de mesures pour réduire la pollution à travers le monde. Finalement, les mesures ont porté sur une limitation du réchauffement climatique en dessous de 3 °C. On retiendra de cette conférence, où 195 pays ont participé, qu'un accord avec l'Europe (sauf pour la Pologne) portant sur la neutralité carbone d'ici 2050 a été établi. Cet accord fera partie d'un ensemble de 49 autres mesures soutenues dans le plan appelé « Pacte Vert⁷ » Européen. Plus globalement encore, 500 grandes entreprises s'engagent dans le même objectif de neutralité carbone d'ici 2050.

À l'échelle continentale, nous retrouvons la stratégie 2020⁸ de l'Union Européenne qui porte ses actions sur plusieurs domaines : l'emploi, la lutte contre la pauvreté, l'éducation et l'enseignement supérieur, le taux d'investissement dans la recherche et le développement mais aussi dans la lutte contre le changement climatique et l'efficacité en énergie. Ce dernier point a pour objectif une croissance durable, une économie plus efficace dans l'utilisation des ressources et agissant pour une réduction des gaz à effet de serre. Les objectifs en chiffre portent sur la stratégie « 20-20-20 » qui est de réduire de 20 % les émissions de gaz à effet de serre par rapport aux années 90, arriver à une part de 20 % dans l'énergie renouvelable et augmenter de 20 % l'efficacité énergétique dans l'Union Européenne.

Actuellement, les chiffres de ces objectifs ne sont pas encore dévoilés dans leur totalité, mais des mesures de milieu de parcours ont été effectuées, des graphiques nous permettant de situer les objectifs et de vérifier si les projets demandés sont en bonne voie ou non par rapport aux exigences fixées par ce pacte.

En analysant ce graphique, nous pouvons voir que l'objectif défini par l'Union Européenne de réduire de 20 % les émissions de GES par rapport aux années 1990 est sur la bonne voie. Avec une possible avance en vue du score de 78,3 % en 2017 donc une réduction de 21,7 %, ce qui est plus que positif, et permet de remonter les ambitions en portant à 30 % la diminution d'émissions de ces GES.

Figure 2 : Part d'émissions des gaz à effet de serre en Europe



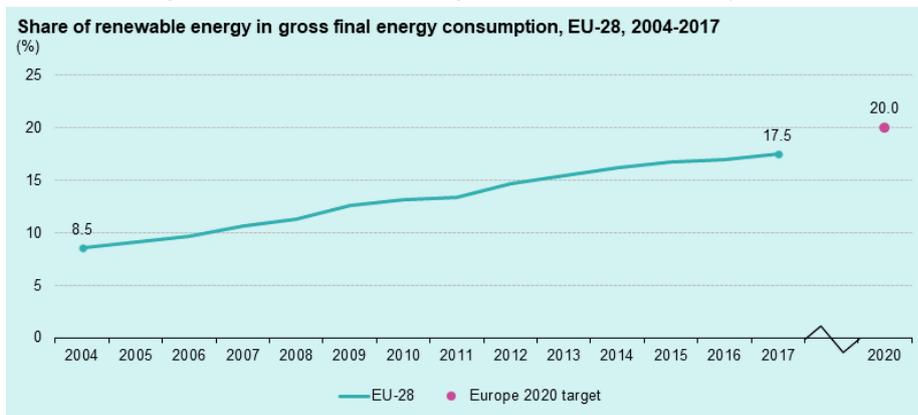
Note: Total emissions, including international aviation and indirect CO₂, but excluding emissions from land use, land use change, and forestry (LULUCF).
Source: EEA, Eurostat (online data code: i2020_30)

Source : eurostat

7- <https://www.touteurope.eu/actualite/pacte-vert-europeen-le-programme-ecologique-de-la-nouvelle-commission.html>
8- <https://ec.europa.eu/eu2020/pdf/COMPLET%20FR%20BARROSO%20-%20Europe%202020%20-%20FR%20version.pdf>

Figure 2 : Part d'émissions des gaz à effet de serre en Europe

Concernant la part des énergies renouvelables, celle-ci semble être juste pour arriver à 20 % de la totalité de l'énergie finale consommée dans l'Union Européenne. De 2004 à 2017, seule une augmentation de 9 % en 13 ans (8,5 % à 17,5 %) soit une augmentation de 0,7 % chaque année, mais si nous prenons en compte la mobilisation actuelle des entreprises au sein des énergies renouvelables, l'augmentation pourrait atteindre son objectif de justesse.

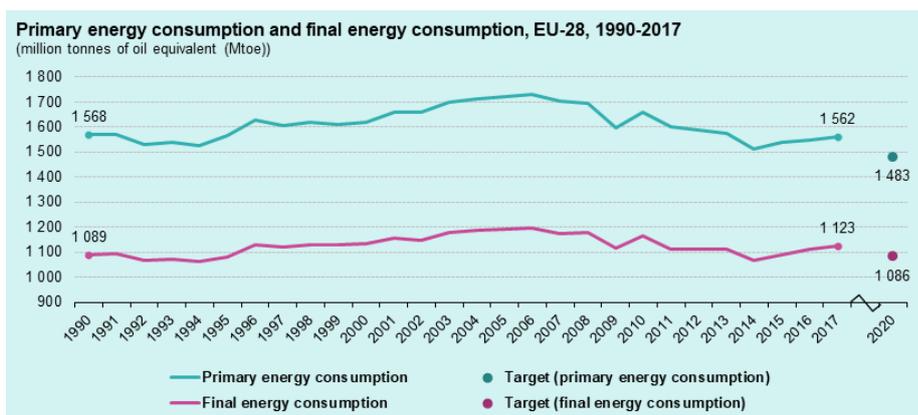


Source: Eurostat (online data code: t2020_31)

Source : eurostat

L'un des objectifs de cette stratégie est aussi d'augmenter de 20 % l'efficacité énergétique, c'est-à-dire utiliser de façon plus efficiente l'énergie brute disponible pour l'énergie finale utilisée.

Figure 4 : Consommation d'énergie primaire et finale en Europe



Source: Eurostat (online data codes: t2020_33 and t2020_34)

Source : eurostat

Ces ambitions sont prolongées et actualisées grâce à la nouvelle stratégie 2030 de l'Union Européenne, reprenant les bases de celle de 2020 et avec des ambitions encore plus importantes.

Cette stratégie a mis en place 17 points portant sur le développement durable, appelés ODD⁹ (Objectif de Développement Durable). Ces points reprennent les différentes thématiques de la stratégie et permettent de mieux comprendre comment arriver aux ambitions visées par l'Union Européenne à travers ces objectifs.

OBJECTIFS DE DÉVELOPPEMENT DURABLE



Figure 5 : Les 17 objectifs de développement durable de l'Europe

9- <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/objectifs-de-developpement-durable/>

Les objectifs pour 2030 se concentrent sur le mode de vie d'un citoyen européen, à savoir la mise en place de l'économie circulaire et de sa standardisation, qui est un moyen de conception durable et soucieux de l'environnement, prenant en compte avant, pendant, et après la vie d'un objet, son impact environnemental.

En ce qui concerne la mobilité, la stratégie prévoit d'atteindre 40 % de réduction des émissions des GES d'ici 2030 par rapport à 1990. Les mesures principales s'orientent donc vers la diminution de ces émissions tout en continuant à garder la forte demande de mobilité que nous connaissons actuellement. La stratégie prévoit donc d'inciter les entreprises européennes à investir dans des transports propres quels que soient les domaines : routier, maritime ou aérien. La réduction des émissions est aussi impactée par l'utilisation des technologies numériques, la navigation par satellite, notamment pour le transport aérien (trouver le chemin le plus court et le moins polluant en fonction de la densité de l'atmosphère, du sens des vents ou la vitesse...) et routier (éviter les embouteillages par exemple, choisir un autre mode de transport). La stratégie a placé les villes en première ligne pour accomplir ces objectifs. Ces villes ont un rôle important dans la transition énergétique : intégrer les structures adéquates pour les différentes technologies de mobilités, satisfaire les demandes et les besoins en termes de déplacement au sein de la ville en fonction des différents flux et horaires, et intégrer tout cela dans l'environnement urbain. Cela se traduit par l'utilisation plus importante des outils numériques, l'automatisation afin de réduire le temps susceptible d'être perdu et, en même temps, étudier les flux de mobilité pour parvenir à résoudre les problèmes de congestion en diversifiant les chemins à prendre pour arriver d'un point A à un point B.

Bien que l'objet principal de la réduction des émissions soit focalisé sur l'utilisation de la mobilité, il faut aussi prévoir en amont la fin du cycle de vie des systèmes¹⁰. L'Union Européenne encourage donc de concevoir et fabriquer des véhicules exempts de substances dangereuses pour améliorer le rendement de recyclage et donc faciliter la réutilisation des matériaux pour fabriquer de nouveaux produits.

Un exemple concret de l'application de cette stratégie à travers le système de mobilité durable est la suivante : accroître le taux de collecte et de recyclage des batteries des véhicules électrifiés dans toute l'Union Européenne permettrait de réduire la dépendance des matériaux importés et donc réduire indirectement les émissions de GES.

Interconnecter les différents pays de l'Union est aussi une ambition de la stratégie, grâce aux infrastructures intelligentes, durables, sûres et sécurisées. Cela permettra de réduire les coûts supplémentaires pour accéder d'un service à l'autre, d'avoir un système unique pour tous et donc plus simple, dans le but d'optimiser les demandes de déplacement pour finalement réduire son impact sur l'environnement et sur la qualité de l'air : deux bus partiellement chargés seront plus polluants qu'un bus complet.

National

En France, les lois mises en place pour la mobilité durable s'appuient donc sur les objectifs et ambitions cités plus haut et permettent d'encadrer des points importants à mettre en place pour arriver au terme de ces objectifs. Des textes permettent de coordonner les différentes régions du pays pour arriver à un résultat concret et ambitieux pour le réchauffement climatique.

Les lois Grenelle¹¹ (promulguée en 2009) et 2¹² (promulguée en 2010) reprennent certains points, plus particulièrement sur la partie transport, que nous allons étudier.

Concernant le texte de 2009, les objectifs sont similaires aux lois internationales, c'est-à-dire une réduction de 20 % des émissions de GES par rapport aux années 1990. L'État français de son côté veillera à réduire les pollutions et nuisances apportées par les différentes mobilités et mettra en œuvre des dispositifs pour favoriser le changement de comportement des usagers vers une utilisation plus responsable au niveau écologique. De plus, elle incitera les entreprises évoluant dans le domaine des transports à renouveler leurs flottes et améliorer leurs performances environnementales, en plus de soutenir les projets innovants visant à réduire les émissions de GES. Le dimensionnement des réductions de pollutions et nuisances sera calculé par rapport aux chiffres obtenus par des relevés effectués tous les ans par l'État et les entreprises.

10- https://disciplines.ac-toulouse.fr/sii/sites/sii/files/techno_college/cycle4/fc-cycle4/otscis/otscis11-3_cycle-de-vie.pdf

11- <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000020949548>

12- <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000022470434&categorieLien=id>

Pour favoriser l'utilisation du transport multimodal et son développement, les capacités routières seront amenées à être limitées après des études, sur les points de congestion, sur la sécurité routière afin de limiter l'impact environnemental dans les régions urbaines. De l'autre côté, les projets des grands itinéraires autoroutiers seront soutenus et orientés vers le respect des normes portant sur le développement durable et cela dans les meilleurs délais.

En ce qui concerne le transport de marchandises, l'État devrait prioriser le développement des infrastructures du domaine fluvial, ferroviaire et maritime, car elles représentent une part importante dans l'accomplissement de la réduction des émissions de GES. Les moyens de transport de type non-routiers et non-aériens sont incités à faire évoluer leur part d'utilisation de 14 % à 25 % à l'échéance 2022.

Une solution alternative soutenue par l'État est celle du réseau ferroviaire qui devrait être modernisé et un développement d'autoroutes ferroviaires pour les longs trajets et une augmentation de la fréquence des trains car une utilisation de transport de marchandises sur le domaine routier équivaut à 6 fois l'utilisation du transport de marchandises sur le domaine ferroviaire.¹³

Le réseau fluvial, quant à lui, devrait faire l'objet d'un plan de modernisation et de restauration notamment sur le canal Seine-Nord-Europe, permettant une économie de près de 250 000 tonnes de CO₂ par an. La modernisation de la flotte existante et la réduction de la vitesse des bateaux sont des solutions de réduction des émissions.

Pour le réseau routier, il est demandé aux constructeurs et entreprises de poids lourds d'améliorer les performances, plus particulièrement sur la consommation de carburant. Cela se fera par l'encouragement de la pratique de l'écoconduite, la mise en place des péages sans arrêt et l'affichage sur les prestations de transport des probables émissions de GES.

Les points clés de cette loi pour les transports de voyageurs sont de diminuer l'utilisation des hydrocarbures fossiles, diminuer la pollution atmosphérique et les nuisances, réduire les émissions de GES, et accroître l'efficacité énergétique en optimisant l'utilisation des différents transports pour chaque demande de mobilité. Cela se fera par l'organisation du système de transport multimodal, privilégiant tout de même les transports ferroviaires, maritimes et fluviaux en fonction de la pertinence.

Le développement de l'usage des transports collectifs est aussi un point clé, notamment dans les zones interurbaines et périurbaines où les infrastructures prioritaires seront axées sur le domaine ferroviaire : conserver les lignes ferroviaires désaffectées devrait être favorisé pour permettre une seconde vie de ces dernières, soit en utilisation pour le transport de marchandises, soit pour le transport en commun. Le projet **Saint-Sever Nouvelle Gare** (www.saint-sever-nouvelle-gare.com) est un exemple de l'application de la loi en utilisant les lignes déjà mises en place mais désaffectées de nos jours, afin de concevoir un quartier autour d'une nouvelle gare d'agglomération et d'une nouvelle ligne Paris Normandie.

Pour le secteur aérien, une réduction de 50 % de consommation de carburant par passager-kilomètre est demandée pour horizon 2020, de 80 % pour les émissions d'oxydes d'azote et 50 % de moins pour le bruit perçu. Pour arriver à ces chiffres, l'État français intensifie ses efforts dans la recherche et le développement dans le domaine de l'aéronautique civile, l'encouragement des citoyens à choisir un autre moyen de transport en favorisant le train, et en réduisant la distance des trajets aériens et les temps d'attente par ces derniers. En interne, les entreprises développent des procédés de rupture technologique en produisant du bio kérosène et en améliorant le rendement des propulseurs afin d'assurer les contraintes établies par les accords internationaux.

La loi Grenelle 2 retranscrit ces points évoqués et modifie quelques codes, la plupart portant sur le domaine et l'environnement et l'urbanisme, la partie transport n'est pas concernée au point de modifier les points établis. Ce texte est surtout la mise en application de la précédente et met en place les normes devenues obligatoires à la date de sa promulgation.

La stratégie nationale pour la transition écologique vers un développement durable¹⁴ (SNTEDD) structure les différents objectifs de l'ensemble des lois citées plus haut, et a pour principal modèle la COP21, car cette stratégie en fait la représentation de celle-ci à l'échelle nationale. Elle permet de distribuer aux différents ministères les tâches pour accomplir les missions en termes de développement durable et de transition écologique à travers 9 grands axes reposant sur les 17 Objectifs de Développement Durable (ODD).

13- Voir le rapport des chiffres clés du transport « édition 2020 » sur www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr

14- <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/strategie-nationale-transition-ecologique-vers-developpement-durable-2015-2020>

Cette stratégie met en avant des lois orientées sur la conscience du développement durable et notamment la loi sur la transition énergétique pour la croissance verte¹⁵. Cette loi fixe les objectifs et met en place les outils mis à disposition des différents acteurs en France quels qu'ils soient : citoyens, entreprises, territoires... pour notamment contribuer plus efficacement et rapidement à la lutte contre le réchauffement climatique, améliorer la santé publique et protéger davantage la planète. Il s'agit aussi de favoriser un pouvoir d'achat supplémentaire aux citoyens en réduisant les charges grâce aux programmes de rénovation des bâtiments et l'accès plus abordable aux transports propres. Cela apportera en plus une meilleure qualité de vie et une croissance dite « verte ».

Récemment, le projet de loi sur l'orientation des mobilités¹⁶ fait un effort sur la mobilité et plus particulièrement les transports en commun. C'est une politique qui repose sur 4 grands défis qui sont les suivants :

- ▶ le manque de solutions de mobilités dans de nombreux territoires, entretenant un sentiment d'assignation à résidence,
- ▶ l'urgence concernant le climat de l'environnement, qui appelle à changer le comportement de tous,
- ▶ une politique d'infrastructure absente pour les grands projets et non financée depuis des dizaines d'années,
- ▶ la révolution de l'innovation et des pratiques, qui constitue une opportunité formidable.

Cette loi récente propose donc des solutions visant à améliorer la mobilité au quotidien des citoyens français et cela dans tous les territoires :

- ▶ **apporter** des solutions pour sortir les citoyens de la dépendance de l'usage individuel de la voiture. Cela en supprimant les zones où la seule option pour se déplacer est la voiture par le biais de points de transports collectifs, le but étant de remplir au maximum les véhicules personnels et réduire la congestion des réseaux routiers en ville et des grands axes,
- ▶ **accélérer** le développement des différentes technologies et des solutions de mobilité,
- ▶ **réussir** la transition écologique en permettant aux employeurs de verser jusqu'à 400 euros par an aux salariés utilisant un moyen de mobilité comme le vélo ou le covoiturage pour les déplacements domicile-travail. La loi permettra aussi d'accélérer le renouvellement des parcs de véhicules en ayant pour objectif de multiplier par cinq les ventes de voitures électriques à horizon 2022 et stopper complètement la vente de voitures émettant des GES d'ici 2040. En ce qui concerne la qualité de l'air, le déploiement des zones à faibles émissions (ZFE) sera effectif en priorité pour les métropoles les plus polluées,
- ▶ **construire** une programmation des infrastructures au service des transports du quotidien afin de sortir des promesses d'investissement dans les transports non financés et définir de façon claire, et surtout sincère, la politique d'investissement sur les dix années à venir.

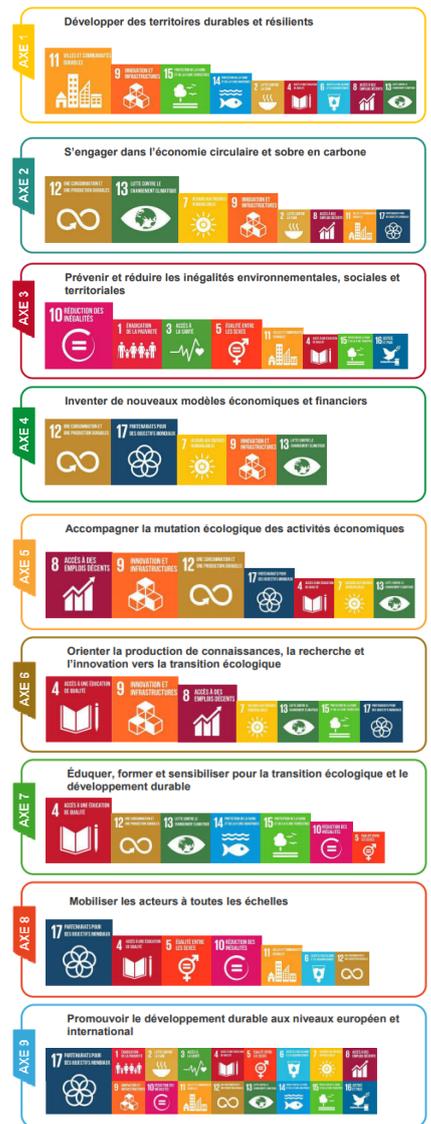


Figure 5 : Les 17 objectifs de développement durable de l'Europe

15- <https://www.ecologique-solaire.gouv.fr/territoires-energie-positive-croissance-verte>

16- <https://www.vie-publique.fr/loi/20809-loi-du-24-decembre-2019-dorientation-des-mobilites-lom>

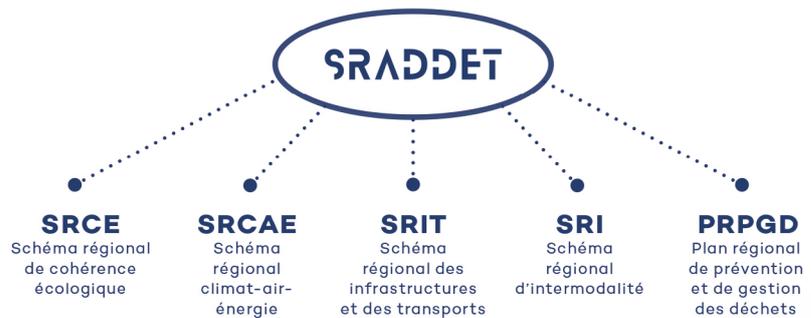
Avec un total de 13,4 milliards d'euros sur cinq ans, reposant sur cinq programmes qui sont :

1. l'entretien et la modernisation des réseaux ferroviaires, routiers aux fluviaux,
2. la désaturation des grands nœuds ferroviaires,
3. la décongestion des voies routières en villes et territoires ruraux,
4. le développement des mobilités propres et partagées au quotidien,
5. le report modal dans le transport de marchandises.

Régional

Les régions, aiguillées par les directions régionales de l'État, disposent d'un schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires appelé SRADDET¹⁷ qui regroupe plusieurs schémas existants comme le schéma régional climat air énergie, le schéma régional des infrastructures et des transports appelés SRIT, le schéma régional de l'intermodalité (SRI) et le plan régional de prévention et de gestion des déchets (PRPGD).

Figure 8 : Organigramme du contenu du SRADDET



Source : Quelle Normandie pour demain ? SRADDET, Région Normandie, N.D.

Grâce à ce contenu, les directives sont adaptées selon les spécificités d'une région et donc chaque région possède des directives adaptées. Par exemple, la région Normandie avec sa longue façade maritime pourrait s'orienter vers des directives portant sur le secteur maritime.

