



**IESF**

SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS ET  
SCIENTIFIQUES DE FRANCE

**LES  
CAHIERS**

**MARS 2018**



## **POUR UNE MOBILITE SANS CARBONE QUELLE STRATEGIE ?**

*Suite à un débat organisé à l'automne 2017 avec des experts publics et privés, les Ingénieurs et Scientifiques de France proposent les premières étapes d'une transition énergétique pour atteindre un objectif de long terme : des transports intérieurs utilisant exclusivement de l'énergie décarbonée.*

[www.iesf.fr](http://www.iesf.fr)



## AUTEURS ET CONTRIBUTEURS

**Ce livre blanc « Pour une mobilité sans carbone » a été établi par des comités sectoriels des Ingénieurs et Scientifiques de France.**

Sous la direction d'Edouard FREUND, président du comité Energie et d'Olivier PAUL-DUBOIS-TAINE, président du comité Transport, un groupe de travail a réuni durant l'année 2017 des membres et partenaires de ces deux comités : Claude ARNAUD, Bernard BASSET, Jacques BONGRAND, Michel BRUDER, Dominique CHAUVIN, Patrick COMMEREUC, Pierre-Louis DEBAR, Georges DOBIAS, Daniel FERBECK, Jean-Eudes MONCOMBLE, Jacques PETER, Alain SAUVANT, Bruno WILTZ.

**Le débat organisé à l'automne 2017 a permis de recueillir de nombreuses observations et contributions dont nous remercions les principaux auteurs :**

Dominique AUVERLOT (France stratégie)

Luc BASTARD (CCFA, Renault)

Pierre-Henri BIGEARD (IFPEN)

Philippe BOUCLY (AFHYPAC)

Gérard CHEVALIER (CYBEL - BMA)

Jean-Pierre CORNIOU (SIA Conseil, Renault)

Jean COLDEFY (ATEC)

Marc DELCOURT (Global Bioénergies)

Stéphane DUPRE LA TOUR (EDF)

Jean-Luc HANNEQUIN (CCI 35 - BMA)

Pierre PAPON (Futuribles)

Grégoire POSTEL-VINAY (DGE)

### Documents de référence

ADEME : Vision 2030 – 2050 Energies

CGEDD : Annexe thématique au rapport n°008 378 02 sur les transports - février 2017

IESF : Manifeste pour une mobilité sans carbone – septembre 2017

ASPROM : Séminaire « De la transition énergétique à la mobilité durable » – novembre 2017

Assises nationales de la mobilité : Rapport de l'atelier « Pour une mobilité plus propre » - décembre 2017



### INGENIEURS ET SCIENTIFIQUES DE FRANCE (IESF)

La France compte aujourd'hui plus d'un million d'ingénieurs et quelques deux cent mille chercheurs en sciences. Par les associations d'ingénieurs et de diplômés scientifiques qu'il fédère, IESF est l'organe représentatif, reconnu d'utilité publique depuis 1860, de ce corps professionnel qui constitue 4% de la population active de notre pays.

Parmi les missions d'Ingénieurs et Scientifiques de France figurent notamment la promotion d'études scientifiques et techniques, le souci de sa qualité et de son adéquation au marché de l'emploi ainsi que la valorisation des métiers et des activités qui en sont issus.

A travers ses comités sectoriels, IESF s'attache ainsi à défendre le progrès, à mettre en relief l'innovation et à proposer des solutions pour l'industrie et pour l'entreprise. Notre profession s'inscrit pleinement dans le paysage économique et prend toute sa part dans le redressement national.



## SOMMAIRE

<b>SYNTHESE ET ORIENTATIONS</b> .....	5
<b>INTRODUCTION</b> .....	9
<b>PERSPECTIVES TECHNOLOGIQUES</b> .....	11
I.1 La filière « carburants ex biomasse » .....	11
I.2 La filière « motorisation électrique et batteries rechargeables » .....	12
I.3 La filière hydrogène .....	14
<b>II. CONDITIONS DE LA TRANSITION</b> .....	17
II.1 Quelle production d'énergie décarbonée ? .....	17
II.2. Quelle évolution de la demande de déplacements ? .....	19
II.3 Le contexte économique et géopolitique .....	20
<b>III. OBJECTIFS ET ACTIONS A L'HORIZON 2030</b> .....	23
III.1 Engager une dynamique de croissance du parc automobile tout électrique .....	24
III.2 Expérimenter et déployer des systèmes de stockage-distribution d'énergie .....	26
III.3 Un développement ciblé des autres filières énergétiques .....	27
<b>CONCLUSION</b> .....	30
<b>ANNEXE 1</b> .....	32
<b>ANNEXE 2</b> .....	36
<b>ANNEXE 3</b> .....	37
<b>ANNEXE 4</b> .....	39



## SYNTHESE ET ORIENTATIONS

### POUR UNE MOBILITE SANS CARBONE

- *Tirer les conséquences des orientations de la COP 21*

Le développement des transports décarbonés est aujourd’hui principalement fondé sur la performance des moteurs et l’utilisation de sources d’énergie à faibles émissions de gaz à effet de serre. Conjugués avec les économies de mobilité et une meilleure utilisation des moyens de transport, ces leviers d’action permettent de profiter de la faible croissance des trafics routiers en France depuis 2004 (+0,7% par an) pour amorcer une baisse significative des émissions de GES des transports en France grâce aux réductions attendues des consommations des véhicules.

Mais ils ne répondent pas à l’objectif de long terme mis en évidence lors de la COP 21, pour se rapprocher d’un facteur de diminution des émissions de CO<sub>2</sub> des transports d’au moins 4 (si possible supérieur), en France et en Europe. Les orientations affichées dans ce sens par le Gouvernement prévoient notamment pour les transports en France la fin des ventes de voitures émettrices de CO<sub>2</sub> d’ici 2040 et la neutralité carbone en 2050. Comment progresser efficacement vers cet objectif ?

- *Changer de paradigme pour rechercher les bonnes trajectoires d’action*

Pour mettre en œuvre une ambition à la hauteur des enjeux climatiques, une vision de long terme est indispensable si l’on veut prendre des décisions de court terme qui aillent dans le sens d’un développement véritablement durable. Au lieu de débattre des solutions les plus efficaces à court-moyen terme, nous avons suivi une autre démarche :

- Se situer à un horizon de très long terme où la conjonction des progrès technologiques et des régulations économiques conduirait à des transports totalement décarbonés (au moins pour les transports intérieurs en France – voir encadré ci-dessous).
- Co-construire, avec les acteurs publics et privés concernés, les trajectoires technologiques et économiques jugées les plus pertinentes pour progresser le mieux possible vers cet objectif, en tenant comptes des incertitudes ou aléas techniques et économiques.

- *Des technologies décarbonées adaptables aux différents véhicules*

Un scénario de long terme d’organisation des transports intérieurs en France, pourrait utiliser des énergies décarbonées (biomasse) ou décarbonables à terme (électricité, hydrogène), permettant :

- pour les déplacements de proximité : des véhicules tout électriques avec batteries (véhicules légers, véhicules utilitaires légers et autobus), dont la conception ne pose plus de problèmes techniques, mais des délais d’adaptation économique (pour la production) et territoriale (pour les équipements de recharge) ;
- pour les véhicules lourds et les déplacements à longue distance : des motorisations thermiques (biogaz et carburants issus de la biomasse), et/ou électriques (batteries longue distance et recharges rapides pour les véhicules légers, autoroutes électrifiées équipées de caténaires sur les axes majeurs de transit pour les camions), en attendant les piles à combustibles et les moteurs thermiques à hydrogène, lorsque les coûts de production le permettront.



### Un manifeste publié en septembre 2017 pour une consultation d'experts

*Afin d'ouvrir un débat sur cette démarche, les Ingénieurs et Scientifiques de France ont publié, en septembre 2017, un « **Manifeste pour une mobilité sans carbone** ». Préparé par les deux comités IESF Energie et Transports, ce manifeste présente un scénario de long terme où tous les modes de transport n'utiliseraient plus que de l'énergie décarbonée. La consultation de plusieurs dizaines d'experts des différents domaines concernées a permis de mieux analyser les questions en suspens soulevées par ce scénario de long terme. Ces échanges se sont traduits par des contributions d'IESF aux Assises nationales de la mobilité, au cours de l'automne 2017.*

#### ■ **L'énergie disponible pour les véhicules de transport sera-t-elle décarbonée ?**

Dans une perspective européenne de long terme, les véhicules de transport disposeront-ils de ressources d'énergie décarbonée qui permettent à la fois :

- de satisfaire une demande d'énergie majoritairement électrique des véhicules, qui représenterait à terme environ 20% de la consommation actuelle d'électricité ;
- de n'utiliser qu'une énergie primaire sans carbone fossile (nucléaire, hydraulique, biomasse, éolien, solaire photovoltaïque), avec des capacités de stockage pour gérer les fluctuations de la demande ?

Si les politiques européennes de développement des parcs de véhicules sont harmonisées à partir d'exigences communes de décarbonation, il n'en va pas de même pour les productions d'énergie dont les mix électriques sont très hétérogènes d'un pays à l'autre !

Or, à l'exception de la biomasse dont la production de carburants pour véhicules ne peut couvrir qu'une partie minoritaire des besoins du transport, **toutes les sources d'énergie primaire sans carbone conduisent à une production d'électricité**, qui devient le vecteur stratégique des politiques énergétiques. Leur utilisation pour le transport peut d'effectuer sous forme directe (véhicules électriques), ou sous forme d'un combustible ou carburant décarboné produit à partir de cette électricité : l'hydrogène.

*La transition vers une production européenne d'énergie électrique décarbonée sera sans doute longue et difficile à atteindre, mais elle n'empêche pas le secteur des transports en Europe, en sus des carburants ex biomasse, d'engager sans attendre sa propre transition électrique, en utilisant provisoirement les mix électriques des pays membres produits en partie par de l'énergie fossile (et notamment le gaz).*

#### ■ **Les politiques de mobilité peuvent-elles diminuer les déplacements motorisés ?**

Les besoins de déplacements des personnes peuvent-ils être réduits (non pas en nombre, mais en km parcourus) sans remettre en cause la performance de notre économie et la liberté de circulation des personnes et des biens ?

Parmi les propositions issues des Assises de la mobilité, le développement de l'usage du vélo et des services de véhicules partagés (covoiturage, taxis collectifs) est de nature à diminuer le trafic automobile. Ces mesures sont les bienvenues, mais leur impact global resterait limité, car elles seront longues à mettre en œuvre, et difficiles à adapter aux territoires à faibles densité où l'usage de la voiture est aujourd'hui la seule réponse aux besoins de mobilité des populations.



C'est par l'action sur l'organisation des activités individuelles et collectives (l'habitat, le travail, la santé, le commerce, la formation...), que l'on peut espérer diminuer les déplacements longs, pénibles et coûteux sans limiter les besoins de mobilité, mais cela prendra du temps.

Il faut s'attendre à ce que le trafic automobile, même robotisé avec de futurs véhicules autonomes, ne diminue que faiblement par rapport à celui observé aujourd'hui, hors territoires denses à très fortes contraintes d'usage de l'automobile.

### ■ *Une dynamique de croissance du parc automobile électrique*

En termes de stratégie d'avenir, l'électricité devient prégnante pour les énergéticiens. De leur côté, les constructeurs automobiles mondiaux misent majoritairement sur le véhicule électrique (tout électrique ou hybride rechargeable), notamment pour le marché européen.

Le moment est donc venu d'engager à l'échelle européenne une dynamique de croissance du parc automobile tout électrique, à mesure de la baisse du prix d'acquisition des véhicules avec batteries rechargeables, de l'accroissement de leur autonomie, et de l'équipement du réseau de recharge.

Deux mesures phares permettraient à l'Europe d'afficher cet objectif : l'instauration de quotas de commercialisation de véhicules à zéro émissions (notamment en ville) qui s'imposent aux constructeurs dans le cadre des futures normes européennes d'émission ; et la normalisation européenne des prises de recharge des batteries des véhicules (lentes ou rapides), qui garantissent leur utilisation sur l'ensemble des réseaux routiers européens.

Cette transition durera plusieurs décennies, en raison de l'inertie des comportements et du renouvellement du parc (37 millions de véhicules personnels et utilitaires en France), et des problèmes de stockage-distribution d'énergie sur les axes routiers européens à fort trafic.

