



Gilles Guerassimoff
Laura Sobra
(Coord.)

Mobilité durable et énergie : comment les concilier ?

Gilles Guerassimoff, Laura Sobra (Coord.), *Mobilité durable et énergie : comment les concilier?*, Paris : Presses des Mines, collection Développement durable, 2020.

© Presses des MINES - TRANSVALOR, 2020
60, boulevard Saint-Michel - 75272 Paris Cedex 06 - France
presses@mines-paristech.fr
www.pressedesmines.com

ISBN : 978-2-35671-632-3
Dépôt légal : 2020
Achevé d'imprimer en 2020 (Paris)

Cette publication a bénéficié du soutien de l'Institut Carnot M.I.N.E.S.
Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et d'exécution réservés pour tous les pays.

Mobilité durable et énergie :
comment les concilier ?

Collection Développement durable

Congrès OSE, *Quels vecteurs énergétiques pour une mobilité décarbonée ?*

Ankinée Kirakozian et Gilles Guerassimoff, *Transition énergétique : les déchets ne sont pas en reste. Concept, applications et enjeux de la valorisation énergétique des déchets*

Congrès OSE, *Valorisation énergétique des déchets. Leur place dans la transition énergétique.*

Lucie Domingo, Maud Rio et Xavier Durieux, *How eco-design of products and services can embrace the use phase*

Gilles Guerassimoff, *Microgrids : pourquoi, pour qui ?*

Junqua Guillaume, Brulot Sabrina, *Écologie industrielle et territoriale*

Anne Ventura, *Challenges of functionality for eco-design*

François Cluzel, Benjamin Tyl et Flore Vallet, *The challenges of eco-innovation*

Bernard Bourges, Thomas Gourdon et Jean-Sébastien Broc, *Empreinte carbone : évaluer et agir*

Frédéry Lavoye, Frédéric Boeuf et Françoise Thellier, *Qualité des ambiances dans les bâtiments. Le confort thermique de L'Habitant*

Nadia Maïzi, *Changer d'échelle pour les négociations climatiques. Huit initiatives régionales, sectorielles et citoyennes*

Bruno Duplessis et Haitham Joumni, *Économie et développement urbain durable 3*

Ville et logement, modèles et outils pour les politiques énergétiques

OSE Association Événement, *Les nouvelles filières gazières dans le mix énergétique de demain*

Isabelle Blanc, *EcoSD Annual Workshop*

Association Événement OSE, *Énergie, citoyens et ville durable*

Labaronne Daniel, *Villes portuaires au Maghreb*

Emmanuel Garbolino, *Les bio-indicateurs du climat*

Bruno Peuportier (dir.), *Eco-conception des ensembles bâtis et des infrastructures*

Bruno Peuportier (dir.), *Livre blanc sur les recherches en énergie des bâtiments*

Association Événement OSE, *Smart grids et stockage*

Gilles Guerassimoff, Nadia Maïzi (Dir.), *Smart grids. Au-delà du concept comment rendre les réseaux plus intelligents*

François Mirabel, *La Déréglementation des marchés de l'électricité et du gaz*

Fabrice Flipo, François Deltour, Michelle Dobré, Marion Michot, *Peut-on croire aux TIC vertes ?*

Benjamin Israël, *Quel avenir pour l'industrie dans les places portuaires ?*

Association Événement OSE, *Eau et Énergie*

Bruno Duplessis et Charles Raux (Dir.), *Économie et développement urbain durable 2*

Gilles Guerassimoff, Nadia Maïzi (Dir.), *Eau et Énergie : destins croisés*

Christophe Gobin, *Réussir une construction en éco-conception*

Jean Carassus et Bruno Duplessis (Dir.), *Économie et développement urbain durable 1*

Gilles Guerassimoff et Nadia Maïzi (Dir.), *Carbone et prospective*

Peuportier Bruno, *Éco-conception des bâtiments et des quartiers*

Gilles Guerassimoff et Nadia Maïzi (Dir.), *Îles et énergie : un paysage de contrastes*

Gilles GUERASSIMOFF et Laura SOBRA (Coord.)

Mobilité durable et énergie : comment les concilier ?

Auteurs

Les élèves de la promotion 2018 :

Lyes AIT MEKOURTA	Rihab BEN MOKHTAR
Ahmed CHAABANE	Ana DAVID
Tristan DELIZY	Lucas DESPORT
Ayoub EL BOUHALI	Lionel FABIANI
Antoine JOURDAIN DE MUIZON	Dorine JUBERTIE
Yacine LAHMA	Aboubakr MACHRAFI
Florian MARCHAT	Valentin MATHIEU
Mahmoud MOBIR	Hamza MRABIHI
Martin PIERSON	Eli RAKOTOMOSA
Laura SOBRA	Juliette THOMAS
Maxence TOULOT	



PSL 

Sommaire

PREFACE	IX
AVANT-PROPOS	XI
INTRODUCTION	15
CHAPITRE 1 - LES TECHNOLOGIES DE L'HYDROGENE	19
CHAPITRE 2 - LES LEVIERS AU SERVICE DE CES OBJECTIFS	53
CHAPITRE 3 - LES VECTEURS ENERGETIQUES POUR UNE MOBILITE DECARBONEE	109
CHAPITRE 4 - POLITIQUE ET CONDUITE DU CHANGEMENT	255
CHAPITRE 5 - VISION PROSPECTIVE	323
TABLE DE MATIERES GENERALE	353

Préface

Les transports étant les plus émetteurs de gaz à effet de serre, il est indispensable d'engager de profondes transformations dans l'ensemble du secteur pour atteindre nos objectifs de neutralité carbone à l'horizon 2050.

La crise sanitaire a révélé notre capacité à concrétiser ces transformations. La société a en effet répondu par une grande capacité de résilience, dans l'urgence et dans un temps très court : Le secteur agro-alimentaire a poussé l'émergence de nouveaux circuits de distribution, des collectivités ont mis en place en un temps record des pistes cyclables temporaires, les espaces publics de nos villes se sont adaptés à une vitesse incroyable...