Pour le cas de la région Normandie, le SRADDET a été adopté en décembre 2019 et va pouvoir mettre en place des actions sur la mobilité durable au cours de l'année 2020. Il a pour but d'améliorer l'accès aux services et augmenter les complémentarités entre les zones urbaines et rurales afin d'apporter un développement équilibré des territoires sur l'ensemble de la région. Le principe de l'intermodalité est l'un des grands traits visés par le SRADDET normand, afin de réduire les congestions et faciliter le déplacement des citoyens dans notre région. Le numérique semble être un moyen privilégié pour proposer des alternatives ou des complémentarités sur les besoins de mobilité en la Normandie. La définition d'itinéraires routiers et portuaires, la définition d'une logistique connectée et durable, la mise en place d'une évolution du système d'acheminement des marchandises en favorisant le transport ferroviaire ou fluvial sont autant de points visés par le schéma et il devrait donc permettre de diminuer le niveau d'exposition des habitants aux pollutions de l'atmosphère.

En plus des services de l'État DDT(M) et DREAL, un acteur majeur aide à la réalisation de ces objectifs : l'Ademe¹⁸. Il s'agit d'un organisme public sous tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation. Cet organisme est très important car il a pour vocation de convaincre et mobiliser et sensibilisation au niveau régional mais aussi locale (pour des particuliers comme pour des professionnels), de conseiller (pour adapter les différents choix face aux attentes des projets) et aider à la réalisation des projets en déployant tous types de soutien financier dans les domaines qui touchent à l'économie des ressources et de la lutte contre le réchauffement climatique.

Un exemple concret d'un projet réalisé grâce à l'intervention de l'Ademe est l'implantation de **vélos à hydrogène¹⁹ dans le département de la Manche, à Saint-Lô** (www.france3-regions.francetvinfo.fr) et Cherbourg. Ce projet est une première mondiale. Le coût du projet s'élève à près d'un million d'euros et a été financé par les collectivités

17- <https://www.normandie.fr/le-sraddet>

18- <https://www.ademe.fr/lademe/presentation-lademe>

19- <https://france3-regions.francetvinfo.fr/normandie/nord-cotentin/cherbourg-cotentin/premiers-velos-hydrogene-roulent-saint-lo-manche-1383423.html>

locales et par l'organisme. L'idée du projet étant de proposer un nouveau mode de déplacement propre, durable et novateur. Le vélo à hydrogène possède de nombreux points forts notamment sur son autonomie (100 km) et son temps de rechargement quasi immédiat (30 à 45 secondes). Utilisant la technologie de la pile à combustible, l'énergie produite est donc de l'électricité et n'émet aucun gaz polluant. La technologie étant nouvelle d'autant plus qu'elle doit être très compacte, le seul frein au projet est son coût mais l'entreprise qui fournit les vélos explique pouvoir baisser de moitié le prix unitaire dans les années à venir.

Local

Localement, la mobilité²⁰ en France est régie par différents niveaux de collectivités, intercommunalités et régions. Le ministère chargé des transports a en charge l'élaboration et la mise en œuvre du cadre juridique des autorités organisatrices de la mobilité (AOM) et des services qu'elles mettent en place, sur les plans institutionnels et financiers.

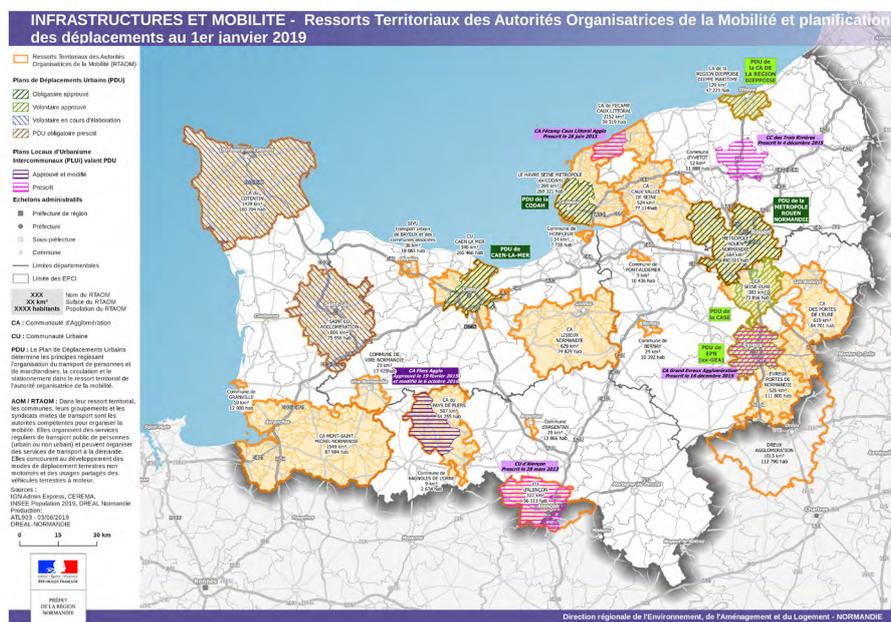
Les communes, les groupements de communes, la métropole de Lyon et les syndicats mixtes de transports sont les autorités compétentes pour l'organisation des transports urbains. Elles gèrent les transports collectifs sur leurs territoires respectifs, baptisés ressorts territoriaux. Ces autorités organisatrices de la mobilité (AOM) organisent des services réguliers de transport public de personnes, y compris des services de transport scolaire sur ces mêmes ressorts territoriaux, et peuvent organiser des services de transport à la demande. La notion de ressort territorial, qui se substitue à celle de périmètre de transport urbain, antérieurement en vigueur, est issue de la loi du 27 janvier 2014 de modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles, dite loi MAPTAM.

Depuis le 1^{er} janvier 2017, la Région est l'autorité compétente pour l'organisation des transports collectifs non urbains, réguliers ou à la demande. Initialement partagée avec le Département, cette compétence est devenue exclusivement régionale à la suite la loi du 7 août 2015 portant nouvelle organisation territoriale de la République, dite loi NOTRe.

L'exploitation des services de transport collectif non urbains est assurée soit directement par la Région soit par les entreprises publiques ou privées qui ont passé avec elle une convention à durée déterminée après mise en concurrence. Il faut toutefois noter que le transport ferroviaire ne peut aujourd'hui être assuré que dans le cadre d'un conventionnement avec SNCF Mobilités tant que cette dernière en garde le monopole, dans l'attente de la mise en œuvre du quatrième paquet ferroviaire adopté par l'Union Européenne, en décembre 2016.

La Région est le chef de file de « l'intermodalité et de la complémentarité entre les modes de transports ».

Figure 10 : Carte des AOM en Normandie (Source : DREAL)



20- A partir de la source de www.ecologie-solaire.gouv.fr " L'organisation de la mobilité en France "

Les technologies

actuellement employées

Les types de motorisation

Moteurs à combustion

Un moteur thermique est un moteur qui permet de délivrer une force capable de déplacer un mobile. Cette force est la conséquence de la combustion d'un carburant comme l'essence ou le diesel, le kérosène, le charbon ou l'hydrogène. Un moteur thermique produit donc une force, soit mécanique (couple moteur), soit de poussée (moteur à réaction) grâce à la combustion interne ou externe de carburant. Cette force produite servira à propulser un véhicule, à faire voler un avion ou même produire secondairement de l'électricité via l'entraînement d'un alternateur. Les rendements moteurs sont en moyenne de 35 %, et de quelques pourcentages en plus pour les dernières générations de moteur, ce qui permet d'atteindre les 40 % environ.

Moteurs à combustion interne

Dans notre étude, le moteur à combustion interne est décrit comme une technologie mature. Il a cependant des limites comme son faible rendement, son bruit, et une émission de gaz à effet de serre et de polluants atmosphérique très importants.

Moteurs à explosion

Le moteur à explosion, plus communément appelé moteur thermique, est une technologie apparue dès 1690 par l'inventeur Français Denis Papin qui eu l'idée de créer une machine appelée cylindre-piston vapeur, fonctionnant grâce à de la vapeur issue d'une chaudière. Cependant, sa découverte se révéla instable et l'idée fut abandonnée à la suite des problèmes rencontrés notamment sur les pertes de chaleur.

L'idée fut reprise près de 2 siècles plus tard avec Étienne Lenoir qui utilisa, cette fois-ci, le gaz de ville comme carburant. L'inventeur belge présenta, en 1860, un cylindre moteur composé des éléments que nous retrouvons aujourd'hui sous la forme plus ou moins similaire : piston, bielle, arbre coudé, etc. Le moteur thermique fait donc son apparition et sera utilisé dès l'année suivante dans des automobiles et des bateaux. L'Allemagne découvre cette invention et deux ingénieurs amélioreront ce moteur en proposant un moteur à 4 temps, produisant un meilleur rendement (<http://super-soupape.com/>).

L'utilisation du gaz ou de l'essence est donc indifférente sur ce type de motorisation. Les infimes différences se trouvent dans l'injection du carburant²¹ afin de créer l'explosion nécessaire au mouvement des différentes parties du moteur.

Le fonctionnement global des moteurs à explosion repose sur des cycles de thermodynamique théoriques appelés cycles de Beau de Rochas, caractérisant les 4 temps ou mouvements d'un piston dans un moteur. Il

21- Les modifications à apporter sont l'injection du carburant, le stockage, et le système de sécurité des gaz.

comprend, en premier lieu, l'admission où le mélange carburant / air est injecté dans le cylindre. Ensuite, vient la compression. Puis le mélange est enflammé par une étincelle, cela crée la combustion. Le dernier mouvement est l'échappement où les gaz issus de l'explosion sont évacués de la chambre de combustion.

Les moteurs appelés 4 temps et 2 temps se différencient par le nombre d'allers-retours nécessaires au piston pour réaliser un cycle complet comprenant l'admission, la compression, l'explosion et l'échappement. Un moteur 2 temps verra son cycle complet réalisé en un seul aller-retour (donc deux mouvements), tandis qu'un moteur 4 temps verra son cycle complet réalisé en deux allers et deux retours soit 4 mouvements. Entre les deux technologies, le moteur 2 temps est plus puissant mais le rendement est plus faible qu'un moteur 4 temps. (www.motoculture-jardin.com/moteur-thermique.php)

Moteurs à compression

Le moteur à compression et le moteur à explosion diffèrent par le type de carburant utilisé et par le type d'allumage²² du moteur. Pour le moteur à compression, l'explosion est réalisée par auto-allumage, c'est-à-dire que le carburant s'enflamme de lui-même, grâce à une compression de ce dernier obtenu grâce aux caractéristiques d'inflammation du diesel. Le principe de fonctionnement est donc le même avec les 4 temps définis plus haut : admission, compression, combustion du carburant puis échappement des gaz. La technologie fut avantagée dans les années 80 à la suite de l'arrivée des turbocompresseurs²³.

Le problème majeur de ce moteur fonctionnant au diesel réside dans la pollution qu'il engendre. Toutefois, sa consommation est plus faible qu'un moteur essence. Ce sont les particules fines²⁴ émises cancérigènes qui pousseraient à éviter ce mode de propulsion.

Moteurs à réaction

La technologie des moteurs à réaction est utilisée dans le transport aérien. Ce moteur possède des caractéristiques plus adaptées aux contraintes de haute altitude et une puissance plus importante. C'est un moteur qui produit de la poussée, contrairement aux autres moteurs vus plus haut, qui produisent du couple, grâce aux forces mécaniques. Cette poussée est, quant à elle, obtenue grâce aux gaz générés par la combustion.

Le principe du moteur à réaction est de faire accélérer une masse d'air pour produire une poussée, cela afin de propulser le mobile. Comme le moteur thermique de nos voitures, celui-ci repose sur des cycles nécessaires à son fonctionnement : compression de l'air en entrée, combustion de cet air avec un carburant pour dilater le gaz obtenu et donc augmenter la pression et la vitesse, et enfin la détente permettant d'obtenir la poussée en sortie du moteur. Pour que le tout fonctionne convenablement, les gaz traversent une ou plusieurs turbines afin d'entraîner un arbre rotatif, permettant le fonctionnement du compresseur et autres accessoires nécessaires au bon fonctionnement du moteur.

Il existe cependant plusieurs types de moteurs à réactions, différenciés par leur mode de compression, combustion et détente des gaz. L'air obtenu en entrée peut venir de l'air ambiant : dans les statoréacteurs, pulsoréacteurs et turboréacteurs. Mais cet air peut aussi provenir d'une source stockée comme de l'air liquide par exemple (www.lavionnaire.fr/MotorPrincipe.php).

Moteurs à combustion externe

Un aparté sera apporté ici sur le moteur à combustion externe : le moteur Stirling est un moteur de ce type, il a pour avantage un fonctionnement silencieux et un rendement intéressant. Créé au début du XIX^e siècle par Robert Stirling, il s'agit d'un moteur à « air chaud » sans chaudière. La source de chaleur est disponible grâce à n'importe quel carburant, ce qui est son principal atout.

Ce moteur n'est que très peu utilisé aujourd'hui mais devrait faire l'objet d'une attention particulière (<https://energieplus-lesite.be/techniques/cogeneration9/le-moteur-a-combustion-externe/>).

22- Le taux de compression d'un moteur Diesel est en moyenne à 20, contre 10 pour l'essence.

23- Le turbocompresseur permet de créer un « souffle » plus important de l'air pour créer une pression.

24- Les particules fines sont des particules en suspension dans l'air, catégorisées selon leur diamètre (en μm).

Moteurs électriques

Un moteur électrique permet de convertir l'énergie électrique en force mécanique. Ce type de moteur a comme particularité d'être réversible²⁵ de nature, c'est-à-dire de pouvoir créer de l'énergie électrique à partir d'un mouvement mécanique et inversement.

Il peut fonctionner grâce au courant alternatif²⁶ ou continu²⁷, être synchrone ou asynchrone. Il possède de nombreux atouts par rapport au moteur thermique : rendement²⁸ bien supérieur, proche de 100 % pour un moteur électrique alors que le moteur thermique ne dépasse pas 40 % pour les plus performants. Il ne produit pas de bruit, le couple disponible est instantané contrairement au moteur thermique où le couple maximal est obtenu à une vitesse de rotation élevée (donc non disponible dès le début de l'accélération), et il ne consomme pas d'énergie lorsque le véhicule est à l'arrêt (un feu rouge par exemple) là où le véhicule thermique se voit consommer de l'énergie inutilement. Enfin, sa conception est bien plus simple qu'une motorisation à essence ou diesel (en moyenne 3 000 pièces pour un moteur thermique 200 en moyenne pour un moteur électrique).

Un moteur électrique a besoin pour fonctionner d'énergie électrique à disposition (piles, batteries, caténares...). Le problème pour cette technologie demeure le stockage de l'énergie qui impacte directement les performances et l'autonomie. Au tout début de l'aventure du moteur électrique, il fallait directement remplacer les dispositifs de stockage (batteries) et il a fallu attendre les travaux réalisés sur la batterie rechargeable²⁹ par Camille Faure et Gaston Planté, entre 1868 et 1881, pour palier à cela.

Les batteries élaborées à cette époque étaient composées de plomb et d'acide, elles fournissaient une bonne capacité de charge malgré un poids assez important. Aujourd'hui, la batterie au plomb est remplacée progressivement par la technologie appelée « lithium-ion³⁰ ». Ces nouvelles batteries peuvent stocker plus d'énergie avec un poids beaucoup moins important. Il est possible de remarquer que des recherches s'orientent de plus en plus vers des solutions beaucoup plus durables, car le lithium n'est pas une ressource illimitée, son cycle de production génère un coût carbone et écologique très élevé (extraction, raffinage, commercialisation...), les moyens de recyclage sont très difficiles³¹.

Le premier véhicule électrique fut imaginé par Robert Davidson, ingénieur britannique qui créa, en 1837, un prototype de locomotive électrique fonctionnant grâce à des piles et dévoila, en 1842, son invention appelée « Glavani » (amélioration du prototype) fonctionnant avec des piles zinc-acide. Les trains sont donc électrifiés dès le début du XX^e siècle et la voiture fait de même avec, en 1899, la présentation de la « Jamais contente » premier véhicule à dépasser les 100 km/h avec des batteries faisant la moitié du poids, soit 750 kg. La technologie électrique fut peu à peu délaissée avec notamment l'arrivée de la Ford T, voiture peu chère et avec une autonomie bien plus intéressante que l'électrique. Les autres constructeurs se sont donc mis à produire des véhicules thermiques par la suite (www.caradisiac.com/Stand-Peugeot-les-106-et-107-Electric-54016.htm).

Courant continu

Dans un moteur électrique à courant continu, on trouve les éléments suivants : un rotor et un stator. Le stator est un aimant fixe, à l'intérieur on y trouve une bobine appelée rotor, guidé par un axe de rotation. Grâce à une batterie le courant circule dans la bobine, ou rotor, qui est placé dans le champ magnétique de l'aimant (passer l'électricité dans une bobine crée donc un électro-aimant). Grâce aux phénomènes des aimants (les pôles identiques se repoussent et les pôles différents s'attirent), cela permet de faire tourner la bobine. Pour faire tourner continuellement cette bobine, il faut changer le sens du courant à chaque demi-tour de la bobine, c'est pourquoi un commutateur est ajouté pour permettre ce changement de sens et donc faire tourner la bobine continuellement. Cela constituait donc les premiers véhicules motorisés électriquement.

25- Moteur réversible permet de générer de l'énergie, et d'en consommer en sens inverse.

26- Le courant alternatif est un courant qui change de sens deux fois par période.

27- Le courant continu circule, pour sa part, dans un seul sens.

28- Le rendement d'un moteur électrique est >95 % contre <40 % pour un moteur thermique

29- Note à insérer // Travaux sur la batterie rechargeable

30- Note à insérer // Batterie li-ion

31- Note à insérer // Recyclage d'une batterie li-ion

Dans les années 90³², l'État souhaitait arriver à 5 % de part de véhicules électriques. La Peugeot 106, la Citroën Saxo et la Renault Clio électrique furent développées et commercialisées pour aller dans ce sens. Ces véhicules reprenaient la technologie du moteur électrique à courant continu.

Ces véhicules étaient surtout destinés à des trajets intra-urbains, en raison d'une autonomie assez faible d'une centaine de kilomètres seulement et d'une vitesse maximale de 110 km/h. La recharge était réalisée grâce aux bornes spécialisées pour véhicules électriques, fournissant un courant continu et aussi à la maison à partir du courant alternatif domestique, possible grâce à un module convertisseur alternatif – continu appelé redresseur.

Courant alternatif

Le moteur à courant alternatif a pour avantage d'avoir une durée de vie bien plus importante qu'un moteur à courant continu, quelques raisons à cela : il s'agit d'un système plus simple qui utilise moins de composants, le démarrage est moins énergivore et la vitesse du moteur est contrôlée en fonction de la fréquence, tout comme le couple qui peut être limité.

En résumé, il s'agit d'un moteur plus performant, moins énergivore et plus robuste. Aujourd'hui, ce moteur est utilisé par tous les constructeurs de véhicules électriques, son plus faible coût de production permettrait de faire la différence.

Le moteur reçoit un courant alternatif or les batteries ne peuvent fournir que du courant continu. Une conversion du courant entre la batterie et le moteur est nécessaire, un module convertisseur continu – alternatif appelé onduleur permet cela. Le rechargement est, quant à lui, identique aux moteurs continus.

Asynchrone

Après avoir décrit les différents moyens de fournir de l'énergie à un moteur électrique (soit continu, soit alternatif) nous noterons qu'il existe deux grandes technologies associées aux moteurs électriques, la motorisation asynchrone et la motorisation synchrone.

Pour le moteur asynchrone, appelé aussi moteur à induction, le principe de fonctionnement est de faire tourner un rotor³³ au milieu d'un ou plusieurs stators³⁴ (monophasé ou triphasé par exemple) et grâce au courant qui passe à travers du ou des stators, le champ magnétique créé permet de faire tourner le rotor. La vitesse de rotation obtenue est plus faible que celle du champ au niveau du stator, expliqué par le glissement des roulements. Ce glissement est la principale faiblesse des moteurs asynchrones et, plus ce glissement est important, plus le rendement du moteur est faible. Par exemple, le constructeur Américain Tesla, produit ses modèles électriques Model S et X qui sont propulsés par des moteurs électriques à courant alternatif triphasé asynchrone. Dernièrement, le Model 3 est, pour sa part, alimenté par un moteur synchrone (<https://acim.nidec.com/fr-fr/motors/leroy-somer/products/induction-motors>).

Synchrone

Le moteur électrique synchrone, contrairement à celui cité plus haut, ne possède pas de glissement, ce qui fait de lui un meilleur rendement, si ce n'est le meilleur.

Le meilleur rapport couple / poids et puissance, dans un même volume, est partagé entre deux façons de créer un moteur synchrone : grâce à un rotor aimanté à l'aide de courants, appelé bobiné, ou grâce aux aimants permanents qui n'ont pas besoin d'enroulement au rotor. Cela permet pour ce dernier d'être plus léger et de réduire les pertes. Toutefois, les aimants permanents ont certes de meilleurs rendements que les versions bobinées, mais le problème réside dans le coût économique et écologique à cause des matériaux utilisés issus de terres rares. Ici, une attention particulière doit être portée afin d'éviter toutes dépendances économiques stratégiques.

À titre d'exemple, les constructeurs PSA et Toyota utilisent dans leurs moteurs des aimants permanents avec la Peugeot Ion par exemple, tandis que Renault-Nissan s'est orienté vers le rotor bobiné, notamment constitué de cuivre, avec la Renault Zoé. Le prix final du véhicule est par conséquent ressenti à l'achat avec une moyenne

32- Note à insérer // Voiture électrique années 90

33- Un rotor est la partie mobile d'un moteur électrique

34- Un stator est la partie statique (fixe) d'un moteur électrique

de 26 000 € pour la Peugeot et 23 000 € pour le constructeur Renault (www.youtube.com/results?search_query=moteur+%C3%A9lectrique+synchrone).