### ■ *Expérimenter et déployer des systèmes de stockage-distribution d'énergie*

Les fabricants de batteries sont majoritairement implantés en Asie (Chine, Japon, Corée). Avec les questions des réserves de lithium et autres ressources rares et de leur recyclage, la technologie de stockage par batterie constitue aujourd'hui un verrou difficile qu'il faudra bien lever !

La fabrication massive de véhicules électriques ne pose pas de problème technologique (sinon la reconversion des chaînes de production). Mais c'est la maîtrise du système électrique – stockage, recharge et gestion des puissances appelées - qui devient le facteur critique de l'électrification du parc automobile, du moins pour les trajets à longue distance nécessitant des recharges rapides.

La transition - nécessairement longue - du parc automobile vers un parc majoritairement électrique sera mise à profit pour assurer dans la durée : l'équipement progressif en infrastructures de recharge, notamment pour les grands itinéraires européens sur lesquels les besoins d'énergie resteront longtemps hétérogènes ; et l'émergence de nouvelles générations de batteries, rendues nécessaires pour les trajets automobiles de longue distance.

L'accélération du programme européen de recherche-développement relatif aux batteries et aux autres systèmes de distribution-stockage de l'électricité apparaît indispensable pour assurer la fiabilité d'approvisionnement énergétique des véhicules en fin de transition du parc électrique.



### ■ *Une gestion programmée des autres filières énergétiques*

Parallèlement à la transition du parc de véhicules vers l'électrique, les autres filières énergétiques devront faire l'objet d'une gestion prévisionnelle de long terme, avec :

- La décroissance programmée de la filière thermique actuelle (essence et diesel), qui implique une reconversion des installations de production et des professions de l'automobile.
- Un programme de développement des carburants ex biomasse, ciblé sur des usages spécifiques tels que les camions et autocars longue distance, et probablement le transport aérien dans une étape ultérieure.
- La recherche-développement de filières hydrogène, comme moyens de stockage du surplus aléatoire de la production d'énergie électrique intermittente (éolien et solaire) ; et comme carburants de motorisation (piles à combustible ou moteur thermique) des véhicules légers ou lourds (camions, péniches, locomotives).





## INTRODUCTION

### LA TRANSITION ENERGETIQUE DU SECTEUR DES TRANSPORTS : DE LA COP 21 AUX ASSISES NATIONALES DE LA MOBILITE

#### ▪ *Mobilité décarbonée : comment appréhender la question ?*

Après la loi du 13 août 2015 sur la transition énergétique et les résolutions de la COP 21, la communauté des Ingénieurs de Scientifiques de France s'est sentie interpellée par la situation du secteur des transports en France comme l'un des plus importants émetteurs de gaz à effet de serre : dispose-t-on de solutions techniques et économiques pour diviser ces émissions par quatre au minimum et si possible beaucoup plus ?

Il a fallu sérier les questions : faut-il agir sur la production d'énergie décarbonée, sur la motorisation des véhicules de transport, ou sur les déplacements des personnes et des biens qui sont à l'origine de la circulation des véhicules ? Certainement les trois, mais les approches d'un système global nous sont apparues trop complexes pour déboucher sur une compréhension des possibilités de réponses techniques et économiques utile aux décideurs.

Nous avons alors ciblé nos travaux exclusivement sur les véhicules de transport et leur motorisation, en considérant qu'ils devraient, dès que possible, utiliser des filières énergétiques décarbonées ou susceptibles de le devenir à terme (comme la production d'électricité, d'hydrogène, de biogaz ou de carburants ex biomasse). Nous avons parallèlement considéré, face aux perspectives de changements des modes de production et de modes de vie, que les besoins de déplacements motorisés resteraient très importants, qu'il faudrait des véhicules à énergie décarbonée pour les satisfaire, et que leurs conditions d'usage, même avec l'arrivée des véhicules connectés et de la conduite automatisée, n'entraîneraient pas de bouleversements majeurs dans leur consommation d'énergie.

#### ▪ *Partir d'une vision technologique de long terme*

Ces conditions aux limites étant préalablement fixées, le cheminement de notre investigation s'est trouvé substantiellement clarifié et nous avons centré nos travaux : sur la description et la comparaison des filières énergétiques envisageables (production et distribution) ; sur leurs conditions de pénétration dans le parc de véhicules de transport (catégories de véhicules et d'usages, modèles économiques, durée de transition) ; et sur les quantités d'émissions de GES qu'elles permettraient d'éviter par rapport à une situation de référence.

Le croisement des filière énergétique avec les catégories de véhicules et d'usage ayant révélé un nombre limité de combinaisons possibles (*Voir Annexe 1 : tableau croisé : demandes de transport x filières énergétiques*), nous avons pu successivement :

- Déterminer les filière technologiques « énergie – motorisation » les mieux adaptées à chaque catégorie de véhicules et d'usage, dans une vision de long terme ;
- Analyser, avec le concours d'expertises extérieures, les opportunités ou les obstacles au développement commercial de ces filières ;
- Identifier des trajectoires de développement de chacune des filières accompagnant la transition des différents parcs de véhicules.



- **Un champ d'exploration encadré par trois hypothèses**

La demande de transport intérieur et ses dynamiques d'évolution sont considérées comme suffisamment stables pour apprécier l'ordre de grandeur des besoins énergétiques des différents modes et véhicules de transport (voir les repères présentés en Annexe 1).

L'horizon du scénario final n'est pas déterminé au départ, mais résultera des trajectoires considérées comme réalistes compte tenu notamment : des performances de nouvelles filières énergétiques (biodiésels, hydrogène...) ; de l'adaptation de l'appareil de production (industrie automobile,...) ; de l'organisation des systèmes de stockage/distribution d'énergie aux véhicules de transport (recharges électriques, hydrogène...) ; du rythme de renouvellement des parcs de véhicules (actuellement de l'ordre de 6% par an en France pour les véhicules légers).

On se place dans une perspective européenne de long terme où la production d'énergie électrique devrait utiliser principalement des énergies primaires sans carbone (nucléaire, hydraulique, éolien, solaire photovoltaïque, géothermique, ainsi que certains biocarburants...) avec des systèmes de stockage (production d'hydrogène) et de distribution d'électricité permettant de gérer les aléas des productions intermittentes et les pointes de consommation.

- **Les étapes d'une construction collective**

Un groupe de travail associant des membres et partenaires des comités Énergie et Transports des Ingénieurs et Scientifiques de France a analysé, au cours du 1er semestre 2017, les filières technologiques de production-distribution d'énergie adaptables aux différentes catégories de véhicules (voitures, camions, autocars, trains, péniches...), compte tenu de leur usage. Cette première analyse, présentée en forme de scénario de très long terme, a été diffusée en septembre 2017 par un manifeste invitant la communauté des experts concernés à débattre de la pertinence et de la faisabilité de cette vision technologique.

*(Partie I : Perspectives technologiques)*

Les nombreuses observations reçues et les discussions engagées au cours de l'automne 2017 ont permis d'éclairer les opportunités et les aléas d'une transition énergétique des véhicules de transport vers une mobilité sans carbone : la production d'énergie décarbonée, l'évolution de la demande de transport, le contexte économique et géopolitique. Ces débats se sont notamment déroulés dans le cadre des Assises nationales de la mobilité, où le groupe de travail IESF a pu déposer ses contributions d'étape.

*(Partie II : Conditions de transition énergétique des véhicules)*

Il restait enfin à mettre en évidence quelques actions stratégiques susceptibles d'être engagées au cours des prochaines années, qui permettent à la fois : d'initier à court terme la transition énergétique du parc de véhicules qui sera forcément longue ; de développer des systèmes innovants de stockage-distribution de l'énergie, clés du fonctionnement du système ; et d'expérimenter les filières énergétiques qui s'avéreront nécessaires à plus long terme.

*(Partie III : Objectifs et actions à l'horizon 2030)*



## PERSPECTIVES TECHNOLOGIQUES

Cette première partie décrit les filières énergétiques susceptibles, dans une perspective à long terme, d'apporter aux véhicules de transport des systèmes de motorisation décarbonée, techniquement adaptés à leurs modalités d'usage.

La démarche suivie est synthétisée dans le tableau de l'annexe 1, qui fait apparaître les croisements possibles entre les catégories de déplacements de personnes et de marchandises (trajets et modes de transport) et l'utilisation de filières énergétiques qui pourraient être totalement décarbonées.

L'analyse de chacune de ces filières et de ses potentialités d'utilisation est présentée ci-dessous.

### 1.1 La filière « carburants ex biomasse »

- *Des carburants déjà adaptés aux motorisations thermiques*

Les biocarburants ont suscité de grands espoirs, à l'exemple brésilien voire américain pour l'éthanol. Mais ce qui se passe ailleurs, bon à savoir, n'est pas souvent transposable. Ainsi, la première génération en Europe (éthanol, biodiesel) s'est révélée peu performante en matière de réduction des émissions - de 50 à 70% par rapport aux carburants fossiles sans tenir compte du changement d'affectation des sols qui dégrade fortement ces performances - et moins économique. La deuxième génération, qui part de matière première lignocellulosique, va voir le jour industriellement d'ici 2020, mais son succès n'est pas assuré.

La troisième génération (culture de microalgues) est encore dans les laboratoires de recherche, voire en développement dans certains pays, mais plutôt utilisable pour des productions limitées de chimie fine.

Le biogaz a déjà une importance dans de nombreux pays, notamment européens ; la fermentation des déchets organiques produit du méthane qui, après purification, peut être envoyé au réseau pour la production électrique ou utilisé comme carburant. Pour la France, un objectif de 10% des besoins gaz issus du biogaz est visé pour 2030 et ce pourcentage pourrait progresser au-delà. Un développement relatif fort est prévu d'ici 2023, mais il part de très bas.

- *Mais une production potentiellement insuffisante pour répondre à tous les besoins*

La substitution partielle ou totale des carburants ex-fossiles par des produits ex-biomasse (les « biocarburants »), présente de sévères limitations, du moins avec les procédés actuels de première génération. Sauf cas particuliers, ces productions se caractérisent par de faibles rendements (1 à 3 Tép/ha/an), entraînant une occupation des sols importante et la concurrence possible avec la production agroalimentaire. Elles ne conduisent qu'à une diminution partielle des émissions de CO<sub>2</sub> lorsque l'on prend en compte le carbone dans le cycle de vie des produits utilisés.

Les procédés de seconde génération, en cours d'industrialisation, font face à des difficultés similaires. La troisième génération, au stade actuel du développement, se heurte à des problèmes de coûts (conduisant à des installations dont le gigantisme pose problème).

Le biogaz (issu notamment de la méthanisation de déchets) ne présente pas ces inconvénients, et sa production va se développer, sans porter atteinte à la production alimentaire.



- ***Une production à cibler sur des usages spécifiques : poids lourds, transport aérien...***

Compte tenu des exigences alimentaires et environnementales, le volume de production ne pourra raisonnablement satisfaire qu'une faible partie de la demande de carburant du secteur des transports disponible. A titre d'illustration, la valorisation des résidus agricoles en France apporterait un potentiel total énergétique annuel de l'ordre de 20 Mtep en France<sup>1</sup> qu'il faut comparer à la consommation de carburants pour le transport de l'ordre de 50 Mtep.

Ces carburants « sans carbone fossile » (mais non exempts de pollutions locales) pourraient être utilement réservés à certains types de véhicules ou d'usages interurbains, et affectés, par exemple, au transport routier de marchandises et aux autocars à longue distance, ce qui permettrait de diminuer plus rapidement leurs émissions de gaz à effet de serre.

Parmi les filières envisageables pour les poids lourds, le biogaz liquéfié issu de la méthanisation des déchets, apparaît le mieux « décarboné » et bien adapté à des consommations de l'ordre de 30/40 litres/100km : cette filière, déjà développée dans des pays disposant de gaz naturel de ville (GNV), pourrait passer progressivement (par mélange) du gaz naturel au biogaz avec la filière « power to gas ».

A plus long terme, ces filières devraient être réservées au transport aérien pour lequel les technologies de substitution aux motorisations actuelles ne sont pas disponibles.