Le COVID a mis un coup d'accélérateur à la courbe d'apprentissage de nombreux acteurs, c'est une certitude. Mais désormais, le défi est bien d'accompagner cette dynamique dans le temps long. Pour le relever, il nous faut envisager une mobilité de sortie de crise plus résiliente.

L'augmentation de notre résilience est envisageable uniquement sous la condition de remplacer le système de mobilité actuel reposant essentiellement sur l'usage de la voiture individuelle. S'inscrire dans une continuité et penser à un retour au monde d'avant en misant notre avenir sur d'hypothétiques progrès technologiques ne sera pas suffisant. Notre résilience se déterminera par notre capacité à mener à bien une transition vers un système de mobilité doté d'actions concordantes visant à la fois la maîtrise de la demande, le report vers des modes et moyens de transports plus favorables à l'environnement, et l'amélioration des technologies existantes.

Sur l'axe de la demande, il est fondamental de « questionner » l'évolution des besoins de mobilité, compte tenu des changements de modes de vie (télétravail, vieillissement de la population...). Ce questionnement amène à interroger les pratiques, usages et usagers afin d'agir sur la demande et d'impacter les comportements et les modes de vie vers plus de sobriété. Notre résilience passe nécessairement par une société plus économe en ressources, en matériaux mais aussi en espace et en coûts liés aux déplacements afin de viser une mobilité plus inclusive. Favoriser le développement des circuits courts participe aux changements des modes de consommation observés pendant la crise. L'enjeu est d'éviter un effet rebond surconsommateur de produits importés. De la même manière, l'aménagement du territoire, les enjeux sont à la fois de maintenir une densité de population en apprenant à vivre avec les contraintes de distanciation sociale et de tirer profit des enseignements de la crise pour penser un rééquilibrage territorial

Même si les déplacements inutiles sont enrayés, il n'en reste pas moins qu'un volume important persistera. Ce point a été largement démontré lors de cette crise sanitaire durant laquelle les déplacements essentiels se sont maintenus et relève d'une grande nécessité pour le bon fonctionnement de notre société.

Encourager le report modal en faveur de modes moins impactant pour l'environnement constitue donc un levier fondamental d'une mobilité de demain plus résiliente. L'objectif est de développer la mobilité active et partagée ainsi que le report de la route vers le fer et la mer pour les marchandises. Il s'agit également de mettre en avant des leviers permettant de favoriser l'intermodalité et la multimodalité.

Enfin, comme le recours au véhicule individuel est parfois inévitable, le parc de véhicules devra être transformé aux profits des technologies bas carbone. L'essor de l'électromobilité sur des segments de véhicules plus vaste que le véhicule léger, la place des carburants alternatifs tel que le BioGNV, Biocarburants et l'essor incroyable de l'Hydrogène présentent une large palette de solutions aux usages tout aussi importants. Cette ambition incarnée sur le plan national prend un sens nouveau devant l'ambition européenne de devenir un acteur majeur de la chaîne de valeur de ces technologies, de l'offre de l'énergie à la technologie des véhicules.

Ce triptyque d'action a été abordé avec succès et un grand professionnalisme par les étudiants du mastère Optimisation des Système Energétiques en adoptant une approche systémique du sujet complexe du transport et la mobilité. La présentation faite lors du congrès le 26 septembre 2019 ont démontré la portée du défi mais aussi l'intérêt de jeune génération face à cet enjeu colossale d'une neutralité carbone 2050 tout particulièrement pour le secteur traité dans cet ouvrage. Je remercie l'ensemble de l'équipe pédagogique des Mines Paris Tech d'avoir permis à l'ADEME de s'associer à cette aventure enrichissante et porteuse d'avenir. Un merci pour tout particulier à Gilles Guerassimoff, responsable du mastère OSE et Lionel Fabiani, président du bureau des élèves de la promo du mastère 2018-2019 pour la qualité de cet ouvrage à partager largement avec l'ensemble des acteurs de l'écosystème.

Bonne lecture !



Jérémie ALMOSNI
Chef de Service
Service Transports et mobilités

Avant-propos

Animer un Mastère Spécialisé® en Optimisation des Systèmes Énergétiques de l'École des Mines de Paris nous permet de profiter d'un groupe de jeunes ingénieurs extrêmement motivés pour ouvrir à l'amélioration de nos systèmes afin de minimiser leur impact sur notre environnement. Une des missions que nous leur proposons, via la définition d'un thème fédérateur, est la réalisation d'un ouvrage leur permettant d'exprimer tout leur talent. Cette formation d'une année organisée par le Centre de Mathématiques Appliquées propose à la vingtaine d'ingénieurs diplômés qui la compose, un éclairage original du monde de l'énergie basé sur une vision pluridisciplinaire mêlant les techniques d'optimisation et aide à la décision à une approche prospective. Vous trouverez de plus amples renseignements sur notre site internet <http://mastere-ose.fr>.

L'année de formation est guidée par une thématique qui reflète l'actualité énergétique afin que nos jeunes ingénieurs puissent réaliser un travail approfondi au cœur du vaste domaine de l'énergie.

Après des thèmes aussi variés que l'hydrogène comme vecteur énergétique, les smart-grids, le milieu insulaire, la valorisation énergétique des déchets ou les synergies eau-énergie, il était incontournable de faire un point sur les vecteurs énergétiques possible pour envisager une mobilité décarbonée.

Hormis la synthèse qui a abouti au présent ouvrage, les élèves ont pu apprécier les problématiques de mobilité dans un contexte très contraint comme l'île de Taïwan lors de leur voyage d'étude. Ce fut aussi l'occasion d'échanger sur le domaine avec les spécialistes locaux au cours des visites techniques de présenter deux conférences d'abord à l'Université NCU (National Central University) à Taïpei puis à l'Université NCKU (National Cheng Kung University) à Tainan. Enfin, la thématique de la mobilité décarbonée a servi de fil conducteur au congrès annuel du Mastère : « Quels vecteurs énergétiques pour une mobilité décarbonée ? » réalisé conjointement avec la chaire « modélisation prospective au service du développement durable » (MPDD) du Centre de Mathématique Appliquée de Mines ParisTech. Il s'est déroulé le 26 septembre 2019 à l'École des Mines de Paris sur son site de Sophia Antipolis. Les actes du congrès sont disponibles auprès des Presses des Mines.