Actuellement, la France est dans une voie croissante dans l'évolution de la part de marché du véhicule électrique, incitée par les primes à la conversion³⁵ et de plus en plus de taxes envers les véhicules thermiques. Les modèles Renault Zoé et Nissan Leaf représentent, à elles seules, plus de la moitié des ventes en France dont 44 % en 2019 pour la première citée. De plus, de nouveaux moyens pour inciter à la mobilité électrique font leur apparition avec des vélos, trottinettes, scooters électrifiés adaptés pour les trajets de courte distance en ville. Il y a aussi des réglementations³⁶ qui font la promotion de l'électrique en autorisant la conversion en électrique des véhicules thermiques.

Cela permet de réduire le coût d'achat d'un véhicule neuf en gardant la plateforme déjà disponible, mais aussi favorise le recyclage ou seul le moteur thermique est changé, en évitant la mise en casse du véhicule entier. La légalisation est très stricte en termes de transformation et comprend de nombreux points comme la répartition des masses, le fonctionnement du système de frein, l'identification des pièces à changer sont très encadrées, afin de maximiser la sécurité.

Cas particuliers, la motorisation à hydrogène

Dans le cas d'une motorisation fonctionnant à l'hydrogène, la source d'énergie peut être utilisée : soit sous forme de combustible afin de faire fonctionner un moteur thermique pour fournir du couple, soit sous une forme « chimique » via une pile à combustible afin de produire de l'électricité et alimenter un moteur électrique. Il y a donc deux moyens de propulser un véhicule avec cette même source d'énergie.

Les moteurs à hydrogènes actuels peuvent être de deux types : soit à combustion interne (https://fr.wikipedia.org/wiki/Boeing_Phantom_Ray), soit moteur électrique à Pile A Combustible (PAC) (www.futura-sciences.com/planete/actualites/energie-renouvelable-hy4-avion-electrique-hydrogene-etonnant-pris-son-envol-64644/) :

- ▶ le premier type : le moteur thermique à combustion interne, classique raccordé à un réservoir. Ce moteur utilise le principe de la combustion de l'hydrogène (H₂) et du dioxygène (O₂) pour ne dégager que de l'eau. Cependant, lors de la combustion, du dioxyde d'azote se dégage également. (<http://www.futura-sciences.com/tech/actualites/salon-francfort-bmw-devoile-son-concept-suv-pile-combustible-i-hydrogen-next-77547/>). Pour diminuer cette infime émission de NOx, des dispositifs ont été développés³⁷. Actuellement les coûts semblent élevés, les systèmes d'injection devront faire l'objet d'une adaptation, car l'hydrogène doit être amené à l'état gazeux dans les chambres de combustion.³⁸ Il s'agit donc d'un moteur à explosion à allumage commandé comme la motorisation essence.³⁹ Quelques adaptations permettent l'arrivée du dihydrogène dans la chambre de combustion et permettent d'effectuer l'allumage. Le seul ajout supplémentaire est le réservoir cryogénique pour stocker l'hydrogène liquide et des conduites spécialement conçues pour acheminer l'hydrogène à -250 °C jusqu'aux injecteurs. Les systèmes de stockage et de décompression apparaissent de prime abord techniquement complexes. Des solutions techniques extrêmement innovantes existent pourtant, souvent françaises, mais elles sont soit complètement sous-estimées, soit totalement inexploitées, comme par exemple, le Kit PANTONE ou les moteurs hybrides de la société LUXURY SEA (MIG 675). Il existe donc des solutions réelles et fonctionnelles qui peuvent être de véritables ruptures technologiques. Celles-ci permettraient de relancer l'économie et l'industrie automobile française, ces technologies seraient complémentaires à celles existantes. Une vraie planification stratégique du développement de l'outil industriel devra inévitablement être mise en place au niveau national, sous peine de faire le jeu des autres forces en présence qui ne manqueront pas, elles, de s'engouffrer dans cette direction.

35- Les primes à la conversion sont disponibles via : www.primealaconversion.gouv.fr

36- Voir Arrêté du 13 mars 2020 relatif aux conditions de transformation des véhicules à motorisation thermique en motorisation électrique à batterie ou à pile à combustible.

37- Catalyseur qui transforme le dioxyde d'azote en ammoniac, puis en azote, inoffensif pour la santé.

38- Moteur thermique à allumage commandé, adapté pour recevoir le carburant hydrogène

39- Voir fiche 5.1.1 de l'AFHYPC : « Moteurs thermiques à hydrogène »

- ▶ le second type : un moteur électrique branché sur une pile à combustible (PAC). Cette technologie permet d'avoir une grande autonomie et un poids plus faible comparé à un véhicule électrique « conventionnel ». En termes d'émission, la pile à combustible n'émet pas de dioxyde d'azote, juste de l'eau.

Nous détaillons rapidement ci-après comment fonctionne une pile à combustible.

Le principe de la pile à combustible (PAC)

Une pile à combustible permet de produire de l'énergie électrique directement à partir de l'énergie chimique de combustion (oxydo-réduction) en dégageant uniquement de la chaleur et de l'eau (www.cea.fr/Pages/domaines-recherche/energies/energies-renouvelables/recherches-CEA-hydrogene-pile-a-combustible.aspx).

Une PAC est constituée de 3 éléments :

- ▶ deux électrodes : une anode oxydante (émettrice d'électrons) et une cathode réductrice (collectrice d'électrons),
- ▶ un électrolyte (conducteur).

Les deux électrodes sont séparées par l'électrolyte. A l'anode, on amène le combustible (dans notre cas ici le dihydrogène). La cathode est alimentée en oxygène (ou plus simplement en air, enrichi ou non en oxygène).

L'électrolyte a la propriété de conduire directement d'une électrode à l'autre des molécules ionisées et de faire barrage aux électrons en les obligeant à passer par le circuit extérieur de la pile où leur énergie électromotrice est utilisée pour faire fonctionner un moteur électrique.

L'alimentation se fait par injection continue de combustible à l'anode et à la cathode, généralement de l'air. Une énergie électrique continue est alors disponible aux bornes de la pile, permettant d'alimenter un moteur électrique par exemple. Les piles à combustible se différencient de deux façons : par la nature de leur électrolyte et par leurs domaines d'application.

L'hybride

Le but ici est de réduire l'impact sur l'environnement lors de l'utilisation, diminuer et optimiser l'utilisation des technologies polluantes en apportant une source plus verte lors de l'utilisation du moyen de transport, tout en gardant les points les plus performants comparés à la technologie électrique, par exemple, sur l'autonomie.

L'avantage permet de réduire les contraintes des moteurs thermiques qui jouent beaucoup sur les émissions de gaz polluants : l'utilisation à froid, les démarrages, la conduite en ville... le moteur électrique permet d'assouplir ces contraintes.

Pour le moment, il existe trois types de moteurs hybrides, nous pouvons les distinguer par la technologie dominante qui est prise en compte. Premièrement, il existe ce que nous nommerons « l'hybride léger⁴⁰ », où le moteur principal est le plus souvent thermique, le moteur électrique intervient pour aider au démarrage et les aides en côte, la puissance de ce dernier est très limitée. Deuxièmement, nous considérerons l'hybridation classique⁴¹, dans le cas présent la partie électrifiée sera sollicitée lors d'une utilisation modérée comme en ville ou à faible vitesse, lors d'une demande de grande énergie, la partie thermique sera utilisée (autoroute, accélération, vitesse supérieure à 90 km/h). Pour le troisième type, nous pouvons parler « d'hybride rechargeable », ici le moteur électrique est

Définition

La motorisation hybride est une technologie regroupant plusieurs types de moteurs fonctionnant avec une source d'énergie différente, le plus souvent un moteur thermique accouplé à un moteur électrique, mais il existe d'autres moyens d'hybrider un véhicule, par exemple un moteur thermique fonctionnant à l'essence ou à l'hydrogène liquide, un moteur thermique fonctionnant au gaz ou à l'essence.

40- Voir l'article de L'argus du 16 Mai 2020 « Voitures hybrides : tout savoir sur le mild hybrid ou hybride léger »

41- Voir l'article de automobile-propre.com du 31 juillet 2018 « Voiture hybride : fonctionnement, avantages et inconvénients »

l'élément dominant et permet de rouler en tout électrique et le moteur thermique vient en aide lors de fortes accélérations, à grande vitesse où lorsque l'autonomie des batteries est insuffisante.

Pour les moteurs à hybridation légère, dans le cas présent, le couplage d'un moteur électrique à un moteur thermique permet de faire baisser très légèrement la consommation en hydrocarbures. De plus, cette technologie facile à installer permet même d'être implémentée dans un véhicule ne disposant pas du système d'hybridation à l'origine. Grâce à la facilité d'ajout de cette technologie, le coût d'installation est peu élevé (de l'ordre de 800 € à 2 500 €) et permet d'être amorti rapidement avec la consommation de carburant réduite. Un autre avantage est de pouvoir déplacer le véhicule avec le moteur électrique lors de petites manœuvres, par exemple, en sortie de garage, ce qui permet d'éviter la pollution et le confinement des gaz en souterrain.

Malgré tout, l'économie en carburant reste très faible, ces moteurs ont une consommation importante en énergie primaire (fossile) lors des déplacements à grande vitesse ou lors de longs trajets. Certains modèles proposés affichent un prix d'achat très élevé, pas nécessairement justifié aux vues du peu d'économies d'énergies réelles lors de l'utilisation. Enfin, en termes de subvention, tous les véhicules neufs hybrides légers ne bénéficient pas de bonus à l'achat, depuis 2017.

Concernant l'hybride classique, la technologie la plus répandue est la toute première commercialisée dès 1997⁴². Le but ici est de diminuer la consommation de carburant en ajoutant un moteur électrique et des batteries pour permettre de rouler en mode électrique, en ville sur une dizaine de kilomètres et à une vitesse jusqu'à 50 km/h. La recharge n'est pas nécessaire, car les batteries sont ravitaillées lors des freinages ou en phase de décélération, énergie gaspillée dans les véhicules thermiques, grâce au moteur électrique qui devient un générateur. Il s'agit de l'hybridation légère mais plus poussée et permet une économie de carburant plus importante que cette dernière, et apporte un confort de conduite en ville à basse vitesse, dans les bouchons, par exemple, grâce au silence et à la fluidité. Le fait de ne pas avoir besoin d'être rechargée permet aussi d'éviter une dépendance en plus par rapport aux ravitaillements en énergie.

Cette technologie reste cependant limitée par son autonomie qui reste faible (une dizaine de kilomètres) et l'impossibilité de choisir le type d'énergie à utiliser d'autant plus que le moteur thermique est sollicité dès lors que la vitesse est à plus de 50 km/h en moyenne, ce qui veut dire que sur autoroute, la consommation risque d'être plus importante à cause du surpoids généré par les batteries et le moteur électrique. Le surcoût à l'achat est aussi important avec une moyenne de 5 000 € en plus par rapport à la version thermique d'un même modèle et, depuis 2017, le bonus écologique n'est plus appliqué sur le véhicule neuf.

Enfin, sur l'hybridation rechargeable, qui tend à se répandre de plus en plus, celle-ci offre la possibilité de choisir le type d'énergie à utiliser. Il s'agit cette fois d'un vrai véhicule électrique associé à un véhicule thermique. Grâce à cela, l'autonomie électrique est suffisante pour une utilisation quotidienne en ville voire extra-urbain et la consommation finale en carburant est réduite. Cette technologie propose finalement une autonomie bien meilleure que les deux précédentes, à savoir plus de 900 km en mode hybride et 60 km environ en ville. Le confort de conduite est très présent et lors de l'achat du véhicule neuf, celui-ci bénéficie d'un bonus écologique.

Ce type de motorisation dispose d'avantages technologiques indéniables par rapport aux autres motorisations hybrides en termes d'autonomie. Cependant, la facture d'achat du véhicule sera bien plus importante à cause du système moteur plus complexe. Il faut aussi prévoir un entretien plus conséquent sur le long terme. Pour finir, lors d'une utilisation autoroutière la consommation augmentera à cause du poids plus important du véhicule. Bien que les niveaux d'hybridations présentés plus haut soient essentiellement des véhicules à motorisation thermique et électrique, il existe cependant d'autres « paires » de mode d'hybridation.

Par exemple, l'utilisation du vent couplé à un moteur diesel conventionnel pour la mobilité sur l'eau. L'Alcyone est un bon exemple, il s'agit d'une technologie novatrice unique comprenant deux moteurs diesel, ainsi que des turbo-voiles utilisant l'effet Magnus pour permettre de faire avancer le bateau. Ces deux turbo-voiles permettent au bateau d'avoir une consommation minimale pour un rendement maximisé. Selon le dernier commandant ayant utilisé ce type de motorisation, les paquebots Trans-Manche auraient un intérêt indéniable à utiliser cette

42- Voir l'article de news.autojournal.fr du 7 août 2017 « La Toyota Prius (1997) a 20 ans !

motorisation en termes de consommation qui serait réduite et donc un impact écologique considérablement réduit et une facture énergétique très réduite. Comme autres « paires » d'hybridation il est possible de parler d'une même motorisation mais avec deux sources d'énergies différentes avec l'essence et le GNV avec par exemple. La Fiat Panda Natural Power⁴³ correspond à cela, elle utilise soit l'essence comme carburant principal, soit le GNV afin de réduire l'impact carbone lors de l'utilisation. Il existe évidemment d'autres modèles et d'autres constructeurs qui fabriquent ce type de motorisation, mais nous ne pouvons tous les citer.

L'hybride GNV associé à la technologie électrique existe, il s'agit d'un bus pour les transports en commun de Safra. Le prototype est en expérimentation depuis novembre 2020 à Grenoble⁴⁴. Il utilise une motorisation électrique et un moteur thermique au gaz naturel pour recharger les batteries.

Pour finir, le projet d'hybridation d'un moteur thermique essence et hydrogène liquéfié par BMW avec son modèle Hydrogen 7⁴⁵ a pour but d'associer une carburation essence classique et un apport en hydrogène liquide pour augmenter l'autonomie et réduire l'impact environnemental lors d'une utilisation principalement urbaine.

Les types d'énergie

Le gaz naturel véhicule (GNV)

Le gaz naturel pour véhicule est une source d'énergie permettant de faire rouler les voitures ou camions mais aussi faire naviguer les bateaux.

Il s'agit d'un gaz identique à celui utilisé pour le chauffage domestique, composé principalement de méthane. Ce carburant est utilisé dans les moteurs thermiques, il a pour avantage de moins polluer que l'essence ou le diesel, car ses émissions de polluants sont moins importantes même pour le gaz issu de forages.

Il est à noter que des solutions sont envisagées pour remplacer ou compléter le gaz naturel de forage ou gaz fossile, il s'agit du BioGNV notamment. Ce gaz est issu de la méthanisation de nos déchets, donc plus vert, et surtout renouvelable. Les propriétés du BioGNV sont identiques au gaz naturel fossile. Pour le moment cette source d'énergie est peu développée en comparaison du gaz fossile, de l'ordre de 5 % seulement pour l'ensemble du territoire national.

Le GNV peut donc être obtenu soit par forage, soit par réaction chimique, dans ce dernier cas nous parlerons de BioGNV.

Le GNV est distribué sous deux formes :

- ▶ sous forme liquide: il s'agit du Gaz Naturel liquéfié (GNL). Ce gaz est stocké dans des réservoirs cryogéniques à une pression de quelques bars,
- ▶ sous forme de gaz comprimé : il s'agit du Gaz Naturel Comprimé (GNC). Ce gaz est stocké dans des réservoirs sous pression de 200 à 300 bars.

Enfin, le gaz de pétrole liquéfié (GPL), lui, est un mélange d'hydrocarbures contenant du propane et du butane en majorité. Issu du raffinage du pétrole, le GPL n'est pas du GNV. Un véhicule GNV ne peut pas fonctionner au GPL et inversement.

Mode de production et commercialisation

Il existe deux moyens distincts d'obtenir ce gaz ou carburant :

- ▶ pour le premier, le gaz naturel est extrait des sous-sols au même titre que le pétrole ou le charbon. C'est donc une source fossile épuisable. Ce gaz est ensuite purifié pour en conserver uniquement le méthane,
- ▶ pour le second, le BioGNV est issu :
 - de la biométhanisation : en utilisant les déchets organiques comme les déchets végétaux, alimentaires et autres afin de produire du gaz par fermentation dans un méthaniseur. Ce procédé permet de produire du méthane, identique au gaz naturel fossile,

43- Article à insérer // Fiat panda GNV

44- Voir l'article de gaz-mobilite.fr du 1er janvier 2019 « Un premier bus hybride rechargeable GNV pour le réseau grenoblois »

45- Voir l'article de MotorLegend du 22 octobre 2007 « Essai BMW 760 Hydrogen 7 »

- de la pyrogazéification : ce procédé consiste à faire chauffer de la matière organique à des températures avoisinant les 1 000°C en présence de peu d'oxygène. La combustion incomplète produit un solide similaire au charbon et du gaz « synthétique » (syngaz). Le gaz synthétique obtenu est purifié pour en obtenir uniquement le méthane. Cette technique est censée fournir à terme 40 % du biogaz produit⁴⁶. Le charbon, lui, sera utile au procédé et permet de fournir une source d'énergie renouvelable et contrôlée en termes d'émissions de CO₂ (Chaîne de production GNV - source : www.gaz-mobilite.fr/dossiers/biognv-definition-biogaz/),
- de la méthanation par un procédé de conversion d'électricité en gaz appelé « power to Gas ». Cette technique consiste à utiliser de l'électricité renouvelable dans le processus de méthanation. Dans ce procédé, on hydrolyse de l'eau avec l'électricité « verte » (surplus d'électricité éolienne, solaire...). Le dihydrogène obtenu est associé à du CO₂ pour obtenir du méthane. Ce méthane et/ou l'hydrogène peuvent alors être injectés dans le réseau de transport gazier existant. Le projet opérationnel pour l'année 2020, dénommé « Jupiter 1000 »⁴⁷ est un exemple de cette technologie.

Actuellement, le GNV est surtout utilisé par le transport routier et les voitures. Les véhicules légers roulant au gaz sont cependant moins nombreux et plutôt utilisés par le milieu professionnel.

Le GNV se décline soit en GNL soit en GNC. Le GNC permet de disposer d'une autonomie courte à moyenne, il est possible d'obtenir une autonomie de l'ordre de 700-800 kilomètres et le GNL permet lui de disposer d'une plus grande autonomie (supérieure à 1 000 km).

Il semblerait que les bus en milieu urbain utiliseraient de plus en plus cette technologie.

Cela s'expliquerait par les réglementations actuelles portant sur les polluants atmosphériques et les gaz à effet de serre. La grande force du GNV, comparé au diesel, est de permettre une réduction de 70 % des Nox et jusqu'à 96 % des émissions de particules fines (PM10 ; PM2,5...).

Motorisations utilisées

Le GNV sous ses formes GNC et GNL est utilisé comme carburant pour des moteurs thermiques afin de réduire les émissions de GES et de particules fines, surtout en zone urbaine.

Basé sur le principe du moteur essence, la partie principale du moteur reste inchangée. Seule l'injection diffère. Le stockage doit être repensé, car le gaz (comprimé ou liquide) doit être stocké dans des bonbonnes spécifiques. Pour les véhicules légers, le démarrage est impérativement effectué à l'essence en raison de la difficulté d'inflammation du gaz à froid. Il s'agit donc d'un moteur à bicarburant avec ajout d'un système secondaire permettant d'accueillir une autre source de carburant.

Pour les poids lourds et les engins maritimes, une motorisation exclusive au gaz est développée. Le GNL semble être plus approprié pour les poids lourds et les bateaux. Pour les moteurs utilisant du gaz liquéfié, un réservoir spécifique avec un dispositif de soupape de sécurité pour évacuer le gaz, s'il y a un impact, est mis en place, ainsi qu'une jauge additionnelle pour afficher la contenance de gaz, et un système d'injection adapté.

Infrastructures

Actuellement, nous pouvons trouver en France, près de 117 stations proposant du GNV/ BioGNV et 88 vont faire leur apparition dans les prochains mois.⁴⁸ La part du véhicule GNV dans le parc automobile est faible, de l'ordre de 0,2 % (13 000 véhicules tous types confondus)⁴⁹ (cf. gaz-mobilite.fr). La faible présence de stations et la possible dangerosité du carburant (dans les endroits confinés) seraient des freins au développement du GNV.

Mais cela pourrait s'améliorer, la volonté semble affichée avec des objectifs d'augmentation du nombre de stations et l'intention d'atteindre 230 000 véhicules GNV pour 2030.⁵⁰

46- Voir l'article de gaz-mobilite : « Les différents modes de production du BioGNV ».

47- Voir sur le site www.jupiter1000.eu

48- D'après la carte des stations services GNV sur www.gaz-mobilite.fr

49- Voir l'article de gaz-mobilite : « Le marché du véhicule GNV en France, eu Europe et dans le monde.

50- Voir l'article de gaz-mobilite : « Le marché du véhicule GNV en France, eu Europe et dans le monde.

Le réseau de gaz de ville est adapté à un ravitaillement des stations GNV, ce gaz est utilisable pour un usage domestique.

En station, le gaz est comprimé pour être stocké : soit sous forme comprimé à 200 bars pour le gaz naturel comprimé (GNC), soit sous forme liquide à -160°C pour le gaz naturel liquéfié (GNL).

Ces stations peuvent cependant fournir un débit de ravitaillement différent : en effet il existe des stations dites « lentes » adaptées pour la recharge des véhicules de nuit par exemple, et la station rapide où le besoin est plus important. Pour une station lente le rechargement peut prendre jusqu'à 8 heures pour remplir un réservoir de poids lourd, contre 4 à 10 minutes pour une station rapide pour le même véhicule. La distribution est similaire aux stations pétrolières : un système de lance spécifique permet de recharger un véhicule, la lance est adaptée selon la forme du carburant, soit liquide, soit gazeux (Carte des stations GNV sur le site : www.gaz-mobilite.fr/stations-gnv-france/).