## **1.2 La filière « motorisation électrique et batteries rechargeables »**

- ***Les motorisations électriques apportent des gains substantiels avec un mix électrique améliorable***

Les filières de production d'électricité se renouvellent avec des énergies primaires non fossiles, qui malgré leur caractère intermittent (éolien et solaire) ou à risque élevé (comme le nucléaire), peuvent apporter dès aujourd'hui (comme en France) ou à moyen terme (comme en Allemagne) un mix électrique très décarboné, à condition de mettre en place des dispositifs de stockage-régulation pour gérer les fluctuations de la production.

Les (relativement) nouvelles batteries lithium ont effectivement permis de sortir la mobilité électrique des niches étroites où elle était confinée avec les batteries traditionnelles au plomb.

Pour la plupart des constructeurs mondiaux, l'électricité, comme énergie de traction pour les véhicules légers, semble inéluctable à l'avenir, soit directement (Renault,..), soit plus progressivement avec les hybrides (Toyota,...).

Ce qui pose la question des ressources en métaux rares (lithium, cobalt), liées à la technologie actuelle.

- ***Le coût des batteries devrait s'abaisser et satisfaire rapidement la demande de « voitures urbaines »***

Le coût aujourd'hui élevé des batteries (200-300 euros/kWh) pourra s'abaisser vers une limite qui descendra difficilement en dessous de 100 euros/kWh (soit 5 000 euros pour une batterie « nue » de 50 kWh), avec peut-être à plus long terme une remontée liée à la pénurie de certains métaux.

---

<sup>1</sup>Organisation des filières biomasse pour l'énergie - Etude ANCRE avec CEA, IFPEN, INRA et IRSTEA – mars 2015



Partant de 30-40 Wh/kg pour le plomb, les batteries Li-ion dépassent 150 Wh/kg, et pourrait atteindre 250 Wh/kg dans un proche avenir. Ainsi, une petite voiture disposant d'une autonomie raisonnable consommerait environ 15 kWh/100 km (soit l'équivalent de 1,5 litre de gazole/100km), pour un poids de batterie de 200 à 300 kg.

Cependant, le coût d'utilisation de ces batteries sera plutôt lié à leur durée de vie et à leurs possibilités de recyclage, pour lesquelles des progrès importants seront nécessaires dans une perspective d'utilisation pour les poids-lourds et les trajets à longue distance.

- ***La question des équipements de recharge rapide se pose essentiellement pour les trajets longs***

Pour réaliser « un plein » dans les mêmes conditions qu'avec un véhicule actuel, soit 3 minutes, il faudrait, pour une batterie de 50 kWh, une puissance de 1MW. Par ailleurs, des recharges semi rapides ou très rapides ne sont pas nécessairement favorables à une bonne durée de vie des batteries et font appel à des puissances électriques élevées (par exemple une recharge de 15 minutes nécessite une puissance de 200kW). La troisième difficulté est précisément le nombre de cycles de charge/décharge réalisables avant une perte de capacité de la batterie (de plus de 20%, par exemple).

Les besoins de recharge des véhicules seront liés à leur mode d'utilisation.

Pour les véhicules effectuant des trajets quotidiens de faible amplitude (50 à 100 km dans la journée), la solution de recharge lente de nuit (au domicile où lieu de stationnement de la voiture) s'impose, sous réserve que les garages collectifs soient effectivement équipés.

Pour des tournées journalières de moyenne distance (150 à 200 km), les usagers devront disposer de bornes de recharge locales semi rapides (par exemple à proximité de leur lieu de pause).

La question est plus complexe pour les trajets à longue distance (300 à 600 km), pour lesquels un grand nombre des véhicules sur des axes à fort trafic auront besoin d'une recharge rapide pour une très grande autonomie de parcours (l'autoroute A7 dans la vallée du Rhône, par exemple).

La question de la recharge – autonomie demandée, délai de charge, puissance électrique appelée – devient alors le problème clé de l'utilisation massive des véhicules 100% électriques sur la longue distance.

- ***Le camion tout électrique est à expérimenter, dans différentes configurations de batterie + recharge***

L'option de motorisation électrique (associée à des batteries) pose des problèmes de poids supplémentaire embarqué et de conditions de recharge, compte tenu des puissances requises en régime (de l'ordre de 150 kW), ce qui conduit à des capacités de l'ordre du MWh.

Mais les progrès des batteries lithium (batteries de 300 à 1600 kWh) permettent d'envisager différentes configurations techniques pour électrifier entièrement les semi-remorques de 40/44t effectuant des trajets de longue distance sur les grands axes européens : par exemple, la combinaison d'une batterie 300 kWh et d'une recharge de haute puissance en dynamique (pantographe et caténaires) pourrait se révéler économiquement intéressante en réduisant substantiellement l'équipement d'infrastructure électrique à des sections d'autoroute de longueur limitée (30 km) sur des parties stratégiques du réseau. L'équipement du camion lui-même est limité à la seule motorisation électrique, et sa batterie de 170 km d'autonomie lui permet d'assurer ses trajets terminaux sans recharge.

*Référence : EDF « L'autoroute électrique en pointillé » Stéphane DUPRE LA TOUR – octobre 2017*



### I.3 La filière hydrogène

- *Comment développer l'hydrogène comme carburant pour les véhicules ?*

L'hydrogène produit à partir d'énergie renouvelable (par électrolyse, ou gazéification de la biomasse) est un substitut des carburants fossiles que l'on peut qualifier d'universel : excellent carburant pour les moteurs à allumage commandé (avec un potentiel d'amélioration des rendements), pour les turbines à gaz, ainsi que les moteurs d'avions. C'est également le carburant privilégié des piles à combustibles basse température (technologie PEMFC).

L'introduction de l'hydrogène comme carburant est une solution radicale pour diminuer de manière drastique les émissions de CO<sub>2</sub> liées au transport.

Du fait de la forte percée des véhicules électriques et si les conditions économiques le permettent, le vecteur énergétique hydrogène serait le carburant idéal de fabrication de l'électricité dans les piles à combustible. Il pourrait surtout constituer une solution opérationnelle de stockage de la production d'énergie électrique intermittente (éolien et photovoltaïque), en utilisant dans un premier temps la technique « power to gas ».

Si les principaux problèmes technologiques sont résolus pour la mise sur le marché de véhicules à pile à combustible fonctionnant à l'hydrogène, de nombreux obstacles demeurent : le premier est celui des risques liés au stockage de l'hydrogène (Rapport d'étude de INERIS – 15 mars 2016) ; le plus important est lié au coût total de la filière : la production de l'hydrogène (électrolyse), sa distribution (stockage), et pour l'instant au coût des piles à combustibles, (les véhicules à pile à combustible étant privilégiés en raison du meilleur rendement de la pile par rapport à celui des moteurs thermiques).

- *Des réponses bien adaptées aux véhicules lourds sur longues distances*

Pour ces véhicules industriels (le maxi-code européen, par exemple), le volume du réservoir de stockage de l'hydrogène (environ une tonne pour 40 kg d'hydrogène apportant une autonomie de 500 km) reste compatible avec l'emport du véhicule.

Par contre, la durée de vie de la pile à combustible embarquée, soumise à des appels de puissance et des transitoires fréquents, peut poser problème. La motorisation thermique hydrogène apporterait un meilleur rendement global de la chaîne énergétique, depuis la production d'hydrogène décarboné jusqu'à l'énergie de roulement du véhicule, en passant par le circuit de distribution.

### I.4 Un scénario de long terme

- *Objectif à long terme : un fonctionnement des transports avec des énergies totalement décarbonées*

Le scénario porte sur la consommation d'énergie pour les transports intérieurs en France, comptée à partir d'un mix européen de production d'électricité. Il a pour objectif de rechercher les trajectoires de transition les plus efficaces pour parvenir à terme à des transports utilisant exclusivement des énergies décarbonées, comme les biocarburants, l'électricité et l'hydrogène.



Un scénario de long terme (voir encadré page suivante) décrit les liens croisés entre :

- l'évolution des besoins de mobilité physique qui se traduisent par l'usage de véhicules de transport (kilomètres parcourus) ;
- l'adaptation – en quantité et en qualité –, des filières industrielles de production-distribution-stockage d'énergies (sans émissions de CO<sub>2</sub>) à ces véhicules de transport, compte tenu de leurs conditions d'usage.

Cette double adaptation, - sociale (de la mobilité au transport) et industrielle (du transport à la source d'énergie primaire sans émissions de CO<sub>2</sub>) -, implique à long terme la disponibilité d'une production d'électricité décarbonée en quantité suffisante (Voir chapitre II-1 ci-après). A moyen terme, elle sera le plus souvent « tirée » par les différentes demandes de mobilité résultant de l'organisation des modes de production et des modes de vie.

La transformation du système social d'organisation et de réalisation des activités individuelles et collectives, et ses conséquences sur l'architecture d'un système de mobilité physique et numérique, seront déterminantes pour le devenir de l'industrie automobile, qui devra retrouver ses fondamentaux sociaux (le transport) et environnementaux (le développement durable).

#### ▪ *Des filières énergétiques décarbonées répondant à tous les besoins de déplacements*

Dans les grandes agglomérations, les besoins de mobilité quotidienne motorisée des personnes seront circonscrits et principalement pourvus par des véhicules électriques avec des modes d'usage combinant le transport individuel plus partagé et le transport collectif plus utilisé.

Dans les territoires périurbains et ruraux, ces mêmes besoins devraient conduire à des modes de déplacement plus individualisés et plus partagés, avec une pénétration rapide des véhicules électriques, moyennant un effort ciblé sur l'équipement en infrastructures publiques de recharge.

Pour les voyages à longue distance, la performance d'un réseau de recharge rapide sur les grands axes interurbains sera déterminante pour crédibiliser le passage au tout électrique, dans l'attente d'une filière hydrogène à plus long terme.

Pour les véhicules industriels sur longue distance (autocars, maxi-codes), la question de l'énergie de traction n'est pas encore aboutie car les constructeurs divergent sur les solutions de court terme. La filière biogaz liquéfié issu de la méthanisation des déchets ou la mise au point de véhicules hybrides électriques alimentés par caténaires sur les grands itinéraires devraient apporter des réponses de moyen terme à la décarbonation du trafic européen des poids lourds, en attendant le relais à plus long terme des filières hydrogène.

Pour les services de logistique urbaine, la transition sera vers des véhicules 100% électriques desservant les agglomérations denses devrait être en grande partie incitée par des politiques locales de « stationnement avec recharges publiques ».





### Un manifeste publié en septembre 2017 pour une consultation d'experts

Afin d'ouvrir un débat sur cette démarche, les Ingénieurs et Scientifiques de France ont publié, en septembre 2017, un « **Manifeste pour une mobilité sans carbone** ».

Préparé par les deux comités IESF Energie et Transports, ce manifeste présente un scénario de long terme où tous les modes de transport n'utiliseraient plus que de l'énergie décarbonée.

La consultation de plusieurs dizaines d'experts des différents domaines concernés a permis de mieux analyser les questions en suspens soulevées par ce scénario de long terme.

Ces échanges se sont traduits par des contributions d'IESF aux Assises nationales de la mobilité, au cours de l'automne 2017.





## II. CONDITIONS DE LA TRANSITION

Dans une transition énergétique de longue durée, la question de la motorisation décarbonée des véhicules de transport s'insère dans une chaîne de valeur beaucoup plus étendue où interviennent : la production d'énergies (issue de sources primaires décarbonées), la distribution de cette énergie aux véhicules, le renouvellement ou l'adaptation de véhicules utilisant cette énergie décarbonée, et les besoins de déplacements utilisant ces véhicules.

L'analyse de ces différents éléments de la chaîne – les enjeux, les acteurs, l'environnement géopolitique – est donc déterminante pour le choix de la stratégie de développement d'une mobilité qui serait décarbonée à long terme.

### II.1 Quelle production d'énergie décarbonée ?

#### ▪ *Des énergies primaires décarbonées pour une mobilité décarbonée*

Aujourd'hui, le domaine des transports dépend majoritairement des énergies fossiles : essentiellement le pétrole, accessoirement le gaz naturel. Ces énergies conduisent à des carburants utilisés dans des moteurs thermiques (moteurs à allumage commandé, moteurs Diesel, turbines). Il faut cependant également citer comme source primaire la biomasse (via la production de biocarburants), et ne pas oublier la large utilisation de l'électricité (trains, métros, tramways, flottes particulières de véhicules électriques à batterie), dont le caractère décarboné est lié au mode production (aujourd'hui largement dépendant des énergies fossiles au niveau mondial).