Le travail de nos auteurs a débuté juste avant le dépôt de la loi d'Orientation des Mobilité en novembre 2018. Dans ce contexte de propositions très variées, nous avons pris le parti de ne traiter que des vecteurs énergétiques pour une mobilité décarbonée des biens et des personnes sans développer les modes doux. Néanmoins nous abordons tous les aspects indispensables à une analyse comparative complète des autres modes. À l'heure de la loi sur la mobilité 2020, cet ouvrage vient compléter une littérature abondante et donne au lecteur un

état des lieux des filières énergétiques associées aux transports en abordant leurs contraintes et défis afin d'enrichir le débat sur la transition énergétique.

Il est illusoire de penser traiter le sujet sur les vecteurs énergétiques pour une mobilité décarbonée en seul ouvrage, celui-ci ne prétend aucunement le faire. Il permettra aux profanes de mieux comprendre et comparer ces vecteurs. Dans le contexte actuel où de nombreuses annonces en faveur de différentes filières de mobilité fleurissent, cet ouvrage propose des arguments permettant au lecteur de faire la part de chose. Dans un premier chapitre l'état des lieux de la mobilité est exposé ainsi que les objectifs au niveau européen et français. Ensuite dans un deuxième chapitre, les auteurs exposent les leviers possibles pour l'atteinte de ces objectifs. Les vecteurs énergétiques pour une mobilité décarbonée sont introduits dans le troisième chapitre à travers les technologies, les infrastructures, le stockage et l'analyse du cycle de vie associé à ces filières. Le quatrième chapitre nous montre l'importance des politiques pour l'avènement d'une mobilité décarbonée. Enfin le dernier chapitre présente les visions des exercices de prospective les plus récents.

AVERTISSEMENTS

Cet ouvrage ne peut prétendre à l'exhaustivité sur la question comme on pourrait le penser à la lecture de son titre. Nous avons voulu aborder la question de la mobilité décarbonée par une approche volontairement différente des ouvrages que l'on peut trouver traitant de cette question. Certains articles pourront paraître très simplifiés alors que d'autres très techniques. Nous avons volontairement laissé ces deux niveaux de lecture car ils reflètent les difficultés que peuvent être rencontrées dès que l'on traite de la mobilité par l'une de ces facettes. L'étude de la mobilité aborde une multitude de disciplines. Nous avons voulu aborder dans chacun des chapitres les éléments de disciplines diversifiées qui nous semblaient indispensables à la compréhension des enjeux qui gravitent autour de ce thème. Comme tout ouvrage collectif, vous trouverez des redondances dans certaines définitions reprises dans plusieurs chapitres. Nous les avons volontairement laissées afin que le lecteur puisse aborder chacun des chapitres de façon la plus autonome possible sans avoir à jongler avec les autres pour trouver des notions qui ne seraient abordées qu'une seule fois dans l'ouvrage.

Les élèves qui ont rédigé ces articles se sont inspirés des nombreuses références incontournables qui existent dans le domaine qui sont de nombreuses fois citées et que nous vous invitons à aller consulter pour approfondir le sujet. Ils ont aussi forcément inconsciemment pris parti dans certaines de leurs analyses et nous leur avons volontairement laissé cette liberté afin de susciter la réflexion du lecteur.

Les spécialistes pourront trouver certains passages trop généraux, d'autres montrant un manque de recul pour être complètement pertinents ; quant aux

néophytes, cet ouvrage leur permettra de découvrir une problématique complexe à travers des opinions, qui, quelquefois doivent être débattues. Nous vous invitons par conséquent à vous référer à la généreuse bibliographie de chacun des chapitres afin de parfaire vos connaissances.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier toutes les personnes ayant apporté une contribution à l'élaboration de cet ouvrage, que ce soit par les discussions qu'ont pu avoir les auteurs avec les spécialistes des thématiques abordées, par les visites que nous avons effectuées lors de notre voyage d'étude à Taiwan ou par les relectures des articles par des spécialistes de la mobilité.

Nous tenons à remercier tout particulièrement Jérémie ALMOSNI, Chef de Service Transports et Mobilités de l'ADEME pour son support et ses conseils ainsi que pour nous avoir fait l'honneur de préfacer notre ouvrage.

Il est très important d'avoir eu ce regard critique, même si nous n'avons pu intégrer toutes les remarques qui nous ont été faites. Il nous a permis de mettre en garde le lecteur pour les prises de positions et pour les imperfections dont peut parfois souffrir cet ouvrage sans en ôter toute sa valeur pour un éclairage sur la question ouverte d'une mobilité plus propre.

Enfin, je tiens à remercier tout particulièrement les élèves-auteurs de la promotion 2018 pour leur travail acharné.

Je remercie aussi vivement Nadia MAÏZI, directrice du Centre de Mathématiques Appliquées (CMA), Catherine AUGUET-CHADAJ sa responsable administrative et financière ainsi tout le personnel du CMA qui, par leur implication dans la vie du Mastère spécialisé OSE, ont rendu possible la publication de cet ouvrage.

Bonne lecture.

G. GUERASSIMOFF

Introduction

Ces dernières années ont été marquées par des événements climatiques et catastrophes sans précédent. Années record en termes de températures, épuisement des ressources mondiales de plus en plus rapides, sécheresses, montée des eaux, ainsi que le célèbre dépassement de la barre des 400 ppm de CO₂ dans l'atmosphère. Même si les gouvernements ne semblent pas s'emparer du problème et ne prendre aucune mesure concrète pour atteindre les objectifs présentés dans les divers accords mondiaux, nous commençons pourtant à voir un changement.