Bilan impact environnemental, carbone

L'impact environnemental de la carburation au gaz dépend de sa source de production, ce gaz peut être soit de source fossile ou soit de source renouvelable. Les bilans des émissions de gaz à effets de serre du puits à la roue ne sont pas les mêmes.

A titre comparatif, un véhicule GNV produirait jusqu'à 95 % de particules fines et 50 % de NOx en moins par rapport à un véhicule thermique de norme Euro VI.

Et en plus de ces résultats pour le BioGNV, la réduction des rejets de CO₂ pourrait monter à 80 %. En plus de ces qualités pour l'environnement urbain, il faut ajouter l'absence d'odeur, pas de fumée et deux fois moins de bruit émis par rapport à une motorisation diesel.⁵¹

En conclusion, il semble important que les stations GNV puissent proposer du GNV issu de méthane biologique en proportion plus importante afin de rendre l'impact carbone encore moins important.

Bilan financier du système

L'unité de vente du GNV est au kilogramme, même pour sa version liquéfiée. Pour l'équivalent d'un kilogramme de GNV, il faut environ 1,7 litres d'essence. Actuellement, le prix du gaz est 30 à 40 % moins cher que l'essence. Et il y aurait jusqu'à 30 % de réduction supplémentaire pour les professionnels.

Le coût d'achat d'un véhicule GNV est plus important qu'un véhicule thermique classique essentiellement à cause de son double équipement. Ces coûts peuvent cependant être amortis à moyen et long terme. Pour un véhicule léger, l'économie sur la consommation d'énergie se fera ressentir à partir de 80 000 km, et à partir de 400 000 km pour les poids lourds.

Il existe cependant des aides dédiées aux nouveaux véhicules roulant au gaz naturel pour tenter de limiter ce coût élevé.

Impact sociétal

Pour l'heure, la perception du particulier sur un véhicule roulant au gaz serait plutôt négative à cause notamment du manque de proximité des stations proposant du GNV, mais serait plutôt positive pour les professionnels. De plus, pour les professionnels si le rechargement peut s'effectuer de nuit, le GNV pourrait être encore mieux accepté. Lors de son utilisation, le GNV et la technologie associée génère moins de bruit ce qui en fait un atout indéniable. De plus, l'utilisation du GNV permet en comparaison des énergies fossiles conventionnelles de diminuer fortement les émissions de polluants contribuant ainsi aux objectifs environnementaux. En conclusion, les préjugés sur les dangers liés à cette technologie pourraient évoluer positivement. Les véhicules GNV sont désormais homologués pour être stationnés dans les souterrains et circuler sous les tunnels. Les risques d'explosion sembleraient plus faibles et moins importants que le GPL.⁵²

51- Voir l'article de GRDF : « Les avantages du GNV et du BioGNV pour votre flotte ».

52- Voir l'article de gaz-mobilite : « Sécurité : le GNV est-il dangereux ? »

Maturité de la filière

Aujourd'hui la France avec ses 13 000 VHL semble avoir pris du retard concernant le GNV, par exemple l'Italie compte plus d'un million de véhicules fonctionnant au gaz, l'Allemagne près de 100 000.

Des objectifs ambitieux sont mis en place pour augmenter la part du GNV dans le transport et cela commence en premier lieu, pour les véhicules professionnels, les poids lourds et les véhicules de maintenance urbains pour les collectivités. Cependant, il y a encore très peu de stations, en particulier pour le public. Actuellement, une dizaine de constructeurs⁵³ se tournent vers cette motorisation et les offres de véhicules sont de plus en plus diversifiées : véhicules légers, autobus, véhicules de propreté urbaine et de plus en plus d'entreprises de transports routiers se tournent vers cette alternative. Dans le domaine maritime, l'augmentation de la part de GNV est importante en raison de fortes économies de carburant et d'une diminution importante des émissions de polluants, sur le soufre notamment (95 % d'émission en moins).

Actuellement, les croisiéristes renouvellent leur flotte de bateaux, équipés en motorisation au gaz, sous forme liquide : Costa croisière et Brittany ferries débutent les commandes de bateaux GNL et les autres entreprises ne devraient pas tarder. Les entreprises affrétant des porte-conteneurs semblent également s'engager dans cette direction.

La filière se développe principalement autour des milieux professionnels et reste timide pour le grand public. Même s'il y a peu de véhicules et de stations actuellement, la tendance pourrait s'améliorer avec des contrats entre des entreprises et des constructeurs, et les incitations d'achats sous forme d'aides publiques.

La faible part des véhicules GNV dans le parc particulier pourrait s'expliquer aussi, comme nous l'avons vu précédemment, par la dangerosité du système qui resterait marqué dans l'esprit des consommateurs alors même qu'aujourd'hui les systèmes GNV semblent apporter les gages de sécurité appropriés. Le GNV est aujourd'hui autorisé à être utilisé en milieu confiné (Précautions à prendre pour le GNL : gants et protections du visage - source : www.gaz-mobilite.fr/dossiers/faire-le-plein-camion-gnl-procedure-risques-securite/).

L'hydrogène

L'hydrogène ou plus précisément le dihydrogène (H₂) est difficilement trouvable à l'état « pur » dans l'environnement malgré son abondance, il est principalement retrouvé avec d'autres éléments atomiques comme l'oxygène.

La molécule de dihydrogène est constituée de deux atomes d'hydrogène (H₂). Sa combustion avec le dioxygène (O₂) ne produit que de l'eau (H₂O) : $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$. L'utilisation de cette source d'énergie permet globalement d'éviter l'émissions de CO₂ l'une des causes majeures du réchauffement climatique.

De plus la combustion d'1 kg de ce gaz libère environ 3 fois plus d'énergie qu'1 kg d'essence (soit 120 MJ/kg* contre 45 MJ/kg pour l'essence).

Le dihydrogène a un double avantage : il est à la fois inépuisable et non polluant. Il devrait donc jouer, à l'avenir, un rôle très important.

Mode de production et commercialisation

Peu présent à l'état pur dans la nature, la production d'hydrogène est nécessaire aujourd'hui pour satisfaire les besoins.

Plusieurs moyens de production sont envisageables, certains plus coûteux en énergie que d'autres, certains plus impactants pour l'environnement que d'autres. Le dihydrogène peut être produit à partir de différentes sources d'énergie : les énergies fossiles, le nucléaire et les énergies renouvelables.

L'hydrogène produit à partir des énergies fossiles

Actuellement, l'hydrogène est obtenu principalement à partir d'hydrocarbures et plus particulièrement à partir du gaz naturel, avec comme intermédiaire le gaz de synthèse (un mélange d'H₂ et de CO).

53- Fiat, Seat, Škoda, Volkswagen, Audi, Volvo, Iveco, MAN, Scania, Mercedes, Renault.

* (L'étude complète est disponible via : www.hal.univ-lorraine.fr « Production d'hydrogène par l'oxydation partielle catalytique du propane »)

Les techniques dominantes sont*:

- ▶ le vaporeformage d'hydrocarbures : processus industriel le plus répandu pour produire de l'hydrogène, cela consiste à transformer les hydrocarbures légers en gaz de synthèse. On obtient de l'hydrogène (H₂), du monoxyde de carbone (CO), du dioxyde de carbone (CO₂), du méthane (CH₄) et de la vapeur d'eau (H₂O). Les transformations ont lieu à haute température de l'ordre de 840 °C à 920 °C et à pression modérée de 20 à 30 bars,
- ▶ Le reformage par oxydation partielle : le principe est d'utiliser l'oxygène en tant qu'oxydant et de la vapeur d'eau en tant que modérateur de température pour produire une oxydation partielle afin d'obtenir des gaz de synthèse, le tout à partir de gaz naturel jusqu'aux résidus lourds d'hydrocarbures.

Les procédés vus précédemment sont définis comme des procédés de production d'hydrogène « gris⁵⁴ », car ils ont comme conséquence de produire des gaz à effet de serre, comme le monoxyde et le dioxyde de carbone et aussi des oxydes d'azote.

L'hydrogène par décomposition de l'eau

Ces techniques permettent de produire de l'hydrogène sans production de gaz carbonique, cet hydrogène produit peut être défini comme « vert⁵⁵ » par opposition à l'hydrogène gris cité supra. Les techniques dominantes sont :

- ▶ l'électrolyse, à condition toutefois de réaliser cette électrolyse à partir de sources d'énergie elles-mêmes non émettrices de CO₂ (énergies renouvelables ou énergie nucléaire),
- ▶ la dissociation thermochimique de l'eau, il s'agira ici de décomposer les éléments constituant l'eau en ajoutant simplement des éléments chimiques permettant de réaliser cette dissociation,
- ▶ la photo électrolyse, cette technique utilise le principe de l'électrolyse, mais ici la lumière est la source d'énergie, elle repose sur le principe de la photosynthèse,
- ▶ enfin, il est possible de produire de l'hydrogène à partir de biomasse, par thermolyse ou gazéification, le procédé est similaire à celui utilisé pour les l'énergie fossile, ici l'énergie principale provient des « déchets biologiques ».

L'hydrogène naturel

Bien que rare sous sa forme la plus épurée dans notre environnement, l'hydrogène a aussi été découvert à l'état naturel, en quantité minime pour l'heure, mais ces ressources pourraient s'avérer plus importantes que prévu.

En effet, en 1906, a été trouvé un champ de gaz comprenant de l'hydrogène à Vaux en Bugey, en France, puis, en 1930, ce gaz fut découvert dans les sédiments du Middle West aux États-Unis. C'est seulement, en 1970, que des travaux scientifiques ont été menés et ont confirmé la présence à l'état naturel de l'hydrogène dans les dorsales médio-océaniques, dans des fluides hydrothermaux à fort taux, mais aussi dans les gaz volcaniques, notamment ceux de l'Etna en Sicile avec 50 % de H₂, jusqu'à 82 % dans les gaz émanant du Kliuchevskoi au Kamchatka.

D'autres sources furent découvertes dans les eaux de sources hyperalcalines en Oman, par exemple, où la concentration est si importante que la couleur de l'eau est bleutée⁵⁶.

On peut aussi trouver l'hydrogène dans différentes failles notamment celle de San Andreas en Californie et dans diverses mines en Afrique du Sud et en Russie.

Enfin, dans des forages super-profonds de Kola en Russie et Kryvyi Rih en Ukraine a également été détecté la présence du fameux gaz.

La première exploitation de l'hydrogène naturel se trouve au Mali, à Bourakebougou, où depuis 2011 l'électricité du village voisin est alimentée par des turbines à hydrogène, obtenu après un forage de seulement 200 mètres de profondeur.

Il semble que des méthodes de prospection et d'exploitation performantes pourraient permettre d'exploiter cet hydrogène source d'énergie prometteuse.

Motorisations utilisées

L'hydrogène possédant des caractéristiques semblables au carburant gaz ou liquide. Il peut être utilisé dans un moteur thermique, l'un des avantages de l'utilisation de l'H₂ dans un moteur thermique reste dans les émissions

54- L'hydrogène gris est produit à partir de vaporeformage de combustibles fossiles

55- L'hydrogène vert est produit à partir d'énergies renouvelables (éolien et photovoltaïque essentiellement)

56- Voir la fiche 3.4 de l'AFHYPAC : « L'hydrogène naturel »

issues des échappements, celle-ci ne génère que de la chaleur, du dioxyde d'azote et de l'eau. Des dispositifs ont été développés pour contrer cette infime émission de NOx mais pour arriver à des résultats convenables toutefois, les coûts constructeurs semblent pour le moment très élevés. A cela, il faut ajouter un système d'injection plus performant nécessaire à mettre en place. En effet, le système d'injection de l'hydrogène nécessite de travailler à très basse température et il semble nécessaire pour cette motorisation d'amener l'H₂ à l'état gazeux dans les chambres de combustion. Pour le moment, vu les difficultés techniques rencontrées par les constructeurs, ceux-ci semblent plutôt se tourner vers un autre système moteur : la pile à combustible.

L'utilisation dans un moteur d'une pile à combustible permet de produire de l'électricité et d'alimenter des batteries pour faire fonctionner un moteur électrique. En réalité, il s'agit d'une technologie hybride. Ici est utilisé un gaz pour produire l'énergie électrique, cette énergie permettra la propulsion du véhicule par la mise en route d'un moteur électrique. Il s'agit du principe appelé « Gas to power ». Il est à noter qu'à volume égal l'hydrogène permet de générer beaucoup plus d'énergie qu'une batterie conventionnelle. Cette différence jouant en faveur de l'hydrogène peut permettre de palier à une difficulté majeure rencontrée par le véhicule électrique résidant dans l'autonomie et le poids total du véhicule. La quantité de batteries nécessaire au fonctionnement du système sera amoindri. Enfin, en termes d'émission, la pile à combustible n'émet finalement que de l'eau et de la chaleur résolvant le problème de dioxyde d'azote très coûteux pour la technologie du moteur à combustion.

Contraintes d'utilisation et limites

– Le catalyseur ou membrane

Pour fonctionner et avoir un bon rendement, une pile à combustible est dotée d'un catalyseur ou membrane qui permet la réaction chimique entre les particules d'oxygène et d'hydrogène afin de générer de l'électricité.

Deux difficultés toutefois : la première est que la membrane catalytique ne fonctionne correctement que de 0 degré à 80/90 degrés. Il faut donc installer un système de réchauffement et de refroidissement performant pour que la pile fonctionne dans de bonnes conditions. La seconde réside dans le coût de cette membrane. Effectivement, actuellement nous utilisons principalement le platine comme matériaux de cette membrane. Celui-ci est déposé en fines couches à la surface des deux électrodes. Or le platine est un métal rare, très coûteux, il pèse lourdement sur la compétitivité des piles à combustibles pour le moment et peut générer une dépendance stratégique vis-à-vis de ce matériau.

Des nanomatériaux catalytiques sont activement étudiés pour surmonter cet obstacle majeur. Le platine a un coût financier élevé mais aussi un coût énergétique élevé pour sa production (extraction des mines, purifications et donc un coût de production CO₂ élevé).

Une troisième difficulté s'ajoute aux deux précédentes : il s'agit de la qualité de l'air injecté. Pour que la pile fonctionne de manière optimale, il est nécessaire que l'oxygène utilisé soit pur. L'air potentiellement pollué entrant dans le système nécessite le plus souvent la mise en place d'un catalyseur lui aussi très cher. Enfin, les membranes (par exemple la pile Nafion de DuPont de Nemours) incorporent des composants fluorés relativement onéreux, en plus du platine sur les électrodes (Principe de fonctionnement d'un véhicule hydrogène - www.caradisiac.com).

Infrastructures

L'hydrogène ne nécessite pas de nouveau système d'acheminement, les systèmes réseaux actuels peuvent être utilisés, ce qui apparaît être un atout majeur pour son développement. Le power to Gas voit son principe de fabriquer de l'hydrogène par électrolyse et de l'injecter dans le réseau de gaz, soit directement, soit après méthanation.

La seule modification à envisager en termes d'infrastructure serait dédiée au stockage.

La distribution de l'hydrogène gazeux peut être réalisée par les réseaux de gaz de ville mais aussi par des gazoducs dédiés. Le stockage de l'hydrogène pourra se réaliser sous différentes formes, cela sera fonction de la quantité, de la durée d'acheminement, des techniques utilisées et de la topographie des lieux de stockage.

L'utilisation de gazoducs⁵⁷ apparaît adaptée au transport gazeux de l'hydrogène en grande quantité. Pour les quantités moins importantes le transport en bouteilles par voie terrestre pourra être utilisé.

57- Gazoducs : Canalisation destinée au transport de matières sous forme gazeuse.

Dans les gazoducs, le gaz sous pression peut circuler jusqu'à une vitesse de 40 km/h (de 10 à 100 bars). Annuellement, l'hydrogène transporté serait estimé à 100 000 millions de Nm³ ⁵⁸ (normaux-mètre cube). Il est à noter que les premières structures ont été mises en service, en 1938, en Allemagne dans la Ruhr et aucun problème majeur n'est à déplorer à ce jour.

Des projets ambitieux sont apparus permettant un transport à grande échelle et à grande distance de l'hydrogène. Le projet euro-qubécois financé par l'Europe en 1989 appelée EQHHPP⁵⁹ avait pour objectif de transporter l'hydrogène sous forme liquide issu, des excédents d'hydroélectricité du Québec vers l'Europe pour des utilisations en aéronautique, transport urbain etc.

Ce projet a été abandonné. Récemment, un projet Japonais appelé Hydrogen Road reprend cette idée en important l'hydrogène produit en Australie à partir de lignite⁶⁰. L'Australie s'engage à capter le dioxyde de carbone émis lors de la production de l'hydrogène à partir du lignite, créant ainsi de l'énergie verte. Le projet Nippon prévoit un paquebot pouvant transporter 4x40 000 m³ d'hydrogène liquide et les expérimentations étaient envisagées pour début 2020 (Projet LH2 par Kawasaki - www.afhypac.org/).

L'hydrogène est en majorité produit de manière centralisée sur des sites industriels par vaporeformage. Plusieurs modes d'approvisionnement sont utilisés pour ce type d'hydrogène :

- ▶ livraison sous forme liquide,
- ▶ livraison sous forme gazeuse,
- ▶ approvisionnement par pipelines (hors sujet en dehors de quelques implantations réalisées à proximité d'un ouvrage existant).

Un deuxième type de production d'hydrogène est à prendre en compte désormais, il s'agit de « l'hydrogène local⁶¹ ». Dans le cas qui nous occupe, l'électrolyse est utilisée pour produire l'hydrogène. L'hydrogène ainsi produit est stocké à proximité de la station.

L'hydrogène peut être distribué en station-service hydrogène. Pour approvisionner un véhicule disposant d'un réservoir à hydrogène, cela se fait principalement par gaz (comme la station de gaz naturel), même s'il existe une distribution sous forme liquide qui reste marginale. Les réservoirs étant majoritairement conçus pour recevoir l'hydrogène sous sa forme gazeuse, la distribution se fait alors par transfert de gaz comprimé grâce à une lance spécifique.

Le nombre de stations en France reste très faible (35 stations ouvertes début 2020). Actuellement, les coûts de mise en place pour une station H₂ sont bien supérieures à une station classique, environ 120 à 150 000 € pour une station essence contre plus d'un million d'euros pour une station hydrogène. La faible part du véhicule à hydrogène dans le parc automobile Français n'aide pas au développement de la filière.

Aussi l'Europe met en place des dispositifs visant à inciter l'utilisation de l'hydrogène en proposant des parcours sous forme d'autoroutes avec des stations à hydrogène pour favoriser le déplacement et l'arrivée sur le marché de différentes catégories de véhicule comme la voiture individuelle hydrogène en passant par le vélo à hydrogène et les bus, mènent à la construction de ces stations qui en premier temps seront dédiées aux projets de transports en communs ou privées notamment pour les entreprises, puis au fil du temps, en stations publiques (Cartes des stations hydrogène en Europe et en France - source : www.vighy-afhypac.org/).

Un rapport sur la filière hydrogène est disponible via : www.actu-environnement.com « Rapport cgedd-cgeiet hydrogene »

Bilan impact environnemental, carbone

Actuellement, l'hydrogène est produit essentiellement à partir d'énergie fossile (pétrole, gaz naturel, charbon) par des procédés de vaporeformage et d'oxydation partielle, le bilan carbone reste très lourd pour une utilisation dans la mobilité.

58- Normo mètre cube : Unité de mesure de quantité de gaz dans un mètre cube, à pression et température ambiante

59- EQHHPP : Euro-Québec hydro-Hydrogen pilot Project

60- Lignite : Variante de charbon composé de 65 à 75% de carbone

61- Génération d'hydrogène par électrolyse, puis injection dans la station. Tout cela dans le même site.

62- L'ammoniac (NH₃) est un gaz incolore et irritant, est utilisé dans la fabrication d'engrais azotés

L'hydrogène majoritairement utilisé de nos jours sert dans l'industrie notamment pour la production d'ammoniac⁶².

Des procédés différents ont été recherchés dès l'émergence de la mobilité hydrogène pour rendre le bilan carbone le plus neutre possible. Grâce à ces recherches des procédés plus « doux » que la production d'hydrogène « gris » ont été mis au point : il s'agit de différents procédés d'électrolyse. L'électrolyse est actuellement peu représentée (2 % en France en 2017) par rapport aux autres techniques de production à partir d'énergie fossile.

Ces procédés utilisant l'électrolyse associés aux énergies renouvelables (éoliennes, panneaux solaires, barrages, etc.) permettent d'optimiser l'empreinte carbone sur le bilan total d'un véhicule en la faisant diminuer considérablement [[Tableau des émissions et de l'autonomie des différents types d'énergie d'un véhicule \(Air Liquide\)](#)].

Bilan financier du système

Pour être économiquement et écologiquement viable, la production de dihydrogène doit répondre à trois critères :

- ▶ la compétitivité : les coûts de production ne doivent pas être trop élevés,
- ▶ le rendement énergétique : la production ne doit pas nécessiter trop d'énergie,
- ▶ la propreté : le processus de fabrication doit être non polluant, sous peine d'annuler l'un des principaux atouts du dihydrogène.

Ainsi concernant son coût de production et d'utilisation, l'hydrogène est produit en majorité à partir d'énergie fossile (95 %). Sa production, pour ce type de gaz, est beaucoup moins coûteuse que sa production par électrolyse. La production de ce type d'hydrogène demeure très polluante. Aussi les recherches actuelles portant sur l'autre production d'hydrogène (par électrolyse) tentent d'apporter des réponses efficaces afin de réduire le coût de production.

Quelques axes importants de réduction des coûts peuvent être identifiés : la pile à combustible, les stations d'approvisionnement, le stockage (réservoir véhicule).