Bien que des progrès notables puissent être attendus dans le domaine des moteurs thermiques, une limite asymptotique sera nécessairement atteinte dans un proche avenir. L'obtention d'une division par un facteur de l'ordre de 4 des émissions de gaz à effet de serre implique de substituer aux énergies fossiles carbonées des énergies à faibles émissions de gaz à effet de serre (essentiellement le CO<sub>2</sub>, mais pas uniquement).

La première source d'énergie, déjà largement introduite, est la biomasse, car elle conduit, via des procédés similaires à ceux utilisés pour le raffinage du pétrole, à des carburants ou des composants pour carburants utilisables dans les moteurs thermiques sans modifications majeures. Plusieurs limitations sont apparues : disponibilité limitée, concurrence avec d'autres usages prioritaires (production alimentaire), bilan en termes d'émissions de gaz à effet de serre limité (en particulier l'émission d'oxydes d'azote dans le cas de cultures).

La seconde, la production d'électricité nucléaire, repose sur une énergie fossile (l'uranium), mais avec un excellent bilan d'émission de gaz à effet de serre, avec cependant d'autres externalités et des conditions économiques de renouvellement plus difficiles en cas de développement trop important de productions intermittentes.

Les autres sont toutes des énergies renouvelables, ou considérées comme telles :

- l'hydraulique ;
- les énergies éolienne et photovoltaïque ;
- les énergies « marines » : courants marins, houle ;
- la géothermie haute température.



Ce sont les énergies éolienne et photovoltaïque qui connaissent le développement le plus important, compte tenu de leur potentiel élevé (notamment le photovoltaïque), en dépit de leur caractère intermittent qui nécessite de les associer à des moyens de régulation, de stockage, et de substitution appropriée.

A l'exception de la biomasse dont la production de carburants pour véhicules ne peut couvrir qu'une partie minoritaire des besoins d'énergie pour les transports, toutes ces sources d'énergie primaire conduisent à une production d'électricité. Leur utilisation pour le transport ne pourra se faire que sous forme directe (véhicules électriques), ou sous forme d'un carburant décarboné produit à partir de cette électricité : l'hydrogène.

### ▪ *Quels besoins globaux d'énergie électrique à long terme ?*

Les politiques énergétiques décarbonées font débat en France et en Europe : pour produire l'électricité qui sera nécessaire à nos besoins, peut-on tout miser sur les énergies renouvelables – de type éolien ou solaire – dont la disponibilité intermittente impliquerait à terme des capacités de stockage importantes pour faire face aux fluctuations de la demande ; ou bien conserver le plus longtemps possible des capacités de production d'électricité nucléaire, ce qui limiterait les aléas d'une utilisation trop importante d'énergies intermittentes<sup>2</sup> ?

Sans rentrer dans ce débat, il s'agit d'apprécier les conséquences sur les besoins de production et de distribution électrique d'une mobilité qui serait à terme quasiment décarbonée.

Si le parc automobile français utilisait aujourd'hui exclusivement de l'énergie électrique, sa consommation d'électricité représenterait environ 20% de la consommation française actuelle. Cela constituerait une économie d'énergie importante (liée aux différences de rendement entre la chaîne thermique et la chaîne électrique), mais nécessiterait – toutes choses égales par ailleurs – une production supplémentaire d'électricité non négligeable.

Cependant, on ne peut pas statuer « toutes choses égales par ailleurs » pour éclairer des choix à long terme : la transition du parc de véhicules vers les motorisations électriques sera longue, et les besoins en énergie sont susceptibles d'évoluer à la baisse, par exemple dans le secteur du transport (voir II.2 ci-dessous), ou dans d'autres secteurs (bâtiment, numérique...).

La question peut-être la plus critique serait l'appel à puissance pour des demandes de recharge massive de véhicules, concentrées à certaines périodes ou sur certains territoires (les axes autoroutiers les plus chargés). La production d'hydrogène (par électrolyse) est une solution de long terme pour stocker l'énergie, mais elle n'est pas forcément compatible avec de l'énergie électrique intermittente pour une utilisation raisonnable d'électrolyseurs de grande puissance adaptée.

Pour résumer, la transition vers une production d'énergie décarbonée sera sans doute longue et difficile à atteindre, mais elle n'empêche pas le secteur des transports d'engager sans attendre sa propre transition énergétique (nécessairement à l'échelle européenne), en utilisant provisoirement, en sus des biocarburants, un mix électrique produit en partie par de l'énergie fossile (et notamment le gaz), et en se réservant les possibilités de bifurcations à moyen terme au vu des évolutions technologiques et socio-économiques.

<sup>2</sup> L'électricité renouvelable intermittente : le contre-exemple allemand - Bernard Lerouge J&R Janvier 2018



## II.2. Quelle évolution de la demande de déplacements ?

### ■ *Des conditions de mobilité très contrastée selon les territoires*

Depuis 2002, les déplacements quotidiens (de proximité < 80km) stagnent en distances parcourues, et ils augmentent faiblement pour les trajets professionnels et touristiques à longue distance (*Voir Annexe 1 : repères sur la mobilité*). Les conditions de ces déplacements sont très contrastées :

- Dans les zones urbaines denses des grandes agglomérations, la concentration des activités et des services de la vie quotidienne facilite une part importante de déplacements à pied (30% à 35% dans les cœurs des grandes métropoles, 46% dans Paris intra-muros). Les politiques de développement des transports collectifs en site propre (métros, tramways, bus sur voies réservées...) ont entraîné un regain important de clientèle, également incité par des limitations réglementaires et tarifaires de la circulation automobile et du stationnement.
- Dans les zones rurales ou faiblement urbanisées, la vie quotidienne est intrinsèquement « captive » de l'automobile : posséder un véhicule est une nécessité, disposer de revenus suffisants pour l'utiliser pleinement permet de s'affranchir des distances et de bénéficier des avantages offerts par un cadre de vie rural. En dehors des bourgs et des petites agglomérations, l'usage de la marche à pied est anecdotique. L'usage de l'automobile individuelle est omniprésent et la part du transport collectif représente moins de 6 % des déplacements.

### ■ *Les propositions des Assises de la mobilité*

Afin d'améliorer les conditions des déplacements quotidiens, les propositions des Assises nationales de la mobilité ont principalement porté sur les objectifs suivants :

- Limiter l'impact environnemental de nos mobilités, en agissant sur le renouvellement du parc automobile, mais aussi sur le partage des véhicules, le développement de l'usage du vélo et de la marche à pied comme solutions alternatives à la voiture individuelle (*Assises de la mobilité – rapport du groupe de travail « Pour une mobilité plus propre – décembre 2017 »*) :
- Améliorer la cohérence des offres de déplacements, en organisant l'interconnexion des modes de transport, les systèmes d'information multimodales et les autres outils numériques intégrés (pass mobilité multiservices)
- Développer des services de mobilité partagés (autopartage, covoiturage), pour répondre aux insuffisances de l'offre existante, rechercher une meilleure utilisation des véhicules disponibles et faciliter dans certains cas la démotorisation des ménages.
- Faciliter l'accès à la mobilité pour les personnes les plus fragiles – jeunes sans emploi, personnes âgées ou handicapées – par des actions de formation, la mise à disposition de véhicules, des services à domicile...
- Adapter les infrastructures existantes à de nouveaux besoins : partage de l'espace public, voies réservées, itinéraires vélos sécurisés, connexions numériques...

### ■ *L'impact de ces mesures sur le volume des trafics resterait globalement limité.*

Ces services sont-ils de nature à modifier substantiellement le volume de la circulation automobile ? Les dynamiques d'évolution de la mobilité quotidienne actuellement observées révèlent le faible impact de ces mesures à un horizon de 10 - 15 ans. (*Voir Annexe 1 : repères sur la mobilité*)

L'organisation du covoiturage à grande échelle pourra se substituer ou compléter le réseau d'autobus ou d'autocars sur des axes routiers à forte densité de trafic, où le temps d'attente pour une prise en charge resterait limité.



Le développement de « zones cyclables » autour des stations d'autocars (ou de covoiturage) apportera des facilités de rabattement et d'accès aux centres urbains de proximité, permettant ainsi de limiter les besoins d'automobile par ménage.

Il est probable que les véhicules connectés et bientôt autonomes entraîneront de nouvelles ruptures dans l'organisation des transports, mais pas nécessairement la diminution de nos besoins de déplacement.

Les gisements d'économies correspondant à ces mesures sont estimés, selon les sources, entre 15% et 30% des kilomètres-automobiles quotidiens observés aujourd'hui. En 2030 le trafic automobile restera important, dans la mesure où il ne fait que refléter les désordres actuels des organisations individuelles et collectives (l'habitat, le travail ; la santé, le commerce, la formation...), qui sont à l'origine de nos besoins de déplacement.

Pour aller au-delà, c'est en agissant sur les causes de la mobilité (l'organisation des activités économiques et sociales et du cadre de vie urbain) que l'on peut espérer diminuer les déplacements longs, pénibles et coûteux et apporter sur le long terme des économies importantes de déplacements contraints (travail, santé, commerce formation) liées à l'adaptation des activités génératrices : télétravail, services de soins de proximité, e-commerce,... Mais cela prendra du temps.

### II.3 Le contexte économique et géopolitique

#### ▪ *L'automobile au centre de multiples ruptures*

Le secteur de l'automobile subit une révolution liée à trois ruptures majeures : celle de l'énergie (via son corollaire des pollutions et des émissions de gaz à effet de serre), celle de la connectivité (qui impacte les fondements de l'organisation de la mobilité) et celle de l'automatisation (qui bouleversera les conditions d'usage des véhicules) voir *Annexe 3*. On ne peut pas répondre à la question de la mobilité décarbonée sans traiter ces trois sujets qui impactent à la fois l'énergie, l'infrastructure et l'usage des véhicules.

Les acteurs et modes de production se diversifient :

Les sources d'énergie se déplacent et se déconcentrent : les productions locales s'ajoutent aux productions centralisées.

Pour les opérateurs de transport public, l'automobile n'est plus le concurrent à éliminer, mais une composante à intégrer dans un système mobilité intelligente et efficace des modes de déplacement.

Les services connectés (et demain les services de véhicules autonomes) font appel à de nouvelles catégories d'acteurs et de modes d'intervention.

*A l'échelle mondiale, la production d'énergie pourrait rester carbonée pour un bon moment*

*(voir tableau ci-dessous, extrait de deux scénarios mondiaux de l'énergie à l'horizon 2050 – WEC-2013)*



## APPROVISIONNEMENT TOTAL EN ÉNERGIE PRIMAIRE PAR TYPE D'ÉNERGIE

(Unité : EJ/an)

Énergie primaire	2010	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050
Charbon	148	181	200	224	223	146	125	101	106
Pétrole	172	193	225	231	216	177	185	170	141
Gaz	114	151	189	216	234	141	160	170	166
Nucléaire	30	36	37	37	37	40	52	66	79
Biomasse	66	60	59	71	97	62	66	79	111
Hydroélectricité	13	14	16	19	21	16	19	24	28
Renouvelables	2	7	14	28	51	10	23	45	65
Total	545	642	740	826	879	592	630	655	696

En conséquence, la compréhension des jeux d'acteurs croisés – producteurs et distributeurs d'énergie, constructeurs automobiles et prestataires de services de mobilité – est déterminante pour la gestion d'une transition énergétique nécessairement longue et complexe.

### ▪ *L'électricité sera dominante mais la question du stockage-distribution de l'énergie reste ouverte*

Du fait de la croissance des énergies intermittentes (éolien et solaire), le problème majeur des énergéticiens est celui du stockage, problème mal résolu à court et sans doute moyen terme :

- Sur les batteries, il y a encore certains risques d'incendie ou d'explosion, (Exemple : les émanations de gaz toxique d'une batterie Engie en Belgique il y a quelques semaines, les batteries chaudes de Bolloré, les déboires de Samsung, etc.), ainsi que la question du recyclage du lithium et autres métaux rares.
- Le gaz est plutôt un bon système à la sécurité maîtrisée, mais il y a beaucoup de carbone dans le méthane CH<sub>4</sub>, dont les fuites et les pertes correspondent à des émissions équivalentes de CO<sub>2</sub> importantes ! Le gaz en revanche se stocke bien : d'où le « power to gas », prometteur à court et sans doute encore à moyen terme ; et d'où l'intérêt de l'hydrogène.
- L'hydraulique est une technologie performante et parfaitement maîtrisée mais de nouveaux sites de stockage possibles - et acceptables par les populations concernées - ne sont pas légion.
- Les autres technologies ne devraient jouer qu'un rôle secondaire ou spécialisé.