Sous l'œil de jeunes actifs, Nous apercevons la naissance d'une conscience écologique chez les jeunes actifs et une volonté de trouver une carrière et un mode de vie qui fasse avancer le monde ou la société dans le bon sens, soit trouver des solutions pour atténuer les impacts du réchauffement climatique. Vaste programme.

C'est donc avec grand enthousiasme que la dix-neuvième promotion du mastère OSE s'est emparé du sujet de la mobilité durable. Par où commencer ? Les choses à dire, à voir et à lire pour embrasser le sujet semblent infinies. Avant, bien sûr, de mettre la main à la pâte et de sortir notre vélo.

L'angle d'attaque que nous (promotion du Mastère OSE) avons choisi (non sans débats) a été d'étudier plus en profondeur les nouveaux vecteurs énergétiques « bas carbone » pour la mobilité. Électricité, hydrogène, gaz et biocarburants ; bien sûr, ces vecteurs ne sont nouveaux que dans le domaine de la mobilité.

Très médiatisés, nous entendons tout et son contraire à propos de ces technologies. Nos travaux se basent alors sur les dernières études, mettant en avant la littérature récente disponible.

Cependant, ces nouveaux vecteurs, bien que très prometteurs, ne sont pas une réponse suffisante face à l'énorme menace du réchauffement climatique et de la croissance tout aussi continue du secteur du transport. Nous avons désiré introduire d'autres leviers efficaces et indispensables à combiner avec l'essor de ces nouvelles technologies.

Pour résumer, le GIEC (groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) est d'accord avec nous (ou alors l'inverse).

Afin d'atteindre les objectifs fixés et donc de contenir l'augmentation des températures sous le seuil de 2 °C, dans son cinquième rapport d'évaluation sur l'évolution du climat (GIEC, 2014), le GIEC recommande d'agir sur les leviers suivants :

- de nouvelles pratiques comportementales (covoiturage, évitement de la mobilité, etc.) ;
- l'usage du report modal ;

- une augmentation de la performance des véhicules et motorisations thermiques ;
- l'usage de nouveaux vecteurs énergétiques bas-carbone ;
- ainsi que des investissements dans les infrastructures et des changements dans l'environnement bâti. (Ce levier ne fait pas l'objet d'une partie dédiée mais chaque chapitre y fera référence).

D'après le GIEC, aucun levier ne serait suffisant, à lui seul, pour atteindre les objectifs d'atténuation du réchauffement climatique concernant le transport. Ces leviers utilisés ensemble, au contraire, représentent un réel potentiel.

Excellente nouvelle, cela donne de l'espoir, mais beaucoup de choses à faire.

Cet ouvrage, finalement, suivra le fil de ces recommandations, tout en mettant l'accent sur les nouveaux vecteurs, sous tous leurs aspects à prendre en considération : consommation d'énergie, infrastructure, contraintes technologiques, impact environnemental. L'aspect économique et politique ne sera pas oublié, ainsi que les dernières études de prospective réalisées sur ce thème, qui lient souvent problématiques technologiques et économiques dans leurs modèles.

Le premier chapitre dresse un état des lieux de la mobilité et des objectifs mondiaux et français de réduction de l'impact environnemental de la mobilité. Tout d'abord, l'état des lieux aborde les différents usages, mais aussi la répartition des différents modes de transports pour les personnes et les marchandises. Ensuite, la question de la consommation énergétique pour le secteur du transport, en France et dans le monde, est abordée. Pour finir, les objectifs affichés en termes de réduction des gaz à effet de serre, liés ou non au secteur du transport, sont passés en revue. Ils concernent l'échelle mondiale, européenne, puis française.

Fort de ces objectifs de réduction des émissions de GES, **le deuxième chapitre** s'intéresse à différents leviers à actionner pour atteindre ces objectifs.

La première partie concerne les études sociologiques et les moyens d'enclencher un changement dans les comportements. Les leviers pour de nouvelles pratiques, telles que la planification et la logistique urbaine, l'éco-mobilité (mobilité partagée, non-motorisée et éco-conduite) sont étudiés à la lumière des dernières recherches.

La deuxième partie détaille plus particulièrement une des nouvelles pratiques à encourager : l'intermodalité. Celle-ci passera en revue les émissions de gaz à effet de serre liées aux différents modes de transport, pour ensuite s'intéresser aux systèmes d'information multimodaux existants et à une comparaison entre des trajets multimodaux et une voiture personnelle.

La troisième partie, quant à elle, s'intéresse à l'amélioration de la performance de véhicules et motorisations. Les champs de recherche concernant l'efficacité

énergétique, les innovations sur les véhicule et moteurs thermiques sont examinées.

Le troisième chapitre est le plus volumineux. En effet, il s'intéresse aux quatre vecteurs énergétiques bas-carbone que nous avons choisi d'étudier plus en profondeur dans le cadre de la mobilité : l'électricité, l'hydrogène, le gaz naturel et les biocarburants.

Volumineux car il aborde des aspects très variés mais indispensables : les avancées technologiques, les infrastructures de recharge, les modes de stockage embarqués, les impacts environnementaux ainsi que la consommation d'énergie associée à leur utilisation. Il vise à donner une vision globale des contraintes associées au déploiement de nouveaux vecteurs énergétiques dans la mobilité, et à apporter quelques éléments de comparaisons, même s'ils restent non exhaustifs.

Dans la première sous-partie « Technologie et innovation », les nouvelles motorisations liées aux vecteurs bas-carbone sont détaillées. Pour chaque vecteur, cette partie examine les innovations apportées récemment aux moteurs, simples ou hydrides, puis expose certains projets ayant permis de développer de nouveaux véhicules, que ce soit dans le domaine routier, ferroviaire, aérien ou maritime.