Pour les piles à combustible, il en existe de plusieurs types. Ces piles utilisent des matériaux plus ou moins rares, ce qui leur permet de générer des puissances énergétiques plus ou moins importantes. Les coûts de fabrication des piles à combustible restent élevés. Les recherches menées portent sur ces points. Les piles à combustibles sont constituées pour la plupart de platine, matériau rare et plus cher que l'or. L'optimisation de l'utilisation du platine dans les différents types de piles aura un impact direct sur les prix. L'utilisation de ce métal se répercute quasiment directement sur le prix du kilogramme d'hydrogène.

Le prix des stations d'approvisionnement hydrogène peut être jusqu'à 10 fois le prix d'une station essence conventionnelle. Ce surcoût peut s'expliquer principalement par les technologies très récentes et peu répandues utilisées pour la mise en œuvre de ces stations.

Le prix de l'hydrogène est aussi impacté par les moyens de stockage. Le stockage liquide demande des réservoirs cryogéniques performants pour contenir l'hydrogène à -253 °C, cette technologie reste très coûteuse.

Enfin, le prix d'un véhicule disposant de ce type de motorisation reste encore très cher à l'achat, comparé aux voitures thermiques et même électriques, il faut compter pas moins de 50 000 €⁶³ pour une entrée de gamme hydrogène ce qui n'est pas à la portée de tous financièrement parlant.

Financièrement, l'hydrogène possède une limite due aux technologies encore récentes, mais la tendance pourrait s'améliorer grâce aux recherches sur les procédés moins coûteux et moins dépendants de certaines matières (platine par exemple). Le problème de réservoir peut être solutionné par les avancées sur le stockage du gaz dans des hydrures (CF. Mc Phy). Le marché de l'offre et de la demande ne fait que de débiter ce qui explique les prix élevés et la rareté d'infrastructures dédiés à ce type de propulsion. Les prix d'achat pourraient baisser, grâce à des incitations d'achats d'État comme cela a été fait pour les véhicules électriques ou récents, moins polluants, notamment les primes à la conversion.

62- L'ammoniac (NH₃) est un gaz incolore et irritant, est utilisé dans la fabrication d'engrais azotés

63- En 2019, le prix moyen d'un véhicule hydrogène s'élève à 70 000 euros (Hyundai Nexö à 76500€)

Impact sociétal

L'utilisation de l'hydrogène dans le monde de la propulsion propre aura un impact sociétal équivalent à celui du carburant essence ou diesel, grâce aux performances proches d'un moteur thermique en termes d'autonomie et de puissance, l'approvisionnement sera aussi simple que de faire un plein à la station traditionnelle.

Le frein actuel reste donc le coût de production et d'utilisation sur tout le cycle de vie de ce type de propulsion propre, mais il apparaît clairement que cela ne devrait être qu'une question de temps.

Maturité de la filière

La production d'hydrogène est assez mature par rapport à la demande industrielle, il reste à développer les procédés d'hydrogène « vert » à plus grande échelle afin de permettre une réduction des coûts de production pour concurrencer le prix de l'or noir. Dans le futur, cet hydrogène durable pourrait permettre de réduire considérablement les émissions de carbone. D'autres moyens de production sont prometteurs mais encore trop peu adaptés à une production à grande échelle. Dans ce cas, la production locale peut être envisageable et permettra une optimisation de la production d'énergie et de sa consommation. L'hydrogène naturel peut aussi devenir une source très prometteuse mais les ressources disponibles sont encore trop peu connues. L'avenir de l'hydrogène sera déterminé par son coût carbone global vis-à-vis du pétrole, mais aussi par la capacité des technologies associées à être viables dans le temps. Comme les piles à combustible, par exemple. Enfin, l'utilisation de métaux rares risque de poser problèmes pour la fabrication des piles à combustible, si une pénurie venait à se manifester, impactant fortement la fabrication pouvant conduire à une dépendance stratégique.

D'autre part, il est à garder en mémoire que l'hydrogène peut être directement injecté dans les réseaux de transport ou de distribution du gaz de ville, il s'agirait simplement de ne pas dépasser un certain pourcentage. Cela permettrait, par ailleurs, d'en alléger le bilan carbone. L'hydrogène peut également être mélangé à du gaz carbonique (CO₂), pour former par méthanation du biogaz et être également injecté dans le réseau. Deux expérimentations sont en cours : la première à Dunkerque avec le projet GRHYD (Gestion des réseaux par l'injection d'hydrogène). Grâce à l'électrolyse de l'eau, le surplus d'énergie produite par les énergies renouvelables et non consommée est transformé en oxygène et en hydrogène gazeux. Celui-ci est ensuite stocké à l'état solide grâce à des hydrures métalliques (technologie McPhy) : aucune pression n'étant nécessaire, on gagne du volume par rapport aux bonbonnes de gaz. Pour injecter l'hydrogène dans le réseau de gaz, on le déstocke sous sa forme gazeuse. Le gaz ainsi obtenu se compose de 6 à 20 % d'hydrogène. La seconde expérimentation est à Fos-sur-Mer, il s'agit du projet Jupiter 1 000.

L'électricité

Dans notre pays, l'électricité est essentiellement issue des centrales nucléaires (plus de 70 %), dont la force principale est de ne pas rejeter de CO₂. Cependant, l'électricité dans le monde est produite grâce aux énergies fossiles à plus de 60 %. Cela signifie qu'en termes de propulsion propre, le véhicule électrique produit indirectement du gaz à effet de serre, mais plus ou moins selon la source d'énergie utilisée. Grâce à sa part de nucléaire, le rejet de CO₂ en France est donc beaucoup moins important que dans d'autres pays qui utilisent du charbon pour produire de l'électricité par exemple. Les déchets nucléaires restent le grand problème de cette source d'énergie.

Mode de production et commercialisation

L'énergie électrique est produite via d'autres sources d'énergie, dans le monde cette production est principalement obtenue grâce aux énergies fossiles⁶⁴ : charbon, gaz naturel ou pétrole. Ces énergies sont polluantes et finies. Le gaz naturel apparaît être le moins polluant, ces rejets de CO₂ sont moindres. Le charbon reste cependant la première source de production d'électricité dans le monde et cela s'explique par son faible coût de production et son abondance à faible profondeur. Ce type d'énergie semble être utilisé principalement dans les pays émergents.

64- Dans le monde, l'électricité produite à partir d'énergie fossile représente près de 80 %.

L'électricité est aussi produite grâce à l'énergie nucléaire, c'est le même principe que pour les énergies fossiles : faire tourner une turbine qui produit de l'électricité. Le point fort est l'absence d'émission de gaz à effet de serre, toutefois, cette technologie génère des déchets très dangereux qu'il faut stoker et ce stockage coûte très cher. Les matières premières utilisées sont l'uranium et le plutonium, source d'origine naturelle. Ces matières fissiles sont présentes en quantité limitée sur terre et le coût d'extraction est estimé varier en moyenne entre 106 € / kg à plus de 230 € / kg, contre 22 €/ baril⁶⁵ à 66 €/baril pour le pétrole. Pour palier le problème des déchets nucléaires, la France a effectué des recherches de recyclage⁶⁶ de ces déchets, ce qui permet de produire jusqu'à une dizaine de pourcentages d'électricité en plus par rapport à la production globale.

La mobilité utilisant des modes de propulsions électriques contribue à augmenter cette demande d'énergie, ce qui engendre une augmentation des pollutions dues aux énergies fossiles utilisées dans ces usines de production d'électricité. Il est à noter également que le risque de black-out⁶⁷ augmente sensiblement si le réseau électrique voit sa demande d'énergie augmenter proportionnellement à l'augmentation des véhicules rechargeables. Il semble alors utile de trouver le moyen de maîtriser ce problème tout en évitant de produire davantage de CO₂. La solution résiderait dans l'utilisation mesurée des énergies renouvelables dans le but de réduire le nombre d'usines à énergies fossiles de production d'électricité ([Part de la production d'électricité en France en 2018](#), source : DATALAB).

Il est possible aussi de parler d'un type d'électricité particulier, il s'agit de l'électricité « verte ». Elle est issue de plusieurs moyens de production d'énergie renouvelable, notamment grâce aux panneaux solaires, parcs éoliens et hydroliens, etc. Les barrages sont aussi vecteurs de production d'énergie renouvelable verte et ils permettent aussi de stocker l'énergie.

L'électricité est une source d'énergie facilement disponible partout sur l'ensemble du territoire national. Pour acheminer cette énergie, la structure étant déjà en place, cela représente un avantage certain pour la mise en place de bornes de recharge. La modification majeure consisterait à dimensionner le réseau pour accueillir une demande plus importante. Ce changement pourrait être réfléchi et accompagné de façon plus économique et plus optimisée, par exemple, grâce aux réseaux électriques intelligents (smartgrids⁶⁸). Ces réseaux d'électricité connectés permettent de fournir l'énergie là où il faut en temps voulu. Cela permet de garder la dimension actuelle du réseau, d'en optimiser son utilisation.

Infrastructures

La propulsion électrique que nous connaissons aujourd'hui a été initiée dans les années 70 à la suite du choc pétrolier de 1973 aux États-Unis. Le regard porté vers des solutions alternatives à la dépendance à l'énergie fossile a permis de relancer les modes de propulsions électriques.

En France, cette orientation apparaît au milieu des années 80, via le programme Volta 4 initié par le constructeur Renault qui proposait une version électrique du Renault Master. Dans les années 90, PSA présente les modèles Peugeot 106 et Citroën Saxo entièrement électriques. Avec une clientèle visée sur l'utilisation de moyens de déplacement en ville, cela permet l'essor des bornes rechargeables à domicile mais surtout en ville, permettant l'arrivée de sociétés fournisseur de services de recharge.

Grâce à cette évolution, la France compte aujourd'hui près de 200 000 bornes rechargeables, installées à la maison, sur les parkings ou dans les rues, dont 27 000 stations de recharge, ce qui fait plus du double de stations traditionnelles (11 000 en 2018). De plus, il est possible de trouver une station à proximité, grâce aux nombreux dispositifs en ligne, avec notamment des cartes⁶⁹ répertoriant les bornes de recharge en France.

A domicile, pour recharger son véhicule, il est nécessaire d'installer une borne électrique afin d'éviter les risques d'échauffement du câble et aussi parce que les circuits traditionnels ne sont pas toujours dimensionnés pour une telle puissance. Les bornes permettent aussi une recharge plus rapide qu'avec un simple câble relié à l'habitation. Les bornes mises en place un peu partout dans les villes permettent quant à elles, de fournir un point

65- 1 Baril = 157 litres

66- Voir article de la SFEN « L'uranium dans le monde »

67- Un black-out est une panne de courant à grande échelle.

68- Smartgrids est un réseau électrique intelligent qui permet le contrôle des flux de consommation.

69- Carte visible via fr.chargeamap.com/map

de rechargement bien plus rapide que celui à domicile. Elles fournissent une puissance plus importante que celle autorisée pour les installations domestiques. L'atout majeur réside en leur vitesse de recharge, bien supérieure à la recharge à domicile.

De plus, la borne de recharge permet de recharger la batterie au niveau strictement nécessaire afin d'éviter sa dégradation⁷⁰. En fournissant ainsi une charge adaptée, cela permet de recharger plus rapidement la batterie tout en évitant la surchauffe de celle-ci en préservant son autonomie et sa durée de vie (Carte de bornes de recharges électriques en Normandie - source : <https://fr.chargemap.com/map>).

Bilan impact environnemental, carbone

Aujourd'hui la position n'est pas clairement tranchée sur l'impact environnemental réel de ce type de propulsion, les avis sont partagés. Certains pensent que le véhicule électrique est plus polluant qu'une simple voiture traditionnelle à cause notamment de la grande quantité d'énergie nécessaire pour produire les batteries et le véhicule.

Il est à noter qu'une voiture électrique n'émet pas ou peu de gaz à effet de serre lors de son utilisation, mais elle en a émis beaucoup avant, lors de sa fabrication et elle en générera encore lors de son recyclage. L'Ademe a cherché à départager ces différents modes, toutefois des limites méthodologiques peuvent être soulevées portant sur les hypothèses et postulats posés au début de l'étude, ce qui semble en amoindrir l'analyse. Enfin, pour que le bilan environnemental soit positif, il apparaît indispensable que le véhicule électrique utilise une électricité « non polluante » ou la plus verte possible, que celle-ci soit issue des énergies renouvelables et / ou de l'énergie nucléaire. Ce qui est le cas pour la France avec plus de 70 % d'électricité issue de l'énergie nucléaire.

En termes de recyclage, la partie la plus importante dans un véhicule électrique est la batterie qui représente 75 % de sa contribution au changement climatique. Le problème de recyclage de cette dernière est souvent évoqué mais les progrès technologiques permettent un recyclage de plus de 75 % (d'après Corepile)⁷¹ sur la plupart des batteries alors qu'un taux de recyclage minimum de 50 % est exigé en France. A savoir que dans ces chiffres, les batteries au Nickel Métal Hydrures (NiMH) sont recyclées à 75 % en moyenne, et 70 % pour les batteries lithium-ion (Li-ion), les 20 à 30 % restants sont brûlées, il en resterait alors 2 % environ qui sont enfouis. Lors de l'utilisation du véhicule électrique, il n'y a pas ou peu de nuisance sonore et les seules particules émises le sont lors du freinage et l'usure des pneumatiques.

Maturité de la filière

La propulsion électrique ne se limite pas aux voitures personnelles. En effet, l'électricité peut être utilisée pour des vélos électriques, des trottinettes mais aussi des bateaux, elle est utilisée depuis de longtemps par les trains via les caténares⁷².

Au regard des limites d'autonomie de ce type de propulsion, le choix d'utiliser ce genre de technologie doit, pour le moment être adaptée en termes de distance. Il apparaît préférable d'adopter le véhicule électrique sur de petits trajets, en ville par exemple. Il en est de même pour le bateau pour le moment, l'utilisation de l'électricité est souvent réservée aux bateaux de tourisme en ville, pour passer d'une rive à l'autre à cause de la faible autonomie. Certains modèles sont équipés de panneaux solaires pour tenter d'augmenter cette autonomie mais sont surtout présents pour alimenter les périphériques. Les trains sont, pour leur part, très bien adaptés et d'ailleurs utilisent cette source d'énergie depuis de nombreuses années (Représentation part des ventes de VE - source : <https://les-smartgrids.fr/mobilite-electrique-smart-grids-2-3/>).

70- Voir l'article d'automobile-magazine du 30 octobre 2019 « Comment recharger sa voiture électrique ?

71- Voir le rapport d'activité 2019 sur Corepile.fr

72- Caténaire : Ensemble de câbles porteurs et fils conducteurs pour les transports électriques.

Les types de stockage

Le stockage de l'énergie pour la propulsion propre est un point très important à prendre en compte. En effet, c'est l'énergie stockée dans le réservoir qui permet au véhicule de se déplacer, qui définit aussi son autonomie. Il existe quatre formes de stockage de l'énergie. Nous verrons les différentes technologies associées aux stockages des différentes énergies qu'embarquent nos moyens de déplacements, de transport.

Stockage liquide

Stocker un carburant liquide est le moyen de contenir l'énergie d'un véhicule le plus courant, avec l'adoption des carburants sous forme liquide comme l'essence, le diesel, le kérosène et le fioul. C'est aussi le plus simple à mettre en place, il n'existe pas vraiment de contraintes comme la pression ou maintenir à une température différente à celle ambiante. Autrefois, simple cylindre métallique, aujourd'hui les réservoirs sont désormais produits en polymères,⁷³ plus résistants dans le temps, contre les chocs et plus légers. Ils permettent aussi une certaine déformation pour éviter la casse lors d'un impact.

D'autres carburants non liquides à pression atmosphérique⁷⁴ sont amenés à l'état liquide et le stockage est donc différent : sous forme de bonbonnes, car la pression est plus importante, et la température peut être très basse. C'est notamment le cas du GPL où le gaz est porté à l'état liquide, avec un point d'ébullition à -30 °C, il faut donc monter cette pression pour stocker le GPL à température ambiante. Comme cette température peut varier, la pression aussi, les réservoirs GPL sont conçus pour supporter une pression de 30 bars.

Pour le Gaz naturel liquéfié, il faut porter sa température à -160 °C environ pour le conserver à l'état liquide à pression atmosphérique, il est nécessaire d'utiliser des réservoirs cryogéniques.⁷⁵

L'hydrogène liquide est, pour sa part, une technologie plus sophistiquée en raison de la température très basse de -253 °C. Actuellement cette technologie est utilisée dans le monde de la propulsion spatiale, en raison des coûts de recherche et de production importants (Réservoir cryogénique pour hydrogène liquide - source : www.airliquide.com/fr/industrie/cryogenie-industrielle).

Caractéristiques

Les réservoirs classiques sont généralement d'une contenance de 45 à 70 litres pour les petits modèles. Ils tendent à rétrécir à cause des réglementations contre la pollution, à cause de la réduction du poids global des véhicules et de développement des systèmes hybrides. Ils sont constitués d'une structure métallique en aluminium, acier, ou plastique pour les plus récents.

Pour les réservoirs cryogéniques, le système reprend les mêmes bases de sécurité, et possède des caractéristiques de conservation de température plus poussées pour contenir le carburant à très faible température.

Maturité

Actuellement, le stockage des hydrocarbures comme l'essence ou le diesel est arrivé à maturation. Initialement construit en métal, les réservoirs sont désormais réalisés à base de polyéthylène de haute densité permettant une meilleure utilisation de l'espace disponible. Ce type de fabrication permet d'éliminer la corrosion et augmente considérablement l'imperméabilité du réservoir des gaz produits par le carburant sous l'effet de la chaleur. Les réservoirs traditionnels tendent à être plus petits suite aux réglementations en termes de limitations de pollution.

En ce qui concerne le stockage liquide des gaz liquéfiés, le stockage est maîtrisé mais les prix sont relativement élevés. Des consignes de sécurité sont à respecter, par exemple, sur le ravitaillement en carburant, où le port de

73- Un polymère est un ensemble de micromolécules.

74- La pression atmosphérique est de 1013,25 hPa (hectopascal) en moyenne.

75- Réservoirs à très basse température.

gants et d'un masque et obligatoire, en raison des températures très basses, de l'ordre de -160 °C pour le GNL, et -253 °C pour l'hydrogène. Enfin, la conception du réservoir est plus sophistiquée que le réservoir classique, car la température doit être maintenue.

Avantages et limites

Ce type de stockage reste toutefois facile et permet un ravitaillement aisé. Les carburants gazeux à pression et température ambiante permettent, une fois liquéfié, de contenir beaucoup plus de produit et d'augmenter ses capacités. Par exemple, l'équivalent de 1 litre de GPL liquide revient à environ 280 litres en état gazeux.

Stockage solide

Actuellement, le stockage solide n'est possible qu'avec l'hydrogène. Cette variante de stockage de l'énergie permet de réduire les coûts vis-à-vis du stockage liquide de l'hydrogène, véritable gouffre financier par rapport aux contraintes de liquéfaction. Cette technique est vue comme adéquate à un stockage intermédiaire entre les petites quantités d'énergie, où le stockage gazeux est adapté, et le stockage liquide, pour les demandes importantes d'énergie. Nous devrions donc retrouver, dans les années futures, des véhicules de mobilité moyenne, disposant d'un stockage solide de l'hydrogène pour se mouvoir. Deux techniques sont actuellement utilisées pour porter l'hydrogène à l'état solide : le stockage par adsorption, retenu par la surface de certains matériaux, et le stockage par absorption, où l'hydrogène est combiné aux métaux et alliages métalliques. Par abus de langage, nous disons que le stockage de l'hydrogène se fait sous forme solide mais cela désigne en réalité le stockage de l'hydrogène dans un solide (Forme solide la plus avancée : l'hydrure de magnésium - source : <https://mcphy.com/fr>).

Caractéristiques

Ces moyens de stockage solide de l'hydrogène sont réalisés par procédés physiques, ou par combinaison chimique. Le principe de stockage par adsorption est de piéger les molécules d'hydrogène entre les molécules de matières solides poreuses⁷⁶. Grâce aux matières poreuses, les surfaces d'interaction avec le gaz sont importantes. Les matières utilisées sont les charbons actifs, proposant un contenu en hydrogène jusqu'à 2 % de la masse moléculaire. Les nanotubes de carbone sont aussi utilisés mais plus difficiles à produire, en contrepartie la capacité d'adsorption est de 6 %. Ce moyen de stockage est actuellement difficile à réaliser et la deuxième solution semble plus prometteuse en raison de caractéristiques de performance massique plus avancée.

L'autre solution consiste à utiliser la faculté des métaux à absorber l'hydrogène, en formant des hydrures⁷⁷. Grâce à ce procédé, l'hydrure de magnésium permet un stockage de 50g d'hydrogène dans une poudre mélangée avec du graphite et compactée sous forme de galette. Afin d'en tirer l'hydrogène lors de l'utilisation, les galettes sont chauffées entre 350 °C et 370 °C. Ce stockage possède un rendement tout de même plus élevé que la première solution mais toujours faible (moins de 10 %), l'atout de ce stockage est qu'il permet de stocker des centaines de kilogrammes d'hydrogène sans risque, comparé à l'hydrogène gazeux ou liquide. Son utilisation reste étonnamment à un usage confidentiel voire nul...Pourtant, cela semble être adapté pour les véhicules mobiles de poids intermédiaire notamment les petits navires et poids lourds.

Maturité

Actuellement, le stockage solide semble être une technologie peu avancée dans le monde industriel, et encore moins pour la mobilité. Les recherches sont toujours en cours et des tentatives de stockage solide ont déjà été expérimentées, notamment en France avec la société McPhy, dont l'innovation et le stockage solide de l'hydrogène sont au point.

76- Solides poreux : La roche, le charbon.

77- L'ion hydrure est un anion d'hydrogène H⁻, composé d'un élément d'hydrogène et un autre encore moins électro-négatif.