Le problème du stockage associé aux énergies renouvelables intermittentes reste donc largement à instruire. *Quelles sont les questions posées par l'arrivée massive de l'électricité comme énergie de traction ?*

Schématiquement, il n'y a plus de problème clé dans la fabrication des véhicules à moteur électrique, sinon – et ce n'est pas une question subsidiaire - la conversion progressive des usines des constructeurs et motoristes (c'est pourquoi ils demandent un peu de temps)...

Paradoxalement, le problème n'est donc plus tant celui de la construction que celui du système mobilité et celui du système électrique. Ceci impose en effet aux constructeurs de dépasser leur métier originel d'industriels et de devenir encore plus ensembliers (et même assembleurs) et acteurs complets de la mobilité ce qui est bien une révolution pour eux.



## ***Faut-il (ou peut-on ?) accélérer la transition vers l'électrique ou laisser le temps au temps ?***

Quelques éléments de réflexion recueillis lors de nos consultations

### ***La technologie du stockage d'électricité par batterie constitue un verrou difficile qu'il faudra bien lever.***

L'autonomie de voitures électriques (à batteries) augmente plus rapidement depuis 2 ans, on parle de 300 et 400km. (Attention toutefois à la différence entre le cycle NEDC et la réalité vécue : 400km cycle NEDC pour une ZOE mais au mieux 300 en conditions réelles, 150km pour un Kangoo, mais plutôt 90km en usage réel pour des livraisons urbaines, ce qui est encore insuffisant). Il faudrait rapidement augmenter la densité (puissance embarquée/poids), ce qui implique le renforcement de la recherche-développement sur les batteries et l'électrochimie en général.

La pollution des batteries et surtout de leurs contenants, métaux lourds, gaz toxique..., est une autre question urgente dont on ne parle pas assez. Le recyclage du lithium est assez compliqué. Il faut raisonner impérativement système électrique et non plus par élément séparé. Comment et quand recharger sans provoquer l'effondrement du réseau, comment optimiser les productions locale et/ou centrale, comment « éduquer » les utilisateurs ... ?

Le bilan en cycle de vie (ACV) de l'usage intensif de la voiture électrique est à cet égard « détonnant » : on « repousse la pollution chez le voisin », ce qui doit nous inciter à une grande prudence. L'extraction des métaux nécessaires aux batteries se font souvent dans des conditions sociales indignes !! Le choix des matériaux pour les batteries et de leurs conditions d'extraction devient un sujet majeur.

Aussi la question de départ devient elle : faut-il (et d'ailleurs peut-on ?) accélérer la transition vers l'électrique ou laisser le temps au temps ?

### ***Le marché automobile est mondial, mais les politiques énergétiques sont locales***

On construit 95 millions d'automobiles par an dans le monde. Les constructeurs ne peuvent pas raisonner autrement que globalement et mondialement. Le virage récent du diesel vers l'essence, et l'accélération de l'électrique posent aux constructeurs des problèmes d'approvisionnement et de logistique considérables. Exemple symptomatique : les usines européennes de moteurs essence de PSA sont saturées, ils doivent donc importer massivement en ce moment (150 000 moteurs) des moteurs essence qu'ils fabriquent en Chine pour l'Europe. C'est coûteux et pas franchement développement durable...

Le marché automobile chinois tire le marché mondial. Les chinois sont les seuls au monde à imposer à leurs constructeurs de produire 10% de voitures électriques.

On a construit environ 900 000 voitures électriques en 2017 dans le monde, soit moins de 1% de la production totale ; et les chinois en auront acheté 600 000 !!

Il y a actuellement environ 2,7 millions de voitures électriques (et hybrides) dans le monde, pour un parc total de 1700 millions (le parc mondial a atteint 1 milliard de voitures en 2007 et 1,7 milliard en 2017).

Le parc français compte 32 millions de voitures particulières, 6 millions d'utilitaires légers et 600 000 camions, bus et cars de plus de 5 tonnes. Et 200 000 voitures électriques (et hybrides) ...

Il y a malheureusement moins de pays dans le monde préoccupés par l'environnement que l'inverse. Dans nos pays européens, nous ne devons donc pas penser la mobilité décarbonée sans s'assurer que nos prises de position ne repoussent pas le problème de la pollution chez le voisin. La politique antinucléaire de l'Allemagne illustre parfaitement cela, l'Allemagne étant conduite à rouvrir des centrales électriques à charbon.

On construit des normes européennes sur les émissions automobiles mais chaque pays garde sa propre politique énergétique sans concertation au niveau de l'Union européenne... !!



### III. OBJECTIFS ET ACTIONS A L'HORIZON 2030

Décarboner la mobilité doit se comprendre dans une approche systémique : il faut planifier sur 30 ans au minimum, par pas de temps de 10 ans, pour que les industriels s'adaptent et pour que les mentalités évoluent. Dans ce temps long à gérer, la définition d'une stratégie de transition énergétique du transport peut être fondée à la fois :

- sur une vision de long terme, orientée vers la motorisation électrique qui permet seule de parvenir à une mobilité totalement décarbonée ou presque, dans la mesure où les conditions de production – distribution d'énergie électrique le rendront possible ;
- sur l'engagement d'une transition massive vers l'électrique des véhicules légers prenant en compte les aléas de production-distribution d'énergie électrique et prévoyant les adaptations possibles ou nécessaires en cours de route ;
- sur l'utilisation des toutes les opportunités de court et moyen terme (notamment l'utilisation massive des biocarburants pour les poids lourds) permettant de limiter les impacts environnementaux des véhicules de transports et de tenir les engagements européens de limitation des émissions de gas à effet de serre.

*Voir encadré ci-dessous : les conditions aux limites*

#### Repères stratégiques

##### Quelques conditions aux limites pour un scénario de long terme de mobilité décarbonée

*La disponibilité de matériaux* : s'il n'y a pas de problème pour le lithium tant qu'on est à 10% ou 15% du parc automobile mondial, la question ne peut être éludée au-delà ...

*Le point d'équilibre entre l'électrique et l'hydrogène*. Si ces deux filières apparaissent indispensables à long terme, aurons-nous les moyens de développer à moyen terme deux filières concurrentes, du moins pas au même rythme et avec les mêmes ambitions : il y a un vrai choix stratégique (européen) à assumer !

*Le renforcement des réseaux de transport d'électricité* : jusqu'où et dans quelles conditions sera-t-il nécessaire ? Et à quel horizon temporel pour mettre en place les adaptations nécessaires ? A titre d'illustration, le débit énergétique d'une grande station d'essence au sud de Lyon sur l'A7 un jour de grande circulation avoisine la puissance d'une centrale nucléaire.

*Le degré d'acceptabilité du nucléaire* : à l'échelle européenne, y a-t-il une solution de motorisation très fortement électrique - et en particulier d'électricité décarbonée -, sans une composante nucléaire significative ?

*L'évolution des problématiques de stockage* : le développement inéluctable de la production d'énergie intermittente en Europe pose des questions de stockage, qui devient le problème majeur, et aujourd'hui mal résolu, voire mal défini.

*La place croissante des technologies numériques pour limiter l'impact environnemental de la mobilité* : optimisation des consommations des véhicules ; leur taux de remplissage ; l'exploitation des réseaux de circulation ; la substitution de déplacements soit par des échanges numérisés, soit par les mutations organisationnelles des activités (travail, santé, formation, livraisons et services à domicile...).





Le rôle structurant des autorités territoriales d'aménagement urbain et de transport dans l'utilisation des espaces publics de circulation et de stationnement, du développement des services de mobilité alternatifs à la voiture personnelle, de la mobilité électrique, et plus généralement, des arbitrages entre les modes de transport de la vie quotidienne, notamment dans les grandes métropoles.

### III.1 Engager une dynamique de croissance du parc automobile tout électrique

Le véhicule électrique avec batteries rechargeables apparaît comme un élément central de la transition énergétique vers « une mobilité sans carbone », pris en compte dans les stratégies des industriels de l'automobile et ceux de l'énergie, et plébiscité par les défenseurs du développement durable. Encore faut-il lever les obstacles à sa commercialisation à grande échelle et notamment :

- Les délais d'adaptation des industriels (de l'énergie et de la production de véhicules) qui ne peuvent pas atteindre tous les objectifs à la fois ! Ils doivent tenir compte des marchés mondiaux et notamment des politiques européennes, à condition que celles-ci soient clairement affichées (vision de long terme, par étape) et cohérentes entre elles (ce qui n'est pas encore le cas aujourd'hui) ;
- Les comportements de ménages et des entreprises dont les mentalités et les pratiques de mobilité évoluent, à condition de disposer de solutions alternatives et d'incitations rendues compatibles avec leurs besoins quotidiens, et donc de politiques nationales et territoriales appropriées.

- ***La transition du parc de voitures vers la motorisation électrique sera étalée sur 25 à 30 ans***

Le renouvellement complet du parc automobile existant (37 millions de véhicules légers en France) par des véhicules dont la technologie est déjà maîtrisée (véhicules tout électriques avec batteries), mais qui exigera un temps long, de l'ordre de 25 à 30 ans, lié :

- à des investissements industriels conséquents de production de masse permettant d'abaisser les coûts de commercialisation de ces véhicules, et de les rendre compétitifs avec ceux des modèles thermiques équivalent, sans la nécessité d'aides publiques ;
- à l'attentisme des acquéreurs face à mode d'usage du véhicule dont la fiabilité (nécessité de recharge en cours de journée) reste à démontrer sur des trajets longs ou aléatoires ;
- à l'adaptation des infrastructures de distributions d'énergie (les bornes de recharge) qui crédibilisent les conditions locales d'usage de ces nouveaux véhicules ;
- à la durée normale de renouvellement des véhicules (actuellement de l'ordre de 2 millions de véhicules par an, soit un taux de renouvellement inférieur à 6 % par an).

Sur le parc actuel français de 37 millions de véhicules légers (dont 6 millions d'utilitaires), une simulation plutôt optimiste, partant de 10% de véhicules neufs commercialisés en 2025 et 90% en 2035/2040, conduirait à un parc électrique de l'ordre de 9 millions de véhicules en 2035/2040 et 18 millions en 2040 / 2045.

***Voir Annexe 4 : Renouvellement du parc par des véhicules électriques : un scénario possible***

Ce temps long de renouvellement pourra être mis à profit pour expérimenter les systèmes de gestion qui s'avéreront nécessaires en fin de période de transition (exemple : la gestion de l'alimentation électrique) et pour maîtriser d'autres technologies reconnues comme nécessaires à plus long terme (exemple : les filières hydrogène).





### Illustration : les deux marchés du véhicule électrifié

*Pour les trajets de proximité* : le marché des véhicules « tout électrique » peut se dynamiser très rapidement pour les 40 % du parc utilisés : par les ménages multi-motorisés (résidant majoritairement dans les territoires périurbains et ruraux) dont la deuxième voiture sert aux seuls trajets de proximité ; et par les professionnels (artisans, livraisons et autres travailleurs mobiles) pour leurs tournées quotidiennes (*voir Annexe 4*). Les bornes de recharge sont principalement privées (habitat, entreprises), et situées dans les centres urbains locaux (collectivités territoriales).

*Pour les trajets à longue distance*, le marché des véhicules hybrides rechargeables (PHEV ou EREV), à motorisation électrique pour les trajets de proximité, peut se développer sur les 10 ou 15 prochaines années, en attendant des solutions combinant l'électricité et l'hydrogène. Un réseau de stations-services de recharge rapide à fort débit devra être organisé sur les itinéraires de transit routier (*voir III-2 ci-après*)

- **Expliciter dans la loi la finalité, les objectifs et leviers essentiels d'action pour le renouvellement du parc des véhicules de transport**

Cette mise à jour de la loi sur la transition énergétique concernerait principalement :

- Les objectifs d'un véhicule durable, sûr, efficient et accessible à tous ;
- Les objectifs d'émissions réelles de GES et de polluants atmosphériques locaux des véhicules, en circulation et sur l'ensemble du cycle de vie des véhicules (ACV), en introduisant des quotas de véhicules à zéro émission dans les normes d'émissions des véhicules à proposer au niveau européen (futurs normes Euro 7) ;
- La gestion en décroissance du bonus d'achat des véhicules électriques à mesure de l'augmentation du parc de véhicules électriques et de la baisse relative de leur coût.