La deuxième sous-partie nommée « Infrastructures et réseaux » aborde le sujet des réseaux permettant la recharge des différents vecteurs bas-carbone. Afin de dresser une vue d'ensemble des problématiques liées aux infrastructures de recharge, les éléments traités sont principalement, pour chaque vecteur, l'état de l'infrastructure de recharge actuelle, le nombre de bornes, leur type, leur coût, leurs contraintes spécifiques, ainsi que leurs perspectives de développement. Dû à son avance par rapport aux autres, le vecteur électrique est davantage détaillé. L'impact du développement du véhicule électrique sur les réseaux de transport et distribution, les capacités de flexibilité, ainsi que des éléments techniques concernant le raccordement et les procédures de mises en place d'une station de recharge électrique sont étudiés.

La troisième sous-partie « Contraintes technologiques pour le stockage » apporte les éléments techniques concernant les modes de stockage embarqués pour les nouveaux vecteurs bas carbone (comme les batteries, piles à combustible, etc.). Le fonctionnement de ces modes de stockage, leurs caractéristiques principales, ainsi que les contraintes pour leur intégration au sein d'un véhicule sont passés en revue. Des éléments plus avancés sont apportés concernant les batteries, comme les dernières évolutions de la recherche, leur histoire, les différents types de batteries existants et une comparaison technique dans le cadre de la mobilité.

La quatrième sous-partie « Analyse environnementale sur le cycle de vie » relate les résultats de différentes études menées sur l'impact environnemental des vecteurs bas-carbone, sur l'ensemble de leur cycle de vie. Différents impacts sont étudiés, comme l'effet sur réchauffement climatique, la toxicité sur le corps humain, ou encore d'autres effets délétères sur le vivant. La première sous-partie

traite de ces différents impacts concernant les vecteurs électriques, hydrogène et gaz, et une deuxième sous-partie étudie plus spécifiquement les différents types de biocarburants et le biogaz. Quelques paragraphes complètent l'analyse en abordant la déplétion des métaux et le sujet du recyclage des batteries et des piles à combustible.

La cinquième sous-partie « Analyse de cycle de vie de la consommation énergétique » est similaire à l'étude environnementale en cycle de vie, mais examine plus particulièrement la consommation énergétique de chaque vecteur pour un kilomètre parcouru, sur l'ensemble de son cycle de vie.

En fin de chapitre, un tableau récapitulatif compare finalement les vecteurs énergétiques bas-carbone les uns aux autres, en résumant leurs forces, faiblesses, et leurs conditions de déploiement.

Nous arrivons au **quatrième et avant dernier chapitre** « Politiques et conduite du changement ». Les avancées techniques, mêmes les plus merveilleuses, ne pourraient à elles seules permettre le déploiement massif des nouveaux vecteurs énergétiques dans la mobilité. Des incitations des gouvernements sont indispensables afin d'aider au déploiement de ces nouvelles technologies, assez onéreuses en l'état actuel. Afin d'atteindre les objectifs mentionnés au premier chapitre, ce quatrième chapitre énumère les différentes subventions publiques ou privées, normes ou lois qui existent en Europe afin d'aider au déploiement de ces vecteurs énergétiques. Quelques mesures menées plus spécifiquement en France sont également présentées. Pour finir, ce sont les différents outils de promotion spécifiques à chaque vecteur qui sont examinés.

Fort de ces données à la fois techniques et politiques, **le dernier chapitre** présente les évolutions possibles pour nos différents vecteurs énergétiques. D'abord, les perspectives d'évolution pour les technologies de batteries indispensables au vecteur électrique, puis une synthèse des principales études prospectives récentes parues dans la littérature, en France et en Europe : Un résumé est alors donné concernant les rapports du projet européen SSelecTRA 2015, ainsi que les rapports Cap 2040 du gouvernement français et Vision 2030 – 2050 de l'Ademe.

Nous espérons que cette lecture vous apportera tous les éléments nécessaires à votre compréhension du monde des nouvelles technologies bas-carbone pour la mobilité. Les informations apportées sont non exhaustives et le milieu de la mobilité en France et en Europe évolue très vite. Nous invitons le lecteur à poursuivre sa lecture grâce aux références qu'il trouvera à la fin de chaque chapitre, et à se tenir informé des actualités, s'il souhaite approfondir le sujet.

Chapitre 1 : Un état des lieux de la mobilité

Les objectifs en termes de mobilité durable

Tristan DELIZY et Lucas DESPORT

Chapitre 1 : Un état des lieux de la mobilité	19
1. La mobilité.....	20
2. Les usages de la mobilité.....	21
2.1. La mobilité au service du transport des personnes	21
2.1.1.Le transport de voyageurs en France	21
2.1.2.L'usage de la mobilité par les Français	21
2.2. La mobilité au service des activités commerciales	24
2.2.1.Le transport de marchandises en France	24
2.3. La consommation énergétique.....	25
2.3.1.Les transports au niveau mondial	26
2.3.2.Les transports au niveau national	30
2.4. Les émissions de GES.....	35
2.4.1.Échelle mondiale	35
2.4.2.Échelle française	36
3. Les objectifs de réduction	39
3.1. À l'échelle mondiale.....	39
3.1.1.Protocole de Kyoto	39
3.1.2.Accord de Paris	41
3.2. À l'échelle européenne	41
3.3. À l'échelle française	44
3.3.1.La LTECV	44
3.3.2.La PPE	46
3.3.3.La SNBC	48
3.3.4.La Loi Mobilités	49
4. Bibliographie	51

Depuis toujours l'Homme a manifesté de grands besoins en matière de mobilité. Que ce soit pour le commerce de marchandises ou pour le transport de personnes, les solutions de mobilités existent depuis le début des grandes civilisations humaines. Ces besoins sont aujourd'hui de plus en plus grands, et les solutions de plus en plus nombreuses et spécifiques. Dans cette première partie nous tenterons de donner la vision avec laquelle ce livre aborde la question de la mobilité, en la situant dans divers contextes aussi bien en matière d'usage qu'en matière économique, énergétique et environnementale.