Avantages et limites

La principale qualité de ce moyen de stockage est la sécurité vis-à-vis des autres moyens de stockage de l'hydrogène. En effet, sous forme gazeux le risque est que la bonbonne explose à la suite d'un choc, ou d'une fuite. Sous forme liquide, le risque est lors du ravitaillement, à cause des températures très basses, il y a donc des précautions de manipulation. Ici très peu de risque ! Cette technique permet également de stocker de très grande quantité de gaz dans un faible volume.

Toutefois, les limites semblent se situer au niveau des coûts financiers, la technologie reste étonnamment encore extrêmement confidentielle alors que son potentiel en développement est révolutionnaire. Des développements seraient toujours en cours.

L'avance technologique française dans ce domaine, si elle n'est pas suivie de développement industriel organisé et structuré, fera l'objet d'une prise en main inévitable de la concurrence lors de la sortie des brevets dans le domaine public .

Stockage gazeux

Stocker un gaz dans un véhicule mobile nécessite des normes de sécurité plus importantes que tout autre moyen de stockage de carburant. En effet, ce moyen de stockage demande à comprimer le gaz à pression plus importante que la normale. A pression atmosphérique, le carburant doit être confiné dans un dispositif le plus étanche possible et ce dernier doit être résistant au fil du temps. Selon le carburant comprimé, la pression peut être plus ou moins importante, en conséquence la bonbonne doit être suffisamment performante pour maintenir une telle pression, tout en optimisant le poids de celle-ci.

Caractéristiques

Enfermer un gaz dans un compartiment nécessite de le compacter pour avoir le plus d'énergie possible dans ce compartiment, de ce fait c'est la pression qui entre en jeu. Pour cela il faut augmenter la pression dans ce compartiment, et faire en sorte que cette pression soit constante et que le dispositif soit résistant dans le temps, aux chocs, et aux fuites possibles. Généralement, ces pressions sont importantes, de l'ordre de 200 bars pour le GNV, et de 350 ou 700 bars pour l'hydrogène.

Il existe 4 types de réservoirs :

- ▶ le réservoir de type 1 est une bonbonne classique fait de métal traditionnel, à usage industriel, son poids est important et inadapté à un stockage type réservoir pour VHL,
- ▶ le réservoir de type 2 possède une couche supplémentaire de carbone à l'intérieur du réservoir, lui confère une résistance plus grande pour un poids plus faible. Le coût est cependant plus élevé,
- ▶ le type 3 est un réservoir en composite de fibre de carbone dont la paroi intérieure est en acier ou en aluminium. Cela permet une pression du gaz plus élevée, le coût est aussi plus élevé,
- ▶ le type 4 est constitué de fibre de carbone et d'un liner intérieur en plastique polyéthylène, cette méthode de fabrication lui confère une très grande résistance pour un poids encore plus faible. Son utilisation est souvent dédiée au stockage de l'hydrogène. C'est aussi le plus cher de tous en raison d'un besoin important en fibre de carbone. Ces bonbonnes possèdent des dispositifs de sécurité pour éviter l'explosion grâce à une soupape de sécurité. De nombreux capteurs sont présents pour mesurer la pression, la détection de fuite et de température.

Les bonbonnes pour le gaz pétrole liquéfié (GPL) sont aussi soumises à l'installation d'une soupape de sécurité, afin d'éviter les éventuels risques d'explosion dus au fuite de gaz. Un passage d'épreuve du réservoir est nécessaire tous les 8 ans⁷⁸ pour vérifier la qualité de ce dernier (Caractéristiques des réservoirs gazeux - source : www.afhypac.org/).

78- Voir l'article de Parisgpl.fr sur « le Réservoir GPL »

Maturité

La filière du stockage à l'état gazeux est assez mature en termes de capacité de stockage mais le prix reste important. Le coût de stockage reste le frein principal pour cette technologie. La sécurité est mature pour un usage mobile.

Avantages et limites

Ce type de stockage permet de stocker beaucoup de gaz dans un petit volume, mais il resterait sensible au phénomène explosif.

Un avantage à noter est que le gaz peut être injecté directement dans le moteur depuis le réservoir. Il n'y a pas besoin de dispositif lourd supplémentaire pour acheminer le gaz contrairement aux liquides où une pompe est nécessaire par exemple.

Actuellement, ce type de stockage resterait faiblement utilisé en raison des idées reçues concernant les risques encourus. Même si le risque d'explosion existe, il semble aujourd'hui maîtrisé, la sécurité du système est renforcée par de nombreux dispositifs. Ceux-ci se révèlent aussi efficace que pour les réservoirs liquides voire meilleur lors d'un choc.

Stockage électrique

L'unique moyen de stocker, pour le moment, l'électricité pour la propulsion propre est de la stocker dans des batteries. Il existe de nombreuses technologies de batteries mais 4 technologies sont principalement utilisées actuellement : le Lithium Nickel Cobalt Manganèse (LiNMC), Lithium ion Fer Phosphate (LiFePo4), Nickel métal Hydrure (NiMH) et Nickel Cadmium (Ni-Cd). Chacune possédant des limites et des avantages, elles seront décrites ci-dessous. De nouvelles technologies prometteuses sont actuellement en développement, dont certaines sont proches de la commercialisation.

Caractéristiques

Les caractéristiques d'une batterie idéale dédiée à la propulsion sont la quantité d'énergie embarquée, le temps de recharge et l'autonomie.

Le kWh est l'unité de mesure de la quantité d'énergie embarquée. Plus le moteur est puissant, plus il consomme d'énergie et donc la batterie doit être plus importante pour apporter l'énergie suffisante. Par exemple, si une voiture consomme en moyenne 20 kWh au 100 km, et que sa batterie est de 100 kWh, alors son autonomie théorique serait de 500 km. Cela exclut les pertes⁷⁹, et les variations de puissance lors d'accélération, de pentes, de forte vitesse, cette autonomie est donc différente lors d'une utilisation réelle. Le temps de recharge varie selon les modèles de batteries. Si elle possède une plus grande capacité d'énergie, alors son chargement sera plus long. Sa recharge est aussi déterminée par la puissance qui lui est délivrée. Plus la puissance est importante, plus la vitesse de recharge est rapide, plus le temps de rechargement est réduit. Une prise domestique aura une puissance de charge plus faible comparée aux bornes dédiées à ce type de technologie. Ainsi, il faudra compter en moyenne 10 heures pour un rechargement complet, contre 1 heure pour une borne publique.

Types de technologies utilisées

La batterie que nous connaissons tous est la plus ancienne, mais aussi la moins chère, qui contient le moins d'énergie et est aussi la plus lourde : la batterie au plomb. Le coût de revient du Wh s'élève à 20 centimes d'euros environ et possède une durée de vie de 200 à 400 cycles⁸⁰. Ses polluants sont le plomb et le mercure. Ces batteries

79- Pertes + rendement d'un moteur électrique (plus de 95 %)

80- 1 cycle représente une décharge et une charge complète de la batterie.

sont amenées à disparaître en raison de leurs caractéristiques défavorables : le poids et la quantité d'énergie embarquée.

Les accumulateurs au nickel ont fait leur apparition peu de temps après le plomb pour augmenter la durée de vie et la capacité. C'est au début des années 1900 que la batterie Nickel Cadmium (NiCd) est présentée comme la batterie de la mobilité. Avec une recharge simple et rapide, elle supporte entre 1 500 et 2 000 cycles de charge / décharge, avec une capacité de charge plus importante que le plomb.

Cette batterie sera améliorée en 1975 par le nickel-hydrure métallique (NiMH), proposant une grande capacité de charge et une faible sensibilité à l'effet mémoire, affectant les performances et durée de vie des batteries lors d'une recharge avant décharge complète. En contrepartie, le nombre de cycles baisse pour arriver à une moyenne comprise entre 800 et 1 000 cycles de recharge / décharge. Ces batteries sont développées pour équiper les voitures hybrides.

Depuis, une nouvelle technologie de batterie a fait son apparition : les batteries au Lithium – ion, apparues dès les années 90, elles offrent une grande capacité de stockage, avec un poids faible et sont désormais utilisées dans de nombreux appareils portatifs. La limite majeure de cette technologie est sa dangerosité, si ces batteries sont surchargées, les risques d'explosions sont graves. Pour éviter cela, la gestion de la charge est réalisée par électronique. De plus, si la batterie subit un coup violent ou qu'elle se voit percée, une inflammation de la batterie est possible. Son prix reste globalement correct bien qu'il soit trois fois supérieur à celui des batteries composées de plomb. Avec un coût de revient d'environ 65 centimes du Wh, sa durée de vie reste tout de même proche des précédentes avec un nombre de cycle allant de 500 à 1 000 en moyenne.

Des améliorations ont cependant été apportées pour palier ces défauts de dangerosité. La technologie lithium polymère (Li-Po) possède un électrolyte à base de gel, la rendant moins dangereuse que la version lithium ion de base. Les caractéristiques sont globalement similaires et permettent une stabilité plus importante. Cependant, sa recharge est plus compliquée et nécessite un chargeur spécifique. Si la recharge n'est pas adaptée, il y a un risque que la batterie prenne feu. Son prix est plus élevé que la version lithium ion, et son usage est plutôt adapté dans le modélisme en raison d'un poids plus faible.

La dernière technologie utilisée à grande échelle est la version lithium fer phosphate (LiFePo₄), apparue en 1997. L'avantage de cette batterie est sa stabilité très avancée par rapport à toutes les autres batteries, mais elle stocke moins d'énergie. Cela peut se compenser, car elle permet de réaliser jusqu'à quatre fois plus de cycles de charge/décharge qu'une batterie lithium ion et cinq fois pour une batterie au plomb. Enfin, sa tension proche d'une batterie 12V au plomb permet de la remplacer sans aucun changement électrique environnant (Différentes technologies de batteries - source : <https://eduscol.education.fr/>).

Maturité

Les batteries actuelles sont bien plus « performantes » que les premières batteries au plomb. Toutefois, leur capacité de charge reste encore un problème aujourd'hui, ainsi que le poids. Le poids demeure le véritable point noir de la propulsion électrique, les recherches sont en cours pour réduire fortement le poids de ces accumulateurs tout en gardant la même capacité, voire en l'augmentant. Des batteries « tout solides » sont probablement les technologies prometteuses de demain. Elles offriraient des capacités de charge bien supérieures au lithium. La durée de vie de ces batteries devrait elle aussi être améliorée et son recyclage pourrait avoisiner les 100 %. Le recyclage étant un autre point noir des batteries. Aussi, des technologies comme la batterie au sodium-ion⁸¹, dépourvue de terres rares et métaux critiques semblent ouvrir des perspectives nouvelles assez considérables bien qu'elle stockerait, selon toute vraisemblance, moins d'énergie. Ou encore les batteries aluminium-air, qui présentent des caractéristiques de recharge très rapide, sans perte de charge dans le temps ainsi qu'un poids considérablement réduit. Ces technologies devraient rapidement arriver au terme de leur développement et équiper les véhicules électriques de demain.

Le recyclage

Le recyclage des batteries est un grand point de questionnement pour tous. Depuis le décret n°2009-1139 du

81- Sodium-ion, technologie à base de sel (sodium).

22 septembre 2009, la France exige un recyclage à hauteur de 50 % minimum pour une batterie lithium ion, actuellement cette part de recyclage serait meilleure avec plus de 75 % de la matière de la batterie recyclée. Dans notre pays, une filière dédiée au recyclage des piles et accumulateurs portables existe. Les batteries des véhicules électriques sont catégorisées comme piles et accumulateurs industriels. Cette directive a pour but d'améliorer le fonctionnement de cette filière, comprenant la collecte et le traitement des batteries. Cette directive émet des restrictions d'utilisation des substances dangereuses, elle établit un taux de collecte sélective des déchets de piles et accumulateurs et elle oblige à tenir un registre national des producteurs et opérateurs de traitement. Actuellement, il existe deux éco-organismes agréés pour la gestion des déchets des batteries : Corepile et Screlec⁸². Le recyclage encadré permet un taux de recyclage global, toutes batteries confondues, de près de 80 % d'après Corepile sur les chiffres d'activité de 2019. Les principales matières non recyclées seraient le manganèse, le graphite et les résidus. Le dimensionnement du parc batterie doit être corrélé à l'outil de recyclage, une planification s'impose sur ce point vu l'ampleur de la production qui s'annonce.

Avantages et limites

Le stockage d'électricité permet un fonctionnement sans rejet de CO₂ lors de l'utilisation du véhicule électrique, sa source d'énergie peut être renouvelable ce qui réduit encore plus les émissions indirectes. Le poids et l'autonomie des batteries restent un handicap en comparaison des autres technologies qui équipent nos véhicules. Les coûts de production actuels et les matériaux utilisés pas toujours recyclables, sont aussi un frein à la généralisation de cette technologie mais la recherche et le développement semblent très prometteurs et devraient permettre de palier ces défauts.

Les types de vecteur

Les vecteurs concernant la propulsion propre sont définis selon la distance à parcourir et selon l'environnement où évolue le mobile. Que cela soit un transport de marchandises, ou le transport de personnes, la propulsion doit être adaptée pour favoriser l'utilisation. Différents types de vecteurs seront donc présentés ci-dessous pour établir un catalogue des véhicules adaptés à chaque utilisation.

Mer et fluvial

La mobilité sur l'eau est un domaine proposant de nombreux choix pour tous les besoins, en commençant par les bateaux commerciaux : les porte-conteneurs. Ainsi que les bateaux de croisières, (paquebots) ce sont les deux grands véhicules circulant sur la mer, les océans et même sur les fleuves. Il existe aussi des bateaux de plus petites tailles, destinés aux loisirs, à la pêche ou les voyages de courtes distances. Chaque type de bateau voit sa motorisation dimensionnée selon la quantité d'énergie nécessaire. Les bateaux de taille plus importante se verront équipés de motorisations produisant de grande quantité d'énergie et de puissance, tandis que les embarcations moins importantes se verront équipées de petits moteurs.

Transport de marchandises

Propulsés par un moteur à vapeur à leurs débuts, ils sont désormais principalement équipés de plusieurs motorisations à la fois, pour les plus récents. L'une pour produire l'énergie de propulsion, l'autre pour faire fonctionner les systèmes à bord du bateau. Le moteur diesel est principalement utilisé dans ce domaine en tant que propulseur, et le moteur électrique l'est pour les périphériques comme les équipements de navigation et l'éclairage. Les générateurs diesels tendent à être remplacés par les moteurs à gaz, afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre. A noter que le secteur maritime est responsable de près de 3 % des émissions dans le monde.

82- www.corepile.fr et www.screlec.fr

Ces moteurs à gaz permettent de réduire de 90 % les émissions d'oxydes de soufre, de 95 % les particules fines et jusqu'à 20 % les émissions de CO₂. De plus, en utilisant la technologie du gaz naturel liquéfié, la consommation est moins importante.

Il existe différents types de bateaux, à commencer par les navires, destinés aux voyages en mer, c'est aussi les plus imposants. Dans cette famille, certains sont spécialisés dans le transport de matières brutes comme le sable, le gravier, les céréales... d'autres dans les conteneurs ou même le transport de carburants et de produits chimiques. Tous, de par leur dimension extrême, nécessitent une forte puissance afin de se mouvoir. Ils sont donc équipés de motorisations de type diesel, fonctionnant au fioul lourd en raison des dimensions gigantesques des moteurs. Rattrapé par la norme IMO III, restreignant les émissions de polluants en mer, le diesel est poussé à disparaître au profit d'autres sources d'énergies, principalement renouvelables. C'est pourquoi les compagnies d'affrètement maritime se tournent vers d'autres technologies, comme CMA CGM qui se tourne vers le GNL et décide de commander tous ses futurs porte-conteneurs propulsés au gaz liquéfié. D'autres compagnies optent pour une hybridation de la propulsion avec des voiles comme le Canopée, prévu pour 2022, disposant de quatre moteurs diesel/GNL et de quatre voiles. Grâce à ces techniques d'hybridation et d'optimisation de l'énergie, les économies peuvent être très importantes au niveau du carburant, en plus des émissions de polluants.

Ensuite, nous avons les plus petits bateaux de transports de marchandises adaptés pour les plus petites voies navigables, la plupart sont les péniches. Elles ont pour but d'acheminer au point final les matières premières et cargaisons situées en ville, au bord de fleuves. Elles étaient mues autrefois par l'homme et les animaux, remplacés ensuite par des locotracteurs électriques. Ensuite, les moteurs diesels embarqués furent utilisés. D'autres péniches moins imposantes sont équipées de moteurs électriques. Actuellement, les péniches récentes sont équipées en tout électrique, comme la société Port-Liner, aux Pays-Bas, qui présente, dès 2018, une péniche totalement électrique pour le transport fluvial de marchandises.

Transports de personnes

Les navires de croisières font partie des véhicules les plus polluants, du fait de leur grandeur et des nombreuses technologies qui les équipent, la consommation en termes d'énergie est très importante. De véritables hôtels sur mer. La première compagnie mondiale de croisière, Carnival Corporation, émet plus de dix fois d'oxyde de soufre que l'ensemble du parc automobile européen, et ce n'est rien comparé à la compagnie Royal Caribbean, qui en rejette quatre fois plus que son concurrent. L'usage du carburant gasoil comme le fioul pose un réel problème même si les teneurs en soufre ont fortement baissé depuis quelques années. L'usage du GNL serait la principale des solutions, le GNL permet une réduction jusqu'à 99 % de cette teneur. De plus, la carburation au gaz permettrait une réduction de la consommation de carburant. Pour remédier à cela, les ports peuvent être électrifiés, comme le port de Toulon, où son process logistique est entièrement équipé à l'électrique. Les bateaux électriques peuvent même se recharger sur les quais grâce aux bornes disponibles. D'autres projets comme les bateaux à voiles sont en démonstration comme Eoseas qui ferait baisser considérablement les consommations en utilisant seulement des moteurs plus petits pour générer l'électricité à bord du navire. L'hydrogène apparaît lui aussi, une expérimentation a lieu actuellement avec Energy Observer, bateau entièrement autonome en énergie, utilisant la technologie de la pile à combustible couplée au solaire et à des turbo-voiles pour avancer. Actuellement, ce bateau est en voyage autour du monde, il n'émettrait aucun rejet de polluants, et consommerait quasiment pas d'énergie fossile. L'énergie produite à bord est possible grâce aux panneaux solaires. L'électricité produite permet à son tour, de générer de l'hydrogène par électrolyse et la pile à combustible permet une propulsion électrique plus importante et stockable.

Concernant les petites embarcations et bateaux de plaisance, ceux-ci disposent de la motorisation essence traditionnelle, ces vecteurs sont aussi disponibles en version électrique avec batteries, et même avec panneaux solaires comme l'Aequus par exemple (Bateau à énergie solaire Aequus - source : www.ubergizmo.com/). Pour obtenir davantage d'autonomie et diminuer les rejets, la motorisation à hydrogène est aussi en développement. Le Yatch Aqua est un exemple en la matière, il permet un stockage à l'état liquide de l'hydrogène et d'une contenance de 28 tonnes, celui-ci dispose d'une autonomie de près de 7 000 kilomètres (équipements du yatch Aqua, à hydrogène - source : <https://fuelcellsworks.com/>).

Terrestre

La propulsion terrestre est majoritairement utilisée dans le monde. En France, cette part atteint 70 % par rapport à l'ensemble des moyens de transports existants. Il existe une multitude de moyens de se déplacer utilisant une motorisation ou une propulsion sans moteur, tels que les vélos, les trottinettes, les rollers, etc. Ces moyens très légers se sont électrifiés avec les avancées technologiques par souci de confort et de vitesse. Nous trouvons donc des vélos électriques, des trottinettes électriques, des gyroroues... cela permet un déplacement plus rapide et plus simple en termes d'effort physique. Nous avons ensuite les véhicules légers, regroupant les véhicules inférieurs à 3,5 tonnes à vide. La plupart sont des voitures, et permettent le transport de personnes. D'autres sont des utilitaires utiles pour les professionnels. Les poids lourds sont avant tout une catégorie dédiée au transport.

Transport de marchandises

Le transport de fret par voie terrestre est essentiellement réalisé par des véhicules de la catégorie poids lourd. Ces camions sont essentiellement des véhicules roulant au diesel. Le diesel a été la réponse la plus simple pour concurrencer l'essence sur ce secteur en raison de choix économiques et écologiques.

D'autres technologies peuvent être utilisées en lieu et place du diesel :

- ▶ le GNV sous sa forme comprimée semble approprié, il dispose des caractéristiques de performance similaires et ses paramètres environnementaux sont bien meilleurs. Les stations GNV peuvent être ravitaillées par le réseau de gaz domestique et le transport du carburant est peu coûteux,
- ▶ le gaz à l'état liquide permet une meilleure autonomie que le GNV (jusqu'à 1 200 km contre 800 km pour le gaz comprimé). Même si les performances sont réelles, la difficulté pour le gaz liquide demeure son acheminement vers les stations. En effet, cet acheminement réalisé par camions citernes provoque un surcoût d'exploitation,
- ▶ d'autres solutions restent sans aucun doute à explorer, notamment avec la version électrique.

Pour l'hydrogène deux difficultés majeures : le stockage très complexe et le réseau des stations services extrêmement peu développé.

Les camions comme les 19 tonnes sont souvent utilisés en ville et leur carburation au diesel est un vrai problème. La filière GNV met en œuvre des déploiements de stations au gaz afin de développer la technologie pour les transports urbains, plus adaptée en termes de pollution. Ce mode de propulsion est aussi moins bruyant et la conduite est plus souple.

Le basculement vers un telle technologie apparaît extrêmement bénéfique pour le secteur des transports urbains. L'utilisation de mode de propulsion électrique pour les véhicules plus légers et exclusivement utilisés en ville serait une option. La présence de nombreux points de charge, la diminution des nuisances sonores et environnementales seraient également un plus pour une utilisation urbaine.