Deux actions importantes relèvent directement de l'Union européenne :

- Fixer un quota de voitures totalement décarbonées commercialisées en Europe par chaque constructeur. Mais en insistant pour une cohérence entre les normes des véhicules et la politique énergétique des différents pays européens.
- Converger rapidement sur les normes de recharge des batteries (lentes ou rapides) applicables à l'ensemble du territoire européen.

- **Accompagner la commercialisation des véhicules électriques par des services locaux adaptés aux différentes catégories d'usages**

*Dans les agglomérations denses*, faciliter le stationnement (payant de courte durée) des véhicules électriques affectés aux services de logistique urbaine (avec bornes de recharge) ; et lever des obstacles à l'installation de bornes électriques dans les espaces privés (parkings de copropriété).

*Dans les territoires à faible densité*, faciliter la transition du parc vers les véhicules électriques en développant un réseau de services locaux de mobilité (bornes de recharge, maintenance, dépannage, expérimentation préalable...) adapté aux besoins locaux des ménages et des entreprises.



Pour les trajets de longue distance, les actions d'accompagnement devraient porter sur :

- les stations-services de recharge rapides sur les grands axes routiers ;
- l'équipement d'un axe autoroutier européen pour camions électriques ;
- des stations- services de production–distribution d'hydrogène.

Les principaux acteurs « porteurs » de ces dynamiques – professions de l'automobile, distributeurs d'énergie, collectivités territoriales - devront se mobiliser pour organiser les services nécessaires au fonctionnement et à l'acceptabilité sociale de ces nouveaux véhicules dont le mode d'usage impacte sensiblement la vie quotidienne des ménages et des entreprises. Et notamment l'adaptation des dispositifs de recharge et d'alimentation électrique sur les lieux de concentrations de demandes de recharge rapide (centres d'activités, grands axes européens...).

### III.2 Expérimenter et déployer des systèmes de stockage-distribution d'énergie

#### ▪ *Elargir la problématique des systèmes de recharge électrique des véhicules*

Comme cela est apparu dans les chapitres précédents, la recharge électrique est la clé du développement massif des véhicules électriques, et, bien au-delà, de la gestion de la production-distribution d'électricité nécessaire à leur fonctionnement.

Cette question impacte à la fois :

- en aval, la nécessité de stocker (et donc recharger) dans les véhicules électriques les quantités d'énergie nécessaires à leur trajet ;
- en amont, la production et le transport de la puissance électrique appelée par les recharges.
- au centre, les systèmes de gestion intelligente (« smart grids ») pour ajuster le flux d'électricité en temps réel et permettre une gestion plus efficace des réseaux électriques, eux-mêmes associés à des dispositifs de stockage d'énergie au sol.

Les technologies sont connues mais, dans la perspective d'un développement massif des véhicules électriques, la conception et l'organisation du systèmes de distribution (liées au stockage et aux smart grids) reste à expérimenter et à déployer : il faudra trouver le bon modèle économique.

#### ▪ *Plusieurs systèmes devraient être expérimentés en parallèle*

La géographie de la production et de la consommation électrique sera déterminante pour la conception des systèmes. Dans cette perspective, il faut imaginer de multiples configurations territoriales possibles qui combineront l'installation de chargeurs dans les 3 catégories, ultra rapide + de 150kW, rapide de 30 à 50kW, standard 20kW. Par exemple :

- des demandes de recharge standard (longue durée et de faible puissance appelée), réparties principalement dans les lieux d'habitation, mais également concentrées dans des parcs de stationnement collectifs ;
- des demandes de recharge rapide de moyenne puissance, relativement concentrées dans les zones d'activité ou les centres commerciaux ;
- des demandes de recharge ultra-rapide de forte puissance, émanant de stations-services implantées sur des itinéraires routiers à fort trafic ;
- des sections d'autoroutes électrifiées, permettant aux camions de recharger leur batteries à intervalles réguliers (par exemple, 30 km électrifiés pas section de 200 km).



### ▪ *Un programme d'expérimentation – déploiement à l'échelle nationale*

Quels seraient les modèles économiques des stations de recharges rapides, adaptés aux grands axes interurbains du territoire et en périphérie des grandes agglomérations, qui devront être déployées durant la période de transition du parc automobile du thermique à l'électrique ? Faudra-t-il installer dans chaque station-service des capacités de stockage d'électricité (liées, par exemple, à des unités locales de production d'hydrogène) pour disposer de la puissance nécessaire sans déséquilibrer le réseau électrique ?

L'examen de ces questions (parmi d'autres) nécessite de croiser les compétences : des gestionnaires de réseaux routiers ; des distributeurs de carburants ; des énergéticiens pour les modalités de stockage ; des régulateurs des réseaux d'électricité ; et bien sûr, des autorités territoriales en charge des politiques de mobilité.

Ce travail collectif devra se traduire par un programme de déploiement progressif de stations de recharge couvrant l'ensemble du territoire, en expérimentant différentes modalités d'organisation et de régulation.

### ▪ *Un programme de recherche sur les batteries et autres systèmes de stockage d'énergie*

A mesure de la montée en puissance de la filière électrique, la question des matériaux des batteries et de leur recyclage devient prégnante, compte tenu de la disponibilité du lithium (dès lors que l'on dépassera environ 15% du parc électrique à l'échelle mondiale).

Il est donc urgent d'amplifier l'effort européen de recherche-développement sur la production des batteries et sur les autres systèmes de stockage de l'énergie. Ce programme doit notamment traiter :

- des substituts au lithium et autres métaux rares pour lesquels la menace d'épuisement se confirmerait ;
- de la deuxième vie de la batterie, en usage fixe et non plus embarqué, puis le recyclage complet et notamment celui des métaux tels que le lithium ;
- de la régulation de la boucle « production locale – réseau - stockage – utilisation » ;
- de l'utilisation des carburants ex biomasse comme moyen de stockage de l'énergie, complémentaire aux batteries et à l'hydrogène.

## **III.3 Un développement ciblé des autres filières énergétiques**

La transition énergétique pour atteindre l'enjeu de long terme d'une mobilité totalement décarbonée est « tirée » par de croissance du parc automobile tout électrique dont la dynamique a été présentée au chapitre III.2 ci-dessus. La gestion, en décroissance ou en développement, des autres filières énergétiques doit être parallèlement programmée, et passe par des étapes intermédiaires dont il faut s'assurer de la cohérence des objectifs, du réalisme de délais de mise en œuvre et de l'efficacité des mesures envisagées.

### ▪ *La filière historique « Carburants fossiles – moteur thermique »*

L'objectif de limitation des émissions de CO<sub>2</sub> du parc automobile thermique ne pourra être atteint sans le déploiement massif de véhicules électriques, qui ne pourra couvrir la totalité du parc de véhicules légers qu'après 2050. C'est cette « décroissance programmée » sur une durée de plus de 30 ans qu'il convient de gérer sans heurts.



Les mesures d'interdiction d'utilisation des véhicules thermiques « polluants » dans les grandes agglomérations denses auront des effets localisés sur la pollution de l'air, mais des effets globaux très limités sur les émissions de CO<sub>2</sub>.

La question principale sera celle de la reconversion des métiers et services de l'automobile (140 000 entreprises et 400 000 emplois disséminés sur le territoire français), à mesure de la transformation des modes de production et de maintenance des véhicules dont le coût va fortement baisser, avec un parc automobile français plutôt en stagnation.

*Il faudra en conséquence :*

- Ne pas « s'acharner » sur l'objectif d'une filière de véhicule thermique « 2 litres / 100 km », dès lors que des véhicules électriques peuvent être offerts sur le marché à des prix équivalents ou inférieurs ;
- Dissuader en milieu urbain dense l'usage de véhicules thermiques (avant d'interdire les plus polluants) par des hausses significatives des tarifs de stationnement public résidentiel (particulièrement bas dans la plupart des grandes villes) ;
- Maintenir provisoirement une filière de véhicules hybrides rechargeables (avec autonomie électrique croissante), en l'attente d'une filière hydrogène économiquement viable ou d'un modèle économique adapté aux recharges rapides de batteries sur les trajets longs ;
- Adapter à la transition énergétique le contenu des règles européennes d'émissions des véhicules avec des quotas de véhicules « zéro émission » (ou hybrides rechargeables « zéro émission en ville ») ;
- Préparer dès à présent les adaptations du secteur des services automobiles (maintenance et réparation), liées aux mutations du parc automobile et de son usage (vers des métiers de « services en automobilité » ?) ;
- Anticiper la décroissance de la ressource fiscale (TICPE) liée à la baisse de consommation de carburants pétroliers : quel sera l'équivalent pour les motorisations électriques ?
- Garantir sur une durée relativement longue la distribution de carburants conventionnels, notamment pour ravitailler les véhicules européens non décarbonés circulant sur nos grands itinéraires.

#### ▪ **La filière carburants ex biomasse**

Les biocarburants ont un rôle important à jouer, notamment les filières de production qui permettent de les substituer totalement aux carburants fossiles.

L'objectif principal serait alors de développer une ou des filières pérennes de biocarburants liquides à faible émissions nettes de CO<sub>2</sub>, susceptibles d'être utilisées durablement par des véhicules (camions, avions) qui ne disposeraient pas d'autres filières décarbonées offrant des performances comparables, ou pour des motorisations hybrides rechargeables.

*Il faudra en conséquence :*

- Poursuivre et amplifier un programme de recherche-développement à l'échelle européenne de filières biocarburants, dont l'utilisation sera préférentiellement ciblée sur les véhicules lourds qui ne disposent pas (à court-moyen terme) d'autres énergies décarbonées économiquement viables : camions longue distance, trains automoteurs, avions...
- Déterminer les gisements de matières organiques disponibles pour couvrir à moyen terme les besoins de production-stockage-distribution des différentes catégories de véhicules en France en vue de cibler les efforts d'équipements de distribution.

#### ▪ **La filière « Hydrogène »**



L'objectif principal de développement de cette filière serait de disposer à long terme de capacités de stockage d'hydrogène :

- Dans des installations fixes comme moyen de stockage du surplus aléatoire d'énergie électrique intermittente produite (éolien ou photovoltaïque) mais non consommée (énergie fatale) ;
- Dans des véhicules (péniches, camions, et voitures longue distance) pour alimenter des moteurs électriques (via une pile à combustible) ou pour des applications particulières des moteurs thermiques (rejetant de la vapeur d'eau non polluante).

Ce double usage permettrait d'amortir plus facilement le coût des installations de production et de stockage.

*Il faudra en conséquence :*

- Poursuivre la mise en œuvre d'un programme de recherche-développement de filières hydrogène à l'échelle européenne (production, stockage et distribution) susceptible d'assurer la fonction de stockage local d'énergie électrique « fatale » et celle d'alimentation de véhicules (routiers, ferroviaires ou fluviaux) ;
- Tester les applications de la filière en tant que système de stockage d'énergie, s'insérant dans des systèmes complexes de distribution-gestion de la ressource en électricité ;
- Etudier et tester les modèles économiques adaptés aux différentes flottes de véhicules : navires, péniches, trains automoteurs, camions et voitures sur longues distance, avions...



## CONCLUSION

### Un projet collectif à l'échelle européenne

Au fil de notre exploration et de nos échanges avec les acteurs de l'énergie, de la construction automobile et du transport, **la trajectoire de développement du parc de véhicules électriques et de l'expérimentation-déploiement des systèmes de stockage et de recharge** nous est apparue comme l'axe stratégique central d'une transition énergétique ayant pour objectif de long terme des transports décarbonés.