1. LA MOBILITE

Pourquoi l'Homme a-t-il besoin de se déplacer ? Répondre à cette question permet de comprendre quelles sont les motivations de l'Homme moderne en quête de mobilité. Tous les jours, l'Homme quitte son domicile pour se rendre ailleurs. Ce besoin de déplacement est différenciable selon de nombreux critères comme l'âge ou la catégorie socio-professionnelle par exemple. Les raisons pour lesquelles l'Homme se déplace sont diverses : travailler/étudier, se nourrir, pratiquer un loisir/se détendre, se soigner, faire des démarches administratives. Outre la mobilité des personnes, on distingue également un autre type de mobilité qui est le transport de marchandises. Cette mobilité a permis et permet encore aujourd'hui d'assurer les échanges de biens entre les individus afin de répondre aux besoins matériels et vitaux de l'homme et ce, à très grande échelle.

On remarque ici que le mot mobilité fait référence à deux usages différents. Proposer une seule définition de la mobilité semble donc être une tâche complexe. Et l'analyse de la littérature sur ce sujet le montre effectivement : il existe autant de définitions du mot « mobilité », qu'il existe de domaines de compétences scientifiques - notamment dans les sciences sociales, en géographie et en urbanisme - où les concepts de mobilité sont, et ont été, très largement abordés (Bonnerandi, 2004). Le mot « mobilité » semble donc bel et bien souffrir d'une polysémie dont il va être difficile de s'extraire.

En matière d'usage de la mobilité, ce livre en distinguera deux types : le transport de personnes et le transport de marchandises. Ces deux fonctions font appel à des moyens de transport et des infrastructures variés que nous avons choisi d'aborder sous différents angles. L'objectif est d'identifier les solutions pouvant transformer le système énergétique actuel de la mobilité en un système qui soit durable et décarboné. A noter que ces solutions ne seront pas exclusivement techniques, c'est pourquoi ce livre aborde également les politiques menées par l'UE et la France en faveur d'une mobilité propre et durable. Il évoque aussi les nouvelles pratiques dans le paysage de la mobilité comme l'intermodalité ou le report modal, qui sont apparues avec la multiplication des solutions de transport ainsi que la pénétration des GAFAM¹ fortement pilotée par la révolution du numérique.

¹ Google Amazon Facebook Apple.

2. LES USAGES DE LA MOBILITE

On peut distinguer deux principaux usages de la mobilité : le transport de voyageurs et le transport de marchandises. Ces deux usages sont tous deux des secteurs économiques importants de l'économie française. L'activité du transport de personnes peut se définir comme tout service qui vise à transporter, selon divers moyens, des voyageurs ou des groupes de voyageurs d'un point de départ à un point d'arrivée. Cette activité s'effectue la plupart du temps en B2C². Le transport de marchandise, aussi appelé fret, peut se définir quant à lui, comme tous services permettant de transporter une quantité de marchandises d'un point de chargement à un point de livraison. De par sa nature, cette activité est le plus souvent réalisée en B2B³.

2.1. La mobilité au service du transport des personnes

Nous présentons ici des chiffres pour le périmètre de la France métropolitaine.

2.1.1. Le transport de voyageurs en France

Le transport intérieur de voyageurs en France est un secteur économique important puisqu'il représente à lui seul 2,4 % du PIB français en 2016. Cela comprend les activités liées au transport en soi mais aussi les activités de services auxiliaires nécessaires à leur fonctionnement. Ce secteur connaît une croissance soutenue depuis 2001 avec une production s'élevant à 32,8 milliards d'euros, puis 47,0 milliards d'euros en 2011 et finalement 52,0 milliards d'euros en 2016. Cette tendance haussière s'explique par l'augmentation de la demande sur le territoire français qui est notamment corrélée à la croissance démographique et à la hausse du niveau de vie des Français. Le volume annuel de transport s'exprime en voyageur.km ce qui permet de prendre en compte la quantité de personnes transportées ainsi que la distance du trajet. On observe une hausse continue du volume de transport intérieur de voyageurs avec 875,3 milliards de voyageur.km en 2001, puis 900,5 milliards de voyageur.km en 2011 et finalement 956,4 milliards en 2016. Les retombées sur l'emploi sont colossales, puisque ce secteur revendiquait 475 000 emplois directs en 2016 (18 000 créations de postes depuis 2001) (Moreau, 2018).

2.1.2. L'usage de la mobilité par les Français

Cette section a pour objectif de dresser un portrait de l'usage fait de la mobilité par la population française. On distingue ainsi deux types de mobilités subjacentes qui peuvent être qualifiées de « mobilité locale » en ce qui concerne les déplacements quotidiens, et de « mobilité longue distance » pour les déplacements réalisés dans un rayon supérieur à 80 km autour du domicile. La mobilité locale représente 98,7 % des motifs de déplacements, mais ne représente

² Business to Consumer : concerne les activités entre une entreprise et des consommateurs.

³ Business to Business : concerne les activités entre deux entreprises.

que 59,6 % en voyageurs.km (Quételard, 2010). Ceci s'explique logiquement par les grandes distances parcourues lors des déplacements longues distances. Dans un premier temps nous nous intéresserons à la mobilité locale pour ensuite se pencher sur la mobilité longue distance. Afin de dresser un tableau pertinent de l'usage de la mobilité nous proposons de présenter pour chacune des deux mobilités les motifs évoqués, les moyens de transports utilisés, la distance parcourue et le temps de transport. Les résultats qui suivent sont issus des deux enquêtes nationales sur la mobilité des personnes (1994 et 2008), réalisées par le Ministère de la Transition écologique et solidaire et son Service de l'Observation et des Statistiques. Cela nous permettra de dégager une tendance sur l'évolution des usages entre 1994 et 2008. Malheureusement la prochaine étude est prévue pour le premier trimestre 2020, nous ne pouvons donc pas proposer dans ce livre un regard sur l'évolution entre 2008 et 2020. Nous verrons que les tendances qui se dégagent ne sont que peu marquées, néanmoins, elles méritent d'être vérifiées et corrélées avec la prochaine étude à paraître en 2020.