L'hydrogène pourrait également à terme remplir cette fonction et servir à une utilisation urbaine et extra-urbaine.

Transports de personnes

Les vecteurs de propulsion de véhicules pour le transport de personnes sont multiples, en débutant par la voiture personnelle, en passant par le bus et le tramway. Il existe de nombreux moyens de se déplacer et de transporter. La voiture personnelle présente l'avantage d'être totalement autonome en termes de déplacement, dépourvue de dépendance horaire ou de capacité, notamment si des objets encombrants sont à transporter. Le véhicule individuel représente près de 80 % du parc du transport intérieur de voyageurs. Un chiffre qui reste cependant stable depuis le début des années 2000, il repart à la hausse en 2014 et voit sa croissance à +2,3 % en 2016 et les véhicules diesel représentent 62 % des voitures particulières. La part du diesel est visiblement encore importante de nos jours, pourtant avec les réglementations actuelles et à venir qui sont de plus en plus restrictives, il faut s'attendre à une diminution de cette part.

L'essence représente la majorité de la part restante. Ce type de motorisation émet moins de polluant mais génère plus de GES. Pour tenter de diminuer ces problèmes, la motorisation hybride apporte une solution en permettant de réduire les émissions de polluants et la consommation. La motorisation électrique est pour sa part de plus en plus utilisée, les offres continuent de se diversifier. Même si le prix moyen d'un véhicule électrique est supérieur à celui d'un véhicule thermique, les aides publiques permettent de revoir à la baisse le prix de ces véhicules. Pour la technologie hydrogène, nous ne sommes qu'aux prémices et des stations services commencent seulement à être déployées. La difficulté majeure réside cependant en l'accès à de tels véhicules. En effet, le prix moyen d'un véhicule hydrogène revient au prix d'un véhicule haut de gamme, ce qui signifie inévitablement que les ventes ne risquent pas d'exploser. Le souci économique est le problème principal. Pourtant, la technologie présente de très nombreuses qualités, l'une des plus marquantes est qu'elle ne rejette que de l'eau... L'autonomie d'un tel véhicule est bien supérieure à un modèle électrique.

En ce qui concerne le transport collectif, les bus et autocars représentent environ 8 %⁸³ de l'ensemble du transport intérieur de voyageurs. Cette part est visiblement faible mais continue de progresser, et a presque doublé au cours de la période 2000 et 2016. La motorisation utilisée majoritairement par ces véhicules est du thermique diesel. Il existe cependant des alternatives plutôt orientées vers le gaz naturel, l'hydrogène reste confidentiel. Toutefois des communes comme Cherbourg s'engage dans cette direction.

Le transport collectif électrique est lui aussi disponible mais certaines limites apparaissent : en zone urbaine, les limites seraient l'autonomie et le temps de charge souvent long par rapport au temps d'utilisation. En zone extra-urbaine les limites seraient les mêmes. Pour pallier à cela, les compagnies de transports s'orienteraient vers le GNV permettant une meilleure autonomie. De plus, si les flottes de transports collectifs étaient toutes à l'électrique, la demande en énergie serait trop importante, surtout en période de trafic important.

Pour les vélos, il existe des systèmes d'assistance électrique, dotés d'une batterie et d'un petit moteur électrique permettant de réduire l'effort lors de l'utilisation et d'avoir une autonomie plus importante. Cela permet aussi, dans les environnements pentus, d'utiliser ce système pour faciliter la montée des routes. Ces systèmes ont permis de faire revenir au vélo un large public pour qui l'effort physique à fournir était devenu un handicap. Le moteur électrique peut fonctionner avec batterie ou encore avec une pile à combustible donc à hydrogène : Pragma Industries, société française novatrice sur ce secteur, produit ces vélos par exemple.

Aériens

Le transport par les airs a permis de se déplacer, à la fois à grande distance, mais aussi à grande vitesse, là où la voie maritime ne peut aller à une vitesse au-dessus de 100 km/h, là où la route ne peut aller à travers n'importe quel continent. L'aviation et les autres moyens de déplacement dans l'air sont utiles lorsque la solution terrestre ou maritime possède des lacunes en termes de temps et de distance.

Transport de marchandises

La voie aérienne permet de transporter des marchandises plus rapidement et sur de très longues distances en un temps très réduit. Le kérosène est la source principale de carburant. Les chiffres pour les utilisations de vols intérieurs pour le transport de marchandises représente seulement 7 % du trafic. Actuellement, des recherches pour réduire les émissions de GES et de polluants sont à l'étude, l'objectif étant d'atteindre une réduction de moitié en termes d'émissions toutes particules confondues, par rapport à 2005. Des projets sur l'aviation existent telle une filière du kérosène vert voulue et planifiée par l'État français, mais ils ne sont pas à vocation unique du transport de marchandises.

83- Voir la partie 2 « Transport intérieur de voyageurs » des chiffres clés du transport de mars 2018 issu de www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr

Transports de personnes

Le transport aérien de personnes représente 1,5 % des transports de voyageurs à l'intérieur du pays. Ce chiffre reste stable depuis des années, en ayant connu une forte croissance entre les années 90 et 2000 et un repli de la part de l'aérien entre 2000 et 2010 à cause de la concurrence des trains à grande vitesse. L'introduction de vols intérieurs à bas prix a redynamisé la filière. Au niveau mondial, le transport aérien poursuit une croissance importante avec une augmentation de 80 % par rapport au début des années 2010. Cette augmentation a bien évidemment un impact majeur sur l'environnement, c'est pourquoi des objectifs en termes d'émissions de polluants ont été établis. Dès cette année 2020, avec l'objectif d'atteindre une croissance neutre en carbone et la réduction de moitié des émissions de CO₂ pour 2050, par rapport à 2005.

Des actions recherche et développement sont alors initiées un peu partout : des recherches sont effectuées sur de petits avions pouvant transporter moins de 20 personnes par exemple, ou encore sur des monoplaces tel Airbus et son avion électrique. La solution ne résiderait pas dans un système électrique unique économiquement viable pour le transport de personnes sur de longues distances.

L'hydrogène serait une solution intéressante. Des projets de recherche ont lieu en ce sens, tel le projet Cryoplane, lancé au début des années 2000, sur l'utilisation de l'hydrogène dans l'aviation civile et le transport de personnes sur de longues distances. Ce projet européen mobilise certains acteurs importants tels que Air Liquide ou Airbus. D'autres utilisations de l'atome léger avec des avions plus petits, mais proposant déjà des caractéristiques viables sont en cours d'expérimentation. De nombreux projets sur l'aviation à hydrogène sont à l'étude, comprenant par exemple le projet HY4, réalisé par le centre de recherche aérospatiale allemand. Le projet porte sur un avion de tourisme, disposant de 4 places et avec, comme motorisation, la pile à combustible. Cela permettrait de relier des villes assez proches disposant d'aérodromes urbains. Son autonomie serait de 750 à 1 500 kilomètres et sa vitesse de croisière serait de 145 km/h. Cet avion n'évolue pas en haute altitude.

D'autres moyens de déplacement dans les airs, comme le dirigeable se voit être totalement revisité. Au lieu d'utiliser les gaz qui, au fil du temps, s'échappent, ou l'utilisation de turbines pour chauffer l'air du ballon, il existe par exemple des ballons remplis de vide, grâce à une pompe à vide alimentée en électricité par l'énergie solaire, ainsi que l'utilisation de matériaux imperméables pour éviter des fuites de « vide ». Cette invention se base sur le principe de la bulle d'eau qui remonte à la surface d'un liquide, car plus léger. Grâce à cette légèreté, le ballon peut s'élever en altitude et monter. Les applications sont potentiellement très nombreuses !

Aéromobiles

D'autres vecteurs font leur apparition, utilisant différentes technologies de propulsion pour se déplacer sur plusieurs supports de mobilité. Les aéromobiles font partie de ce monde divisé entre l'utilisation de la voie terrestre, comme un véhicule conventionnel, et l'utilisation de l'aérien. L'objectif principal est la possibilité d'utiliser le meilleur des deux voies selon la configuration de chacun : si un trafic important est détecté sur la voie terrestre, alors le véhicule peut détecter l'endroit le plus proche pour permettre un décollage et éviter ces bouchons. Si les conditions météorologiques sont cependant défavorables pour l'utilisation de la voie aérienne, alors le véhicule évoluera sur la route. Cela permet une flexibilité au niveau de la mobilité, proposant les qualités des deux voies possibles. Cependant, ces types de projets sont essentiellement voués au déplacement privé et non à la marchandise, du moins de quantité supérieure au poids moyen d'un être humain.

La société Aéromobile a présenté, dès les années 1990, le concept de voiture volante, sous le nom de code Aéromobile 1.0, mais ce n'est qu'en 2013 que la société dévoile un prototype réel et depuis 2014, avec l'Aéromobile 3.0 que des tests ont débuté. Depuis 2017, l'Aéromobile 4.0 est un projet plus avancé pour permettre la commercialisation en 2020.

Cette voiture volante, dans sa version 3.0, dispose de caractéristiques proches d'un véhicule traditionnel : un moteur thermique d'origine Subaru, ou d'un moteur électrique. La capacité est de deux passagers, la vitesse

maximale est de 200 km/h dans les airs et 160 km/h sur terre ferme. Contre toutes attentes, l'autonomie est plus que raisonnable, en effet le véhicule aurait une autonomie de 700 km en mode aérien, et près de 900 km en mode route. Son faible poids pourrait expliquer cette capacité surprenante : 600 kg.

Concernant la dernière version, 4.0, les caractéristiques techniques sont encore améliorées : une vitesse maximale augmentée pour arriver à 360 km/h en mode aérien et les ailes repensées pour permettre un déploiement en 3 minutes seulement. En raison des prouesses techniques présentées par le constructeur, le prix est évidemment élevé. Il faut compter pas moins de 1,3 millions d'euros pour obtenir un tel véhicule. Mais un obstacle à la commercialisation reste à souligner : en effet, les contraintes réglementaires sont lourdes : obligation pour le conducteur d'avoir un permis de pilote et le survol des villes est interdit. De plus, le véhicule nécessite une piste pour pouvoir décoller.

L'analyse du cycle de vie pour la propulsion propre

Tout d'abord il faut définir ce qu'est cette analyse : il s'agit avant tout d'un outil indispensable d'aide à la décision pour un développement durable d'un système. L'intérêt principal de ce type d'outil est de permettre de mesurer les impacts et d'en réduire les effets. Ce type d'outil permet aussi d'éviter le transfert d'impacts vers une autre étape du cycle de vie.

L'analyse du cycle de vie ou ACV permet d'évaluer les impacts potentiels sur l'environnement, qu'il s'agisse d'un produit ou d'un service. Cela porte sur l'ensemble de son cycle de vie pris en compte dès l'extraction des matières premières, jusqu'à l'élimination des déchets (conception, fabrication, utilisation, recyclage). Cet outil permet aussi d'évaluer les impacts environnementaux.

Cela permet in fine, de détecter les risques et problèmes environnementaux, d'identifier les étapes du cycle de vie (ACV) dont les impacts sont les plus conséquents, de développer des produits durables, d'être une aide à la décision et une aide à la conception législative.

Pour cette étude, différents cycles de vie sont étudiés. Tel l'ACV des véhicules thermique et véhicules électriques, cette analyse tentera une approche sur un poids lourd, un bus ou une voiture et aussi différents cas d'utilisation par exemple en ville ou sur voie rapide. Ces documents permettront d'établir un avis pour chaque technologie étudiée, de regrouper les résultats pertinents et d'en tirer quelques conclusions.

Nous allons donc nous pencher plus particulièrement sur chaque étape du cycle de vie d'un système, portant sur l'extraction des matières premières, la fabrication du produit, le transport, son utilisation, sa fin de vie et son recyclage.

Lors de cette analyse, l'impact sur l'environnement est étudié sur plusieurs indicateurs ⁸⁴ :

- ▶ le potentiel d'épuisement des ressources renouvelables qui consiste à mesurer la consommation de ressources naturelles non renouvelables comme le zinc, le gaz naturel, le charbon, le pétrole,
- ▶ le potentiel d'acidification causée par le dioxyde de soufre (SO₂), le monoxyde d'azote et le dioxyde d'azote (Nox), l'ammoniac (NH₃) lors de la combustion de fossiles pour la production d'électricité ou de chauffage,
- ▶ le potentiel d'écotoxicité qui mesure l'émission des substances toxiques pour les êtres vivants et l'environnement, qui déstabilisent et menacent la variété de l'écosystème,
- ▶ le potentiel d'eutrophisation due à un apport excessif en nutriments et matières organiques à partir de l'activité humaine. Cet apport provoque une prolifération de plantes aquatiques et conduit à une accélération du taux de dégradation de matières organiques, menant à l'appauvrissement de l'oxygène dans l'eau. Ce potentiel est mesuré en équivalent phosphate,
- ▶ la pollution photochimique de l'air mesurant la quantité de différents gaz qui induit la production d'ozone

84- Indicateurs définis à partir de www.controverses.sciences-po.fr : « Glossaire des Analyses de Cycles de Vie (ACV) »

- au contact des rayonnements du soleil,
- ▶ la consommation d'eau rassemble les quantités d'eau consommées pouvant provoquer le manque d'approvisionnement en eau. Mesuré en m³,
 - ▶ le potentiel de toxicité humaine reflète les dommages potentiels pour la santé, des produits chimiques émis dans l'atmosphère et l'environnement,
 - ▶ l'écotoxicité aquatique similaire en potentiel de toxicité humaine, avec la prise en compte des organismes en milieux aquatiques,
 - ▶ le potentiel de réchauffement climatique mesure la contribution des substances émises dans l'atmosphère au réchauffement climatique, dû aux gaz à effet de serre,
 - ▶ le potentiel d'épuisement de l'ozone mesure le potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone dans la stratosphère,
 - ▶ le potentiel d'oxydation photochimique mesure la présence d'ozone au niveau du sol, toxique à forte concentration pour l'humain. Indice dépendant de la quantité de monoxyde de carbone (CO), de dioxyde de soufre (SO₂), monoxyde et dioxyde d'azote et d'ammoniac émis.

Phase de production

Cette étape, dans la conception d'un véhicule, est un indicateur pouvant être contrôlé selon les procédés internes à l'entreprise qui fabrique les véhicules, contrairement à la phase d'usage où l'impact environnemental est en partie marqué par les modes de conduite des usagers. La phase de production est donc un point clé sur l'analyse du cycle de vie d'un véhicule.

Durant cette phase, l'impact peut être plus ou moins important selon plusieurs paramètres :

- ▶ la source d'énergie utilisée pendant le processus de fabrication (énergie électrique issue de centrales à charbon, centrales nucléaires, sources renouvelables...),
- ▶ les matériaux utilisés dans le processus d'assemblage du véhicule,
- ▶ l'utilisation de technologies plus ou moins énergivores (batteries au lithium, différents capteurs, options dans un véhicule),
- ▶ l'utilisation de terres rares dans le véhicule,
- ▶ les processus de captage du CO₂ dans la chaîne de production,
- ▶ les sources géographiques d'approvisionnement en termes de matières premières, équipements, technologies.

Selon un rapport établi par l'Ademe, en 2013, qui tente la comparaison entre les filières de véhicules électriques et véhicules thermiques, il serait démontré que lors de la phase de production, un véhicule électrique consommerait l'équivalent de près de 140 GJ (Gigajoules) d'énergie primaire alors qu'un véhicule diesel ou essence consommeraient environ 75 GJ d'énergie primaire. Un véhicule électrique aurait donc une consommation en énergie primaire plus importante. Cet indicateur est réalisé avec des véhicules construits en 2012. Il apparaîtrait que lors de sa phase de production, un véhicule électrique soit deux fois plus énergivore qu'un véhicule thermique ([Indicateur de consommation d'énergie primaire totale sur le cycle de vie de véhicules thermiques et électriques - Étude n° 90 511 de l'Ademe](#)).

Sur le paramètre environnemental du potentiel de changement climatique, l'élément principal contribuant à l'émission de CO₂ pour un véhicule électrique serait la fabrication de la batterie (35 %) et la fabrication des composants annexes (34 %), alors que pour le véhicule thermique cela est essentiellement dû aux émissions lors de la phase d'usage (plus de 70 %). À noter que la phase de fabrication de la batterie comprendrait l'extraction des différents métaux et terres rares, en plus de l'assemblage (25 à 50 % des impacts de la phase de fabrication sont dus à la fabrication de la batterie) [[Contributions au potentiel de changement climatique du véhicule électrique et du véhicule thermique en 2012. \(Étude n° 90 511 de l'Ademe\)](#)].

Ces résultats tendraient à montrer que la différence actuellement se jouerait sur la phase d'utilisation entre un véhicule thermique et un véhicule électrique. En effet, les émissions des véhicules étant différentes, le potentiel de changement climatique est différent sur ce segment de l'analyse. Notamment en raison de la production

d'électricité française où près de 70 % de cette production provient de centrales nucléaires, selon l'Ademe la production de CO₂ serait donc minimisée. L'étude démontre que pour un véhicule électrique produit en France et non ailleurs, son utilisation serait moins impactante pour le changement climatique et rendrait favorable son utilisation à partir de 50 000 km d'utilisation, un véhicule thermique aurait un impact moins important sur le changement climatique jusque-là.

En parallèle, si ce véhicule électrique est issu d'une chaîne de production en dehors du territoire national, en Allemagne par exemple, l'impact sur l'indicateur changement climatique serait plus important principalement à cause de la production d'électricité issue d'énergie fossile (charbon). Cela conduirait à une valorisation plutôt favorable au véhicule thermique sur une plus longue période. Il faudrait attendre à minima 100 000 km d'utilisation du VHL électrique pour que le rapport s'inverse [[Pertinence environnementale du véhicule électrique \(En France et en Allemagne\) comparés au véhicule thermique sur le paramètre de potentiel de changement climatique. \(Étude n° 90 511 de l'Ademe\)](#)].

Une autre étude dirigée par Renault sur le cycle de vie du modèle Fluence semble montrer qu'un véhicule électrique aurait un impact carbone plus ou moins favorable selon le pays où il est produit, à cause de la nature de l'énergie électrique produite. Il semblerait qu'un véhicule électrique Français serait plus vertueux en termes d'émissions de gaz à effet de serre (CO₂) que son équivalent dans une autre nation, ici le Royaume-Uni [Comparaison de l'empreinte carbone d'un véhicule électrique et thermique ([Rapport de l'ACV de RENAULT Fluence - source : <https://www.usinenouvelle.com/article/le-vehicule-electrique-est-il-ecolo.N176957>](#))].

Ces chiffres montrent que l'utilisation du VHL électrique semble préférable à partir d'un certain seuil et que ces résultats dépendraient en partie de l'énergie utilisée pour construire ce VHL électrique. Le nucléaire serait à privilégier selon les études précédemment citées. Toutefois, une étude plus poussée sur l'analyse du cycle de vie de l'extraction de l'atome jusqu'à son recyclage pourrait amener à réexaminer ces conclusions. Il en va de même pour le reste de l'analyse. En effet, concernant la technologie embarquée du véhicule électrique, d'autres critères devraient être pris en compte notamment sur le coût environnemental de l'extraction des matières premières présentes (métaux critiques et terres rares).

Ces éléments sont constitutifs des systèmes batteries et aussi du type de motorisation (synchrone, asynchrone, bobiné ou à aimants permanents), sans compter l'électronique.

Concernant le système batterie, il apparaît important de pouvoir différencier, en termes d'impact environnemental, les différentes batteries pour obtenir des résultats plus concluants.

Sur ces questions, des études menées ont été réalisées. Nous verrons ici celles réalisées par le laboratoire d'Argonne. Les études de celui-ci ont notamment porté sur 4 technologies de batteries : le nickel-hydrure métallique (NiMH), le plomb acide (PbA), le nickel-cadmium (NiCd) et le sodium soufre (Na-S). Il en résulte que le coût énergétique apparaît extrêmement différent selon la technologie utilisée. La batterie au plomb acide (PbA) nécessiterait, par exemple, 25MJ par kg pour être produite alors que plus de 95 à 200 MJ par kg serait nécessaire pour les 3 autres technologies [Comparaison de l'énergie nécessaire pour produire un kg de batterie selon la technologie (Rapport du Laboratoire National Argonne)] !

Le même travail devrait à minima être réalisé en fonction du type de motorisation. Toujours en gardant à l'idée que chaque cas doit être étudié selon la source d'énergie utilisée mais aussi des procédés de fabrication utilisés et... des matières premières nécessaires. Ces points devraient faire l'objet d'études sérieuses plus approfondies afin de permettre d'établir des conclusions dénuées de partialité.

Phase d'utilisation

L'Institut Français du Pétrole et des Énergies Nouvelles (IFPEN) présente une étude sur plusieurs technologies différentes comprenant :

- ▶ la motorisation thermique diesel,
- ▶ la motorisation thermique essence,

- ▶ la motorisation thermique gaz naturel véhicule (GNV),
- ▶ la motorisation hybride rechargeable,
- ▶ la motorisation hybride non rechargeable,
- ▶ la motorisation électrique.

En plus de catégoriser ces motorisations, les impacts sont mesurés selon plusieurs segments dont :

- ▶ les véhicules de segment C (Compactes),
- ▶ les bus,
- ▶ les véhicules utilitaires léger (VUL),
- ▶ les poids lourds livraison 12t.

Ces recherches ont mené à des résultats sur les taux d'émissions de gaz à effet de serre sur la période d'utilisation du véhicule (mesuré en g de CO₂ équivalent/personne. Km). Pour l'année 2019, en l'état des avancées technologiques du moment, la motorisation thermique essence générerait le plus de GES. En comparaison, pour une motorisation utilisant une source renouvelable (BioGNV), les taux sont bien moins élevés. Cependant, il faut garder à l'esprit que le vecteur utilisant le BioGNV n'est pas totalement vertueux celui-ci émet tout de même du CO₂.