Dans la mesure où cette conviction finale serait partagée par les acteurs économiques et les décideurs publics, nous préconisons que cette stratégie de transition énergétique du transport :

- *constitue un projet collectif contribuant aux politiques industrielles, énergétiques et environnementales de niveau européen ;*

Un projet industriel, car la maîtrise de la motorisation électrique, de son système de recharge et de son déploiement sur un marché de plus de 500 millions d'habitants constitue un atout de poids pour l'industrie européenne qui opère à l'échelle mondiale. Les Chinois ne nous ont pas attendus dans ce domaine !

Un projet énergétique, car l'organisation de la production-stockage-distribution d'électricité nécessaire à la circulation des véhicules électrifiés à l'échelle européenne constituerait un élément fédérateur des politiques énergétiques décarbonées des Etats membres de l'Union, aujourd'hui peu cohérentes.

Un projet environnemental, car le véhicule électrique est déjà une réponse préconisée dans un certain nombre de grandes villes européennes, pour améliorer le cadre de vie, limiter la pollution locale, et favoriser l'usage partagé des véhicules.

- *se concrétise par quatre mesures phares permettant à l'Europe d'engager cette transition :*

Un affichage clair de la volonté de l'Union Européenne d'électrifier le parc automobile, qui se traduise dans les normes de performance en matière d'émissions pour les voitures particulières neuves (futurs normes Euro 7), et sur leur cohérence avec les politiques énergétique des différents pays membres ;

La convergence rapide sur les normes de recharge des batteries des véhicules, qui permettront d'intensifier l'installation des chargeurs dans les trois catégories (ultra rapide, rapide, standard) et garantiront ainsi l'interopérabilité des véhicules électrifiés circulant sur l'ensemble des réseaux routiers européens ;

L'accélération du programme européen de recherche-développement relatif aux batteries et autres systèmes de distribution-stockage de l'électricité, pour assurer la fiabilité d'approvisionnement énergétique des véhicules à long terme.

L'utilisation de carburants ex biomasse pour les poids lourds et les véhicules hybrides rechargeables, à mesure de la disponibilité de leur production.

\*  
\* \*

Cette stratégie permet d'engager les premières étapes d'un programme d'action qui réponde aux objectifs à court-moyen terme de limitation des consommations d'énergie et de réduction des pollutions locales liées au transport ; et qui prépare des cheminements technologiques à plus long terme permettant de s'approcher au plus près de l'objectif final d'une mobilité décarbonée.



*Les Ingénieurs et Scientifiques de France, au cours de l'année 2018, poursuivront leurs débats avec les experts des domaines concernés sur les conditions techniques et économiques d'émergence d'une mobilité décarbonée, en vue de traduire ces orientations stratégiques dans une proposition programme d'action qui approfondira les questions complexes de stockage et de distribution liées aux perspectives de développement des véhicules électriques (batteries et piles à combustible) et à leurs besoins d'alimentation énergétique.*



## ANNEXE 1

### REPERES SUR LA MOBILITE DES PERSONNES ET DES MARCHANDISES EN FRANCE

Les consommations d'énergie pour le transport dépendent au premier degré de la demande de mobilité des personnes et des marchandises, ainsi que des volumes de trafic des différents véhicules de transport utilisés.

Afin de fonder le scénario « mobilité sans carbone » présenté en première partie de ce cahier, on trouvera ci-dessous **une présentation succincte des dynamiques des flux de voyageurs et de marchandises**, et les évolutions tendanciennes des trafics de véhicules correspondants.

Le tableau ci-après indique, pour chaque catégorie de mobilité, les flux et trafics observés en 2015 (résultant des Comptes Transports de la Nation), en rapport avec les filières énergétiques proposées dans le scénario.

#### 1. Voyageurs à longue distance : 320 Mds Voy-km ; en progression annuelle 1% par an.

- Ces déplacements à longue distance représentent 41% des voyageurs-km annuels parcourus en France, 28 % des km-automobiles et 15% des émissions de CO<sub>2</sub> du transport intérieur.
- La demande de mobilité interurbaine s'accroît tendanciellement de 1% par an, dans une hypothèse moyenne de croissance du PIB de 1,5% par an (proposée par le MINEFI au COR).
- La part des modes de transport collectifs (trains, autocars, aérien intérieur), actuellement de 35% pourrait légèrement augmenter, ainsi que le nombre de personnes par véhicule (covoiturage).

#### 2. Voyageurs de proximité : 544 Mds. Voy-km : tendance à la stabilité des voyageurs-km parcourus, dont :

##### **Grandes agglomérations avec réseau de transports collectifs (40% de la population) : 204 Mds. Voy-km**

- Ces déplacements quotidiens de proximité représentent 22 % des voyageurs-km annuels parcourus en France, 23% des km-automobiles et 17% des émissions de CO<sub>2</sub> du transport intérieur
- Une majorité de déplacement dans les grandes agglomérations s'effectue à pied, en vélo et en transports collectifs, dont l'utilisation est en forte croissance.
- L'utilisation de la voiture est plutôt en décroissance, liée aux difficultés de circulation et aux restrictions de stationnement.

##### **Périurbain et rural avec utilisation dominante de la voiture (60% de la population) : 340 Mds. Voy-km**

- Ces déplacements quotidiens de proximité représentent 37 % des voyageurs-km annuels parcourus en France, 47 % des km-automobiles et 26 % des émissions de CO<sub>2</sub> du transport intérieur.
- L'utilisation de la voiture est omniprésente (93 % des mobilités quotidiennes), mais elle ne s'accroît pas, en raison de l'évolution démographique de la population (vieillesse et sous-emploi).
- L'utilisation des transports ferroviaires de la vie quotidienne (RER et TER) est en forte croissance, permettant l'accès des populations périurbaines aux zones d'emplois des cœurs de métropoles denses.

#### 3. Marchandises longue distance : 303 Mds T-km : reprise de la croissance (+ 1,8% par an), liée au PIB Europe.

- Ces transports à longue distance représentent l'équivalent de 18 % du trafic des voitures particulières (un camion maxi-code équivaut à 3 voitures), et 22,5 % des émissions de CO<sub>2</sub> du transport intérieur.
- L'essentiel du transport intérieur (87%) est assuré par les camions (maxi-codes), dont la part de marché s'est accrue au cours des 15 dernières années.
- Le rythme de croissance du trafic des poids lourds devrait cependant rester plus modéré, en raison d'un meilleur remplissage des véhicules et d'une certaine reprise des trafics ferroviaires et fluviaux.

#### 4. Véhicules utilitaires légers : trafic annuel de l'ordre 100 Mds de véh-km, en croissance (+1,2% par an).





- Ce mode de transport est utilisé de façon très diversifiée : activités professionnelles (services à la personne), transport de biens (moyenne distance et distribution urbaine), loisirs (caravaning)...
- Il représente 17% du trafic routier total, majoritairement urbain (près de 30 % des circulations locales) ; et 19,5 % des émissions de CO2 du transport intérieur.
- Sa croissance s'explique notamment par le développement important de la logistique urbaine liée au numérique (e-commerce, par exemple).



TABLEAU CROISE : CATEGORIES DE MOBILITE / FILIERES ENERGETIQUES

*En milliards de voyageurs-km ou de tonnes-km*

<b>La demande de Transport en France</b> <i>Trafics et émissions CO2</i>				<b>Filières énergétiques</b> <i>X Principaux croisements pertinents</i>			
<b>Voyageurs intérieurs</b> <i>Mds. Voyageurs x km 2015</i>		<b>Trafic 2015</b> <i>Véh x km</i>	<b>Emission CO2 2015</b>	<b>Pétrole et gaz</b>	<b>Bio-carburants</b>	<b>Electricité Mix européen</b>	<b>Hydrogène</b>
Voyageurs longue distance	Aérien int. 14		3,5		X		
	Train 70						
	Autocar 50			économies	X		
	V.P. 250	140	19,5	économies		X (hybrides)	X (long terme)
	<b>Total : 384</b>						
Mobilité de proximité : Grandes aggl.	Métro/RER 22						
	Bus/ tram 12					X	X
	V.P. 170	120	21,0	économies		X	
	<b>Total : 204</b>						
Mobilité de proximité : Périurbain et rural	Autocar 11				X		
	V.P. 318	230	32,0	économies		X	
	RER-TER 11						
	<b>Total : 340</b>						
TOTAL voy. intérieurs	T.C. 190						
	V.P. 738	490 (1)					
	<b>Total : 928</b>		72,5				
TOTAL Marchandises Mds. Tonnes x km 2015	Train 34,3				X		X
	Péniche 7,5		1,2		X		X
	Camion 281,4	26,4 (2)	28	Substitut gaz	X		X
	<b>Total : 323</b>						
dont VUL utilitaires légers	Total, dont :	100 (2)	25,5				
	Interurbain	45					
	Urb. dense	25				X	
	Peu dense	30				X	
<b>TOTAL CO2</b>	<b>M. Tonnes</b>		132,3				

(1) En additionnant les trafics de VL et la moitié des trafics de VUL  
(2) Aux 26,4 Mds de PL-km (10 tonnes d'emport /véh) s'ajoutent 23 Mds de VUL-km (0,35 tonnes d'emport / véh.)



NB. Ce tableau permet d'estimer, en ordre de grandeur, les impacts des scénarios (ou trajectoires) de pénétration de chacune des filières énergétiques (en colonnes) dans les différents parcs et trafics de véhicules : train ou métro, autocars ou autobus, voiture interurbaine ou urbaine, camions ou péniches...

Pour chacun des segments de la demande de mobilité, les baisses d'émissions de CO2 sont estimées comme suit : baisse d'émission (Mt CO2) = émissions actuelles (Mt CO2) x part de pénétration de la filière énergétique dans le parc de véhicule (%) x baisse d'émission par véhicule-km apportée par la filière (%). Par exemple, l'introduction des véhicules électriques dans 30 % du parc de voitures utilisé pour les déplacements de longue distance diminuerait les émissions de CO2 de 15 Mt (Citepa 2012) x 30% (part des km électriques) x 100% (économie CO2/km) = 4



## ANNEXE 2

### L'AVITAILLEMENT ENERGETIQUE DES VEHICULES

#### • *Un facteur déterminant du choix de filières technologiques*

L'objectif de long terme d'une mobilité sans carbone mis en évidence lors de la COP 21 de décembre 2015 impliquera, pour la France et pour l'Europe la disponibilité à long terme de filières d'énergie qui soient à la fois : produites en quantités suffisantes et dans les conditions économiques acceptables ; non polluantes pour l'environnement humain et l'avenir de la planète

Ces choix de transition énergétique font aujourd'hui débat, dans une concurrence exacerbée, entre la filière historique « carburants fossiles – moteur thermique » dont on cherche à limiter les nuisances, et d'autres filières concurrentes, déjà disponibles selon différents niveaux d'adaptation technique et de maturité économique : la filière « carburants ex biomasse ; la filière « tout électrique (et hybride rechargeable en phase transitoire) » ; la filière hydrogène (piles à combustible).

Pour éclairer ce débat, il est apparu que la question de l'avitaillement énergétique des véhicules sera l'une des clés de compréhension déterminante le choix des filières. La présente note fait un point résumé de cette question, à la lumière de l'analyse des conditions techniques et économiques d'approvisionnement en énergie des véhicules de transport (en carburant ou autres sources d'énergie), en comparant différentes catégories de véhicules de transport (automobile, camion, avion...), avec différents types d'usage (trajets courts ou trajets longs)

L'avitaillement énergétique des véhicules de transport doit combiner trois exigences, complémentaires et indissociables pour leur utilisation économique :

- En amont, une production d'énergie en quantité suffisante pour satisfaire la demande économique,
- En aval, une capacité de stockage de cette énergie embarqué (en volume et en poids),
- Au centre du dispositif, les conditions de distribution de cette énergie à la station et sa vitesse de chargement dans le véhicule.

La filière « carburants fossiles – moteur thermique » s'est révélée particulièrement performante pour combiner ces trois exigences, avec ses unités de production de carburants (les raffineries), le réseau de transport (camions citernes) et de livraison aux stations de distribution (stations-services routières et avitaillement aéroportuaire) et la vitesse de chargement de l'énergie dans les véhicules (le plein d'énergie en quelques minutes).

Qu'en est-il des autres filières technologiques attendues à moyen et long terme ?