- La mobilité locale

Les chiffres suivants issus de (Quételard, 2010) sont applicables à tous les jours ouvrés qui ne sont pas des jours de vacances ou des jours fériés. En 2008 et 1994, les Français évoquaient en moyenne 1,9 motif/jour différents justifiant d'être en dehors de leur domicile. Les principaux motifs pour ces déplacements n'ont que très peu évolué : travailler et faire ses courses sont toujours les deux motifs principaux de la mobilité locale (46 % en 2008 et 45 % en 1994, en cumulé). À noter tout de même la tendance haussière du motif d'accompagnement d'une personne et des soins/démarches, ainsi que la tendance baissière des motifs d'activités de loisirs, de visite et d'études. Le graphique ci-dessous présente la comparaison des motifs évoqués entre 1994 et 2008 :

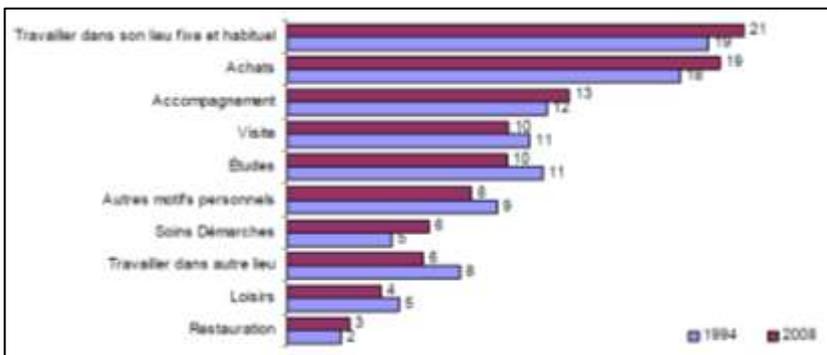


Figure 1 : Motif de déplacement des individus(Quételard, 2010, p. 32).

Ces déplacements sont réalisés au sein du territoire via un certain de nombre de moyens de transport. En 2008, les Français réalisaient en moyenne 3,15 déplacements par jour. Sans surprise, c'est la voiture qui est le moyen le plus utilisé dans le dans le cadre de cette mobilité locale (65 % des déplacements), devant la marche à pied (22 %) et l'utilisation des transports en commun (8 %).

Le reste étant alloué aux vélos (3 %) et aux deux roues motorisées (2 %). Entre 1994 et 2008 la réparation des moyens de transport est restée identique. Point important, en divisant le nombre de déplacements réalisés en voiture par le nombre de déplacements réalisés en tant que conducteur, on obtient un taux d'occupation des voitures qui s'élève à 1,22 personnes/voiture. Tandis que les voitures des particuliers sont en moyenne des voitures équipées de 5 places.

En ce qui concerne les distances quotidiennement parcourues par les Français, on observe une moyenne de 25,2 km par jour en 2008. On peut également observer sans surprise que le choix du moyen de transport est largement piloté par la distance à parcourir. C'est pourquoi la voiture représente 83 % des km quotidiens parcourus, devant les transports en commun 11 %, et tous les autres moyens de transport (6 %) étant utilisés pour des distances inférieures à 1 km. Cette moyenne de 25,2 km, est parcourue à la vitesse moyenne de 27 km/h, ce qui implique qu'en moyenne les Français consacraient 56 minutes par jour à leur déplacement en 2008 (Quételard, 2010).

Remarques : L'ensemble des chiffres cités sont des moyennes nationales. Localement ces chiffres peuvent varier du simple au double, en fonction du type de zonage urbain (métropole, zone rurale, banlieue, etc.). De la littérature concernant le détail de ces chiffres par type de zone urbaine est disponible dans le document (Quételard, 2010) cité dans la bibliographie.

- Mobilité longue distance

La mobilité longue distance concerne les déplacements qui se font dans un rayon supérieur à 80 km autour du domicile. Ce déplacement est donc un aller-retour qui peut être fait dans la journée ou sur plusieurs jours entre le domicile et un autre lieu. Ici la littérature distingue deux motifs pour la mobilité longue distances : personnel ou professionnel (Grimal, 2010) .

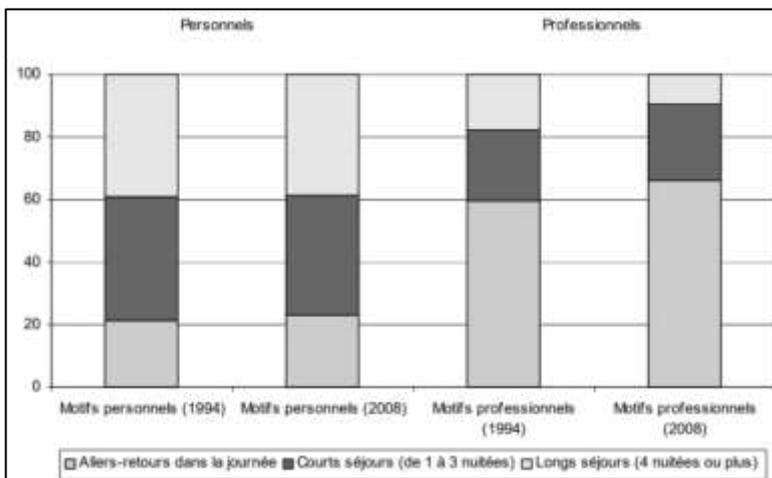


Figure 2 : Motifs de déplacement des individus (Grimal, 2010, p. 126).

Entre 1994 et 2008, la proportion de ces motifs n'a presque pas évolué, puisque seuls les déplacements supérieurs à 4 jours pour des raisons professionnelles ont diminué. Ces proportions sont basées sur des volumes de voyage qui eux ont augmenté entre les deux années étudiées. En effet, alors qu'en 1994 les Français réalisaient un total de 293,2 millions de voyages (tous motifs confondus), en 2008 ils réalisaient 358,8 millions de voyages, soit une augmentation annuelle de 1,4 %/an. Les distances cumulées parcourues par an ont elles aussi évolué de manière croissante, puisqu'en 1994 elles s'élevaient à 5232 km/personne/an pour atteindre 6020 km/personne/an en 2008 (croissance de 1 %/an) (Grimal, 2010). Les Français, dans le cadre de leur mobilité longue distance, ont donc tendance à se déplacer toujours plus et toujours plus loin.