L'idée d'un carburant alternatif aux énergies fossiles utilisant uniquement le CO₂ disponible à la surface du globe, serait plus vertueux pour l'environnement et limiterait le réchauffement climatique. En ayant ce principe à l'esprit, il pourrait être idéal alors d'utiliser uniquement des sources d'énergie ayant un cycle à échelle humaine et non pas à échelle plus importante comme le pétrole qui possède un cycle sur plusieurs millions d'années.

Les résultats dirigés par l'IFPEN présentent donc la technologie BioGNV, électrique et hybride comme de possibles solutions alternatives à l'utilisation exclusive d'une motorisation essence ou diesel. La raison à cela serait l'utilisation adaptée de chaque énergie selon les besoins en termes de mobilité : lors d'un trajet intra-urbain la solution serait l'utilisation de la propulsion électrique (hybride inclu). Le BioGNV peut aussi être envisagé sur ce créneau. Enfin, pour une utilisation essentiellement extra-urbaine, l'usage de carburants comme le BioGNV semble plus adapté [[Comparaison des émissions de GES par personne par km à l'utilisation selon différentes motorisations sur un véhicule de segment C \(Rapport de l'IFPEN\)](#)].

Pour la catégorie des transports en commun, et plus particulièrement les bus, l'étude mène à une comparaison entre le thermique diesel, GNV, BioGNV et version électrique.

L'étude démontre qu'à l'utilisation, un bus thermique diesel et GNV générerait près de 100 g de CO₂/personne/km alors que les bus électrifiés et bus BioGNV généreraient moins de 20 g de CO₂ / personne/Km.

Pour la motorisation électrique, la technologie batterie utilisée est prépondérante. Selon les différentes compositions, l'impact environnemental serait variable.

A noter que sur ces études, il n'existe pas actuellement d'ACV sur l'hydrogène, jugée trop récente pour établir une réelle analyse complète [[Tous les paramètres pris en compte lors d'une ACV \(Rapport de l'IFPEN\)](#)].

Fin de vie et / ou recyclage

Toutefois, d'après les études présentées en première et deuxième partie, le taux de recyclage des véhicules apparaît important, cela s'explique visiblement par la réglementation qui impose un certain taux de réutilisation et de recyclage d'une part importante de la masse d'un véhicule hors d'usage (VHU). Par exemple sur le plan national, le cadre réglementaire est déterminé par les articles R.543-153 et suivants du Code de l'environnement. Cela concerne les voitures particulières (VP), mais aussi les camionnettes, les cyclomoteurs à trois roues. La directive fixe notamment les performances environnementales suivantes :

- ▶ un taux minimum de réutilisation et de recyclage de 85 % en masse du VHU,
- ▶ un taux minimum de réutilisation et de valorisation de 95 % en masse du VHU.

Cependant sur l'analyse du cycle de fin de vie d'un véhicule, l'énergie dépensée peut être plus ou moins importante lors du recyclage. Les batteries des voitures électriques semblent s'inscrire dans une demande énergétique importante en raison de leur composition et de la difficulté de dissocier les différents composants qui les constituent (métaux etc).

Concernant les ressources terrestres, le tableau ci-dessous aide à comprendre que certaines matières sont plus sensibles que d'autres. Pour aller dans ce sens et à la lecture du tableau, si le marché de l'électrique devait prendre beaucoup d'ampleur, la matière prioritairement « sensible » serait le lithium, viendrait ensuite le cobalt qui est aussi classé « minerais stratégiques critiques » par l'Union Européenne. Les tensions sur le cobalt sont actuellement très vives. Puis dans une moindre mesure, le nickel. En l'état actuel des technologies, ces résultats peuvent montrer que l'adoption d'une propulsion propre majoritairement électrique pourrait aussi directement impacter l'environnement et nous rendre stratégiquement dépendants si le type de batterie ou le type de motorisation choisie n'est pas soigneusement orchestré. Une solution à envisager immédiatement serait l'organisation coordonnée du recyclage de ces matières. Une autre solution consiste à rechercher une réduction de cette consommation en cherchant d'autres matériaux de remplacement, l'innovation technologique pourrait aussi aider dans cet optique, sous réserve qu'elle soit coordonnée et organisée [[Disponibilité des ressources métalliques \(Analyse d'un véhicule électrique par Hydro-Québec\)](#)].

Ainsi, les écarts en termes d'impact sur le cycle de fin de vie d'un véhicule peuvent s'expliquer par l'absence ou la très faible concentration de terres rares dans les motorisations thermiques qui sont essentiellement constituées de fonte ou d'aluminium.

En ce qui concerne la technologie hydrogène, il semble également qu'un retard puisse être constaté en termes de développement : il n'existe pas de moyens de recyclage des piles à combustible à l'échelle industrielle pour le moment. Toutefois, 5 partenaires se sont réunis autour du projet BreCycle qui consiste à mettre en place un processus de recyclage de ces PAC. Avec 3 exigences :

- ▶ parvenir à un haut degré de récupération des matières premières des piles à combustible,
- ▶ être compatible avec les contraintes environnementales,
- ▶ être viable économiquement.

Il est à garder en mémoire que les PAC ont aussi une durée de vie limitée et que les premiers modèles devraient arriver en fin de vie d'ici 2030 (d'après h2-mobile.fr). Il apparaît donc nécessaire de commencer dès maintenant à travailler sur le recyclage de cette technologie. Les besoins en terres rares nécessaires à la construction de ces vecteurs tels le platine et le ruthénium s'inscrivent pleinement dans cette démarche et ce besoin de recyclage. Le frein principal du recyclage de ces matériaux serait la composition fluorée hautement toxique des membranes échangeuses. Il s'agit ici, sans aucun doute, d'un impact environnemental défavorable à attribuer au véhicule hydrogène.

Une étude rendue publique par le constructeur Allemand Mercedes peut apporter un éclairage chiffré sur l'impact environnemental d'un véhicule hydrogène (GLC F-CELL). Le cycle de vie complet semble être étudié afin de montrer l'empreinte carbone du véhicule. Il apparaît ici assez clairement que la source de production de l'énergie hydrogène est déterminante pour son impact environnemental. A noter que l'étude prend en compte l'extraction des matières premières, l'utilisation de terres rares dans la pile à combustible dont les paramètres sont introduits dans la phase de production du véhicule. (Cf. passage recyclage pile à combustible) [Empreinte carbone d'une ACV d'un véhicule hydrogène \(Étude de Mercedes pour le modèle GLC F-Cell\)](#)

Conclusion

L'analyse du cycle de vie montre que chaque type de « propulsion propre » dispose d'avantages et d'inconvénients (empreinte carbone, impact environnemental, impact sur la santé, dépendance stratégique...). Il s'agira de maximiser les avantages et de minimiser les inconvénients.

La solution serait un vecteur utilisant une « propulsion propre » dépourvue de terres rares afin de réduire l'impact sur la disponibilité des ressources, la santé humaine, les écosystèmes et l'empreinte carbone. L'énergie utilisée devra être la plus vertueuse possible et surtout renouvelable. Ce véhicule serait donc peu gourmand en ressources lors de sa phase de fabrication, peu émetteur de polluants lors de sa phase d'utilisation et bénéficierait d'un recyclage voisin de 100 %. Ce système de propulsion devra aussi disposer d'une autonomie suffisante et d'une puissance correcte pour un voyage moyen sur les routes du pays.

Les acteurs normands et d'ailleurs

concourant au développement de la propulsion propre

Nous avons pu échanger sur le thème de la propulsion propre avec de nombreux acteurs du territoire normand et d'ailleurs, ils nous ont permis d'améliorer et d'affiner nos connaissances sur la thématique et les événements qui se déroulent sur le territoire. Ces entretiens permettent aussi de présenter aux lecteurs quelques entreprises, mais aussi des organismes qui sont présents pour participer à la transition énergétique à travers la propulsion propre.

Nous avons pu rencontrer Patrice QUESNEL, coordinateur du Programme CALYPSO afin qu'il nous présente la propulsion du bateau l'Alcyone, qui a pour particularité d'être hybride.

Ce bateau permet, grâce à la turbo voile (concept innovant des années 80), d'économiser jusqu'à 30 % de carburant en utilisant l'effet Magnus pour permettre le mouvement du bateau. Un tel choix de propulsion semble tout à fait révolutionnaire, le but est de réduire la consommation de carburant pour un bateau naviguant à travers le globe. Ce type d'hybridation devrait être davantage connu, en raison de ses performances au niveau économie de carburant, mais aussi en maniabilité et en fiabilité de ces turbo voiles. Il pourrait constituer une vitrine technologique pour faire connaître ce mode de propulsion. La technologie utilisant des turbo voiles serait parfaitement adaptée pour les trajets réguliers, dans les mers soumises à des vents forts. L'exemple parfait est la traversée de la Manche, avec un vent d'ouest qui permettrait même d'utiliser uniquement la turbo voile, et donc de n'émettre aucun polluant lors de la traversée. Les compagnies de ferries feraient des économies assez considérables sur cette ligne qui est parfaitement orientée pour maximiser le rendement de ces fameuses turbo voiles. (Les turbo voiles sont des voiles de forme tubulaire permettant l'utilisation de l'effet Magnus pour permettre une rotation des hélices).

[Bateau « L'alcyon » du commandant Cousteau - source : merite-maritime29.org](https://merite-maritime29.org)

Cependant quelques contraintes sont à constater, notamment au niveau budgétaire en raison de l'inexistence de pièces de rechange, il s'agit là d'une technologie unique. L'utilisation de deux turbo voiles sur la longueur apparaît moins efficace qu'une seule, en raison des turbulences engendrées par la première. Lorsque le bateau est amarré, il faut être prudent, car il peut se déplacer seul.

Nous avons pu rencontrer un autre acteur incontournable, la Fédération Nationale des Transports Routiers (FNTR) qui participe au développement d'une meilleure propulsion, en promouvant l'introduction de véhicules toujours plus propres, normés Euro 5 et 6, ainsi qu'une conduite plus rationnelle : l'éco conduite.

Elle cherche aussi à participer à l'optimisation des véhicules en travaillant sur les solutions pour éviter le retour à vide. Depuis peu, la fédération s'oriente vers l'impact environnemental de la filière des transports routiers avec des études sur les carburants alternatifs, le choix de pneumatiques moins polluants, plus performants, et le recyclage des huiles.

Le choix sur l'adoption d'une nouvelle technologie pour une « propulsion propre » semblerait s'orienter vers le gaz naturel comprimé (GNC), grâce à ses atouts de fiabilité et sa maturité technologique. Le gaz comprimé serait adapté pour les trajets courts, et le gaz liquéfié pour les trajets de plus de 1 000 km. Quelques freins persistent cependant tels que le manque de stations, des coûts de maintenance plus élevés et des précautions d'utilisation particulières notamment sur le ravitaillement.

Selon le responsable FTNR interrogé concernant le choix d'autres technologies, comme la pile à combustible ou

l'électrique, ces technologies ne semblent pas être des solutions pour le moment en raison des problèmes de maturité et du manque de structure pour être viable sur le secteur transport et logistique.

L'Ademe effectue aussi des études portant sur la vision de scénarios pour 2030 à 2050 des citoyens sur leur milieu environnemental, tout comme les recherches sur la mobilité numérique. Des études disponibles sur le site internet (www.ademe.fr) font l'objet d'analyse du cycle de vie de différentes technologies, avec une analyse assez structurée de la production des véhicules par exemple. Des études sur le cycle de vie des véhicules hydrogène sont à venir et devraient permettre d'obtenir des informations pertinentes pour cette technologie.

Nous avons pu nous entretenir également avec trois entreprises, chacune travaillant sur un domaine spécifique. Nous avons tout d'abord réalisé un entretien avec une entreprise de transport et logistique en pointe sur des stratégies innovantes cherchant à contrer le changement climatique. Elle a fait le choix d'un carburant plus propre pour faire fonctionner son entreprise.

Il s'agit de la société de transport Houtch. Avant-gardiste, celle-ci se tourne résolument vers l'utilisation du GNC qui apparaît être, d'après l'entreprise, prometteuse pour atteindre les objectifs nécessaires à l'engagement du changement climatique. Le GNC dispose de deux avantages, le premier, son coût d'acheminements plus faible économiquement que pour le GNL, et deuxièmement son coût environnemental plus faible. Il peut circuler par gazoduc avec un coût carbone plus bas que pour le GNL. Le GNL est seulement transportable par voie terrestre. Par ailleurs, la solution de l'électrique semble encore trop peu développée pour une utilisation par les véhicules lourds, peut-être le sera-t-elle à moyen terme. L'entreprise étudie aussi d'autres options carburants comme l'éthanol ou l'huile de colza qui favoriseraient l'économie circulaire et de proximité.

Dans un futur proche, l'entreprise projette de créer un réseau de stations GNV proposant le gaz sous forme comprimé ou liquide. Cette ambition est rendue possible grâce à la mise en place d'un groupement de transporteurs, appelé Gaz'up. L'objectif est de construire une vingtaine de stations GNV .

Puis nous avons réalisé un entretien avec une entreprise qui construit des vélos électriques fonctionnant à l'hydrogène : Pragma Industrie. Précurseur et novateur sur cette filière, Pragma Industrie a vu que la solution du vélo à hydrogène comporte de nombreux atouts, en termes d'autonomie et de temps de rechargement en comparaison de la version électrique (batteries). Cette technologie est novatrice non seulement sur le rendement et sur l'autonomie mais en plus l'auto-rechargement devrait être développé par Pragma Industrie.

Actuellement, l'offre reste centrée sur les collectivités qui disposent du financement nécessaire. Lorsque la filière hydrogène sera plus développée, ces vélos devraient être plus abordables pour une clientèle plus large.

Enfin, nous avons pu nous entretenir avec un constructeur naval. Cette entreprise est basée en Bretagne et elle propose des bateaux hybride sur mesure. Le choix du mode de propulsion est aussi au choix avec la possibilité d'être motorisé en panneaux solaires, en moteur thermique à hydrogène par exemple. Ces bateaux sont disponibles pour les professionnels comme pour le grand public. Les résultats affichés par Luxury-sea semblent très satisfaisants : une réduction des rejets de particules fines et NOx à près de 50 %, comparé à un bateau de même gamme. Pour le moteur thermique à hydrogène, une réduction de 30 % de carburant est constatée. Grâce au carburant disponible en mer (l'eau), ce moteur présente des réductions de GES de près de 70 %.

Actuellement, un catamaran appelé LS-Adventur est en construction, il s'agit d'un projet de bateau transatlantique disposant du meilleur de la technologie du moment.

Après avoir réalisé les entretiens avec les entreprises précédemment citées, nous avons cherché à comprendre comment était perçue et abordée la notion de propulsion propre par ceux qui fournissent l'électricité : les syndicats d'énergie.

Pour ce qui est des structures départementales, les syndicats des énergies sont des acteurs majeurs dans le développement de la propulsion propre.

Le Syndicat d'énergie de l'Orne (TE61) met en place des bornes électriques dans le département et, dans un futur proche, va installer des stations GNV. Ces bornes dont l'exploitant est Izivia sont accessibles à tous. Actuellement, le TE61 oriente ses projets vers la mobilité au GNV en raison de l'atout méthanisation du département de l'Orne. A terme, l'objectif pour le TE61 serait de regrouper les technologies de l'électricité et du gaz, en proposant des bornes et des stations GNV. L'électricité aurait plutôt une vocation pour les trajets circulaires et urbains. Le gaz serait plutôt destiné pour les longs trajets et le transport lourd.

Dans le département du Calvados, le Syndicat d'énergie du Calvados (SDEC), cherche à s'orienter vers la mobilité hydrogène avec la création de deux stations hydrogène situées à Caen et Pont l'Évêque, des stations GNV ainsi que des recharges pour vélo électrique, avec notamment le projet EASHyMob, l'un des projets les plus importants en Normandie pour la filière hydrogène. Les objectifs du syndicat sont les mêmes que pour l'Orne : proposer des pôles multi énergie, afin de regrouper toutes les énergies disponibles pour la mobilité, dans des stations. Enfin, le syndicat de la Seine-Maritime (SDE76) agit aussi sur le domaine de la mobilité électrique et le GNV. Comme tous les syndicats départementaux, les projets sont destinés au public. Les projets pour le GNV sont actuellement à l'étude en complément du projet EASHyMob pour l'hydrogène.

Enfin, nous avons pu nous entretenir avec un responsable Normand de GRT GAZ. L'entreprise se positionne en tant qu'acteur majeur de la mobilité au gaz, dont l'objectif est d'arriver à 100 % de gaz renouvelable pour 2050. GRT GAZ développe donc le GNC (en version comprimée) et le GNL (en version liquéfiée), pour ces gaz la version bio et l'origine issue de nos déchets sont mises en valeur. D'un point de vue environnemental, le choix de ce type d'énergie apparaît pertinente car moins polluante et moins bruyante à l'utilisation. Les émissions de particules fines peuvent être réduites de 95 % grâce au gaz. La technologie étant mature, les véhicules équipés GNV sont proposés par de nombreux constructeurs. L'utilisation du GNC sera principalement destiné pour les trajets de courte distance (600 km), et le GNL sera plutôt destiné pour les longs trajets (1 700 km). De nombreux projets sont en préparation toutefois GRT GAZ précise bien, dans cet entretien, avoir besoin de l'aide des pouvoirs publics pour permettre un déploiement massif des infrastructures au gaz.

Les projets

en Normandie

La France s'investit actuellement dans le développement des énergies nouvelles, plus propres et dans le développement d'une mobilité s'orientant de plus en plus vers une mobilité utilisant des modes de « propulsion propre ». Il est possible de constater que la Normandie cherche à lier les deux. La région Normandie a choisi de développer de façon importante les filières associées à la mobilité durable. La région a donc décidé d'orienter ses projets vers l'hydrogène avec le projet EASHyMob, vers le GNV et vers l'électrique.

Le programme de mobilité hydrogène normand, appelé EASHyMob est un projet de développement de la filière hydrogène pour la région Normandie et l'Île-de-France. Les principaux objectifs de ce projet sont la réduction des émissions de CO₂, le développement des véhicules hydrogène et de ses infrastructures. Près d'une quinzaine de stations sont à l'étude sur le projet, 4 sont actuellement ouvertes.

En partenariat avec des acteurs de la filière hydrogène comme Symbio FCell et Serfim, la Région s'est aussi engagée dans un programme de mobilité hydrogène, soutenu et financé par l'Union Européenne à travers l'agence européenne INEA (Innovation and Network Executive Agency). L'objectif est l'installation de 15 infrastructures de recharge sur les grands axes routiers reliant les grandes agglomérations de la région.

Les stations offriront une capacité de 20 kg par jour et 50 kg par jour. Le budget est estimé à près de 4,8 millions d'euros et il permettra de faire circuler 250 véhicules hydrogène environ.

Un autre projet, portant sur la technologie GNV, est soutenu en Normandie. Les objectifs de la filière 2020 AFI (Alternative Fuels Infrastructure) pour la région prévoient le déploiement d'une dizaine de stations GNC et 2 stations GNL. Grâce aux syndicats des énergies, ces objectifs sont en bonne voie et de nombreuses villes tentent l'essai des véhicules équipés au gaz.

Avec par exemple, dans le département du Calvados, une station double carburant déployée par Naturgy, à Carpiquet. Cette station située à proximité immédiate du périphérique de Caen est particulièrement fréquentée par les transporteurs. Elle offre ainsi un point d'avitaillement très pratique pour les transporteurs ayant choisi la solution GNV. Délivrant à la fois du GNC et du GNL, cette station est ouverte à tous types de véhicules, roulant au gaz.

Les constructeurs automobiles font aussi partie des projets avec notamment l'usine de Renault Cléon, dont l'activité principale est la construction de moteurs et de boîtes de vitesse. Le moteur électrique, équipant la Renault Zoé est construit ici.

Conclusion

En conclusion, la technique de propulsion propre qui percera sera celle qui permettra de satisfaire au mieux les besoins de mobilité, permettant d'être efficace sur de courtes comme sur de longues distances.

Pour l'heure nous assistons à l'émergence et la mise en place de modes de propulsion en fonction des différentes énergies et de différents types de moteurs. Cette période ressemble fortement à la période où le moteur thermique et le moteur à vapeur ont été en concurrence et finalement l'un des deux modèles a pris le dessus. À termes, le scénario le plus probable amènera la technologie la plus efficace à percer. Par conséquent, la technologie qui émergera sera celle qui permettra d'aller au plus loin comme au plus près, qui sera la plus vertueuse pour l'environnement tout en couvrant le spectre complet de nos déplacements. Cependant, un autre scénario pourrait être retenu et pour celui-ci, contrairement au précédent, un ensemble de technologies pertinentes pourrait être adopté. Ces technologies répondraient aux besoins en termes de mobilité, de capacité de transport, d'autonomie ou d'énergie. Pour ce deuxième scénario, plusieurs technologies pourraient cohabiter afin de répondre aux besoins différents de mobilité.

Ainsi, chaque système de propulsion propre dispose d'avantages et d'inconvénients et pourra répondre à un besoin de mobilité spécifique. Il sera indispensable d'étudier les contraintes de chaque système (ACV) pour limiter les émissions de GES, de polluants atmosphériques et les nuisances sonores. Une planification sérieuse sera nécessaire pour éviter l'éparpillement des efforts de recherche et l'éparpillement des financements. Une stratégie clairement organisée au niveau national devra inévitablement être mise en place au regard des enjeux financiers, des enjeux sur l'emploi et des enjeux sur la dépendance stratégique du secteur face aux terres rares et minerais stratégiques, sous peine de faire le jeu de la concurrence.

Si et seulement si, ces remarques pouvaient être prises en compte alors cette filière pourrait être l'une des plus performantes en termes de réduction d'émissions de polluants, GES. Elle pourrait permettre de relancer l'économie et concourir à un possible ralentissement du réchauffement climatique.