#### 1. *La filière « carburants ex biomasse »*

Cette filière a le gros intérêt d'utiliser les mêmes conditions favorables d'avitaillement que celles actuelles des carburants fossiles : capacité de stockage dans les véhicules (même ratio de poids et volume par unité d'énergie embarquée) ; possibilités de mixage avec les carburants actuels (adaptation à la marge des installations de transport et de stockage) ; même vitesse de chargement dans les véhicules.

Son utilisation sera limitée par l'insuffisance des capacités techniques de production, liées à la disponibilité en quantité suffisante des matières biologiques utilisées, compte tenu des autres usages nécessaires des terres agricoles et forestières. Il faut donc la considérer comme une filière d'appoint importante, mais non susceptible de répondre à l'ensemble des besoins énergétiques à long terme du transport de personnes et de marchandises.

#### 2. *La filière « Tout électrique (et hybride rechargeable en phase transitoire) »*

**Pour les trajets à courte distance des véhicules légers**, cette filière (d'usage exclusif de l'énergie électrique, y compris pour les hybrides) est devenue bien adaptée aux exigences de l'avitaillement énergétique : le progrès des performances des batteries permet d'ores et déjà l'autonomie énergétique des véhicules légers (VL et VUL) pour



une utilisation journalière sans recharge, ou avec des recharges locales occasionnelles de moyenne puissance (bornes de recharge urbaines).

Ce mode d'usage permet d'utiliser le réseau de distribution électrique en période creuse (recharges de nuit) ou occasionnellement de jour (recharges d'appoint limitées). Il évite les pointes de consommation d'électricité, et limite les demandes localisées de puissance électrique qui ne seraient pas compatibles avec la capacité des réseaux de distribution.

**Pour les trajets à longue distance des véhicules légers**, l'utilisation à grande échelle de voitures « tout électriques à batteries » va cumuler trois problèmes d'avitaillement :

- *La fréquence des recharges nécessaires*, qui peut être diminuée avec des batteries plus importantes ou plus performantes : mais cela aura des conséquences sur le poids et sur le coût du véhicule, ce qui n'est pas l'objectif économique recherché.
- *Le délai de recharge dans une station-service*, qui doit être court, si l'on ne veut pas ralentir la vitesse moyenne de déplacement du véhicule, ni pénaliser l'exploitation du distributeur qui doit être rentabilisée, ni créer de files d'attentes dans les stations faute de bornes de recharge disponibles.
- *La nécessité de nombreuses bornes de recharge*, concentrées sur les grands itinéraires de transport routier à longue distance, qui pourraient entraîner des appels temporaires très importants de puissance électrique, compatibles ou non avec les capacités de production et de distribution locale d'électricité.

Tout cela pourrait représenter un coût important, encore difficile à chiffrer, compte tenu des incertitudes sur les progrès technologiques et sur les modèles économiques d'organisation des stations-service routières.

#### **Pour les trajets à longue distance des camions**

L'option « moteur électrique avec batteries adaptées est difficilement envisageable, compte tenu des puissances requises, de l'ordre de 150 kW, ce qui conduit à des capacités de l'ordre du MWh.

L'option « autoroute électrique » ne devrait pas poser de problèmes techniques d'avitaillement, moyennant l'équipement d'un certain nombre d'itinéraires de transit à fort trafic par des caténaires électriques avec un réseau d'alimentation-distribution associé. Elle impliquerait un modèle économique permettant d'amortir les dépenses d'équipement et d'exploitation de l'infrastructure routière électrique et de la motorisation électrique des véhicules.

### **3. La filière « Hydrogène pour piles à combustibles »**

#### **Pour les trajets à longue distance des camions**

La solution hydrogène s'impose à long terme sur le plan technique, mais elle se heurte, au moins à moyen terme, au coût de l'hydrogène électrolytique distribué dans les stations-services comparées à celui du gazole même issu de pétrole à 100\$/baril.

#### **Pour les trajets à longue distance des voitures (VL et VUL)**

La solution « véhicule électrique à pile à combustible et carburant hydrogène » pourrait se révéler, du moins à long terme, plus efficace (techniquement et économiquement) que celle des véhicules électriques avec batteries à forte autonomie et recharges très rapides dans des stations-service sur les grands itinéraires de transit.

Le véhicule hybride-rechargeable (avec motorisation électrique pour les trajets courts et extension thermique pour les trajets longs) serait alors une filière de transition - déjà commercialisée -, en l'attente d'une filière hydrogène économiquement viable ou d'un modèle économique adapté aux recharges rapides de batteries sur les trajets longs.

## **ANNEXE 3**



## VOITURE CONNECTEE, VOITURE AUTONOME... QUELS IMPACTS POSSIBLES ?

### • Pour les constructeurs de véhicules

Très clairement, les constructeurs sont confrontés à trois défis, l'énergie (*voir 3<sup>ème</sup> partie*), la voiture connectée et la voiture autonome. Ces trois facteurs poussent les industriels à s'adapter très vite faute de quoi leur survie est en jeu. C'est une révolution aussi majeure pour eux que la fabrication à la chaîne.

L'innovation est le croisement d'une idée et d'une contrainte, l'idée seule ne suffit pas à créer un développement, puis un marché, il faut un accélérateur de type contrainte. La mobilité urbaine subit trois contraintes de rareté (ou de coût) : l'énergie, l'espace et l'environnement.

Une rupture survient quand il y a simultanément apparition d'un besoin ou d'une contrainte et émergence d'une technologie nouvelle. La rupture vient au-delà de l'innovation. C'est exactement ce qu'il se passe dans la mobilité.

La voiture électrique et/ou la voiture autonome ne résoudra pas la congestion urbaine. C'est la voiture connectée qui permet de passer de 1,1 passager /voiture à 1,3 ou 1,4 et peut avoir un effet sur la baisse de la congestion. Pour cela il faut convaincre l'usager par de nouveaux services issus des technologies et une bonne dose d'incitations, en somme carotte et bâton. C'est très compliqué, le « blablacar courte distance » se cherche encore ou plus exactement on n'a pas trouvé de modèle économique rentable.

### • Pour les opérateurs de services de mobilité

Les opérateurs–exploitants de transport public travaillent à fond sur ces nouveaux services de type covoiturage, ayant compris l'intérêt de coupler mobilité individualisée et collective. Pour modifier le coefficient de remplissage automobile, il faut trouver des incitations financières et fiscales : l'évolution au fil de l'eau (business as usual) ne suffit pas ou prend trop de temps.

Très peu d'appels d'offre lancés par les Autorités organisatrices demandent des solutions de mobilités combinées ; ces autorités restent trop sur « faites nous mieux pour moins cher ». Il faut surtout passer la politique du coût du transport à celle de l'efficacité globale d'un territoire, son attractivité et sa performance économique entraînant un cercle plus vertueux. C'est compliqué et là encore il faudra du temps, mais c'est cela l'art de construire une politique.

Mais c'est probablement via les transporteurs que ces développements aboutiront, ce qui explique leurs efforts intenses pour monter des expérimentations de navette autonome et autres services connectés. Il faut saluer l'initiative commune de SNCF, Transdev, Blablacar de monter un entrepôt de données sur l'ensemble de la chaîne multimodale des déplacements. En effet et paradoxalement, la voiture connectée et également la voiture autonome ont besoin de communications avec l'infrastructure, à la charge de son gestionnaire. Une voiture autonome n'en a que le nom, elle est tributaire de son environnement lui-même devant être géré ou à tout le moins maintenu.

Il faudra surtout et rapidement pour prendre un bus, un taxi ou une voiture partagée, disposer d'un même système de paiement et d'information. On peut noter dans ce sens les efforts de la SNCF pour offrir une solution complète porte à porte et non plus gare à gare.

A quand le pass-navigo utilisable pour un taxi ou le covoiturage, et à quand un navigo temporaire et multimodal (pour les touristes et occasionnels) rechargeable à la demande (comme à Londres). Les techniques existent, mais il faudra un effort politique des Autorités organisatrices pour innover dans les modalités de délégation de services



collectifs, et pour imposer aux véhicules individuels les contraintes liés au partage des espaces publics rares et convoités.

## **ANNEXE 4**

### **RENOUVELLEMENT DU PARC PAR DES VEHICULES ELECTRIQUES : UN SCENARIO POSSIBLE**





*Peut-on organiser une transition du parc automobile français vers un parc tout électrique (avec batteries, rechargeables), et selon quelles étapes réalistes ?*

*En se référant à l'objectif – affiché par le Gouvernement - d'une fin des ventes des véhicules essence et diesel d'ici 2040, le scénario présenté ci-dessous s'efforce de « baliser » les étapes possibles d'une transition électrique du parc automobile, avec des repères à examiner avec les acteurs de la filière automobile.*

### **Le parc actuel et son usage :**

Les 37 millions de véhicules légers en France (31 VP + 6 VUL) soit 0,5 VL / habitant (hors VUL), se répartissent schématiquement en :

- ménages en zone dense : 45 % de la population et 30% du parc, soit 10 millions de VL plutôt à usage « loisirs à moyennes et longues distance » ;
- ménages en zone peu dense : 55 % de la population et 70% du parc, soit 27 millions de VL, dont 15 millions plutôt à usage « quotidien de proximité » et 12 millions de VL+ VUL plutôt « professionnel moyenne distance » et « tourisme longue distance »

Un renouvellement de de parc de 6% par an (2 millions de VP neuves + 200 000 VUL), dans lequel les véhicules électriques représentent 25 000 unités commercialisées en 2017 (voir document joint du 18 novembre 2017, tableau page 5)

### **Première étape : 2022 – 2025 : La commercialisation des véhicules électrique devient perceptible.**

Le prix de commercialisation des modèles électriques (batteries incluses) est équivalent à celui des véhicules thermiques de même niveau (hors bonus écologique).

Ce qui permet d'atteindre le cœur du marché de renouvellement, c'est-à-dire les 15 millions de voitures d'usage quotidien de proximité dans les territoires peu denses (maisons individuelles et revenus faibles ou moyens), où la recharge (la nuit à domicile + un minimum de bornes publiques dans les centres urbains locaux) ne pose pas de problème. Avec un objectif de part de marché du véhicule neuf atteignant 10%, soit 200 000 véhicules électriques commercialisés en 2025.

### **Deuxième étape : 2025 – 2035/2040 : La part de marché du véhicule électrique devient prépondérante.**

Suffira-t-il de 10 à 15 ans pour que la part des véhicules électriques dans le marché du neuf passe de 10 % en 2025 (soit 200 000 véhicules commercialisés) à 90 % en 2035/2040 (soit 1 800 000 véhicules commercialisés) ? Il aura fallu investir dans de nouvelles unités de production (et reconvertir les anciennes), régler les problèmes de recharge en milieu urbain dense (dans les parking résidentiels), qui resteraient nécessaires pour les parcours à longue distance en attendant l'équipement complet des stations de recharge sur les itinéraires interurbains...

A l'issue ces 10 à 15 années de forte croissance de la part de marché des véhicules électriques, le parc correspondant pourrait atteindre environ 9 millions de véhicules vers 2035/2040 (le cumulé des ventes de neuf sur 10/15 ans), soit environ 25% du parc total. Compte tenu le marché d'occasion et de la réforme des véhicules usagés, la progression annuelle du parc de véhicules électriques plafonnerait autour de 1,8 millions de véhicules par an, soit environ 18 millions de véhicules vers 2040/2045, soit 50% du parc total. Le reste du parc serait composé de véhicules thermiques classiques et probablement d'hybrides (rechargeables ou « range extender ») ayant plus ou moins d'autonomie électrique.

### **Troisième étape : 2040 – 2050 (et au-delà) : La fin programmée du parc véhicules thermiques**

La fin de la commercialisation des véhicules neufs thermiques (classiques ou hybrides rechargeables) à partir de 2040/2045 impliquerait à la fois :

- La mise sur le marché de véhicules électriques à grande autonomie (proche de 400 – 500 km en circulation réelle) à des prix abordables (à partir de 12 000 euros, batterie incluse) ;
- Le fonctionnement satisfaisant de stations-services de recharge sur les grands itinéraires routiers interurbains (temps d'attente inférieur à une demi-heure pour une recharge complète) ;





- Le maintien en fonctionnement des services de maintenance et d'approvisionnement en carburant du parc thermique (qui mettra une dizaine d'années à passer de 18 millions de véhicules thermiques et hybrides circulant en 2040/2045, à 3 millions en 2050/2055, sauf accélération du renouvellement.