La répartition de l'utilisation des moyens de transports révèle aussi que la voiture est massivement utilisée, puisque 3/4 des déplacements y ont recours aussi bien en 1994 qu'en 2008. En revanche, son utilisation ne représente que la moitié des voyageurs.km, ce qui montre que pour les grandes distances la population préférera se reporter sur des moyens plus rapides tels que le train ou l'avion ; comme le montrent les graphiques ci-dessous :

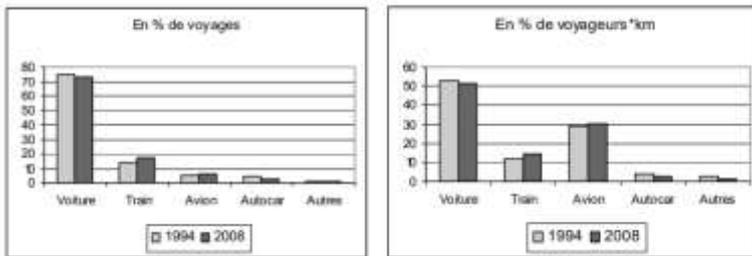


Figure 3 : Répartition de l'utilisation des modes de transport
(Grimal, 2010, p. 128).

Les évolutions observables sont minimales, mais on peut tout de même mettre en avant la légère diminution de l'utilisation de la voiture ainsi qu'une augmentation non négligeable de l'utilisation de l'avion. L'avion est donc de plus en plus utilisé, mais pour autant, la quantité de voyageur.km associée n'augmente pas dans la même proportion. Cela révèle une modification de l'usage de l'avion, qui est maintenant de plus en plus utilisé pour des voyages de distances moyennes au sein même du territoire métropolitain.

2.2. La mobilité au service des activités commerciales

Tout comme dans la partie précédente, nous présentons ici des chiffres pour le périmètre de la France métropolitaine.

2.2.1. Le transport de marchandises en France

On peut différencier deux échelles de transport de marchandises : l'échelle intérieure, propre aux transports de marchandises à l'intérieur d'un pays (hors exportation) et l'échelle internationale, propre aux échanges commerciaux entre

différents pays mettant en jeu des distances et des volumes de marchandises importants. Sur ces deux échelles les ordres de grandeur à retenir sont les suivants : le transport international de marchandises en tonnage est assuré à 80 % par voie maritime (10,5 milliards de tonne en 2016) et le transport routier domine à 88 % la quantité transportée en 2016 en France. (TLF, n.d.).

D'un point de vue économique, le transport de marchandises sur le territoire français représente 339 milliards de tonnes.km en 2016 (Moreau, 2018) et est très largement réalisé par les modes de transports terrestres que sont le transport routier (85,0 %), ferroviaire (9,6 %) et les oléoducs (3,4 %). Le transport fluvial assure quant à lui le transport de 2 % du volume total transporté en 2016, majoritairement sur les fleuves de la Seine, du Rhin et du Rhône. En ce qui concerne les voies maritimes et aériennes, leurs parts respectives sont négligeables puisqu'elles ne sont utilisées que pour l'acheminement de marchandises vers les DOM-TOM Français. Elles ne représentent donc qu'un volume de 0,345 million de tonnes. Ce secteur économique affichait un nombre de 643 000 emplois directs (transports et services auxiliaires) en 2016 et a ainsi permis la création de 60 000 emplois depuis 2001. L'activité de poste et de courrier employait 235 000 personnes en 2016, contre 324 000 en 2001. Cette baisse de près d'un tiers des emplois en 15 ans s'explique par la transformation digitale rapide.

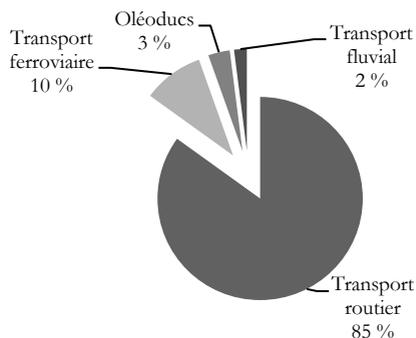


Figure 4 : Répartition de l'utilisation des modes de transports (TLF, n.d.).

Les activités commerciales ont de grands besoins en matière de mobilité, notamment pour l'acheminement de matière première et la distribution des produits transformés au plus près de leur utilisation finale. Le choix d'utilisation d'un mode de transport est piloté par différents facteurs : type de marchandise, délai, distance, quantité, etc. Quoiqu'il en soit, les acteurs économiques cherchent à satisfaire une demande/un besoin, à un coût minimal de livraison.

2.3. La consommation énergétique

On s'intéresse dans cette partie au bilan énergétique de la mobilité et des transports aux niveaux mondial et français. Les graphiques présentés ci-après sont issus des données de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) collectées

de 1971 à 2016 (AIE, 2018). Elles recensent toutes les consommations liées aux diverses activités humaines pour 48 pays du monde. A travers ces données, nous proposons au lecteur un panorama de l'activité énergétique. Cette étude se fait également en entonnoir : on s'intéresse à la mobilité selon différentes échelles humaines (mondiale, européenne et nationale) et différents secteurs d'activité en termes de consommations d'énergies primaires. Les camemberts présentés donnent selon leur échelle géographique respective, la mesure observée en 2016 car ce sont les données les plus récentes dont dispose l'AIE.

2.3.1. Les transports au niveau mondial

La consommation énergétique mondiale est principalement et traditionnellement couverte par les énergies fossiles et en particulier par les produits pétroliers qui dominent à 41 % la consommation finale d'énergie mondiale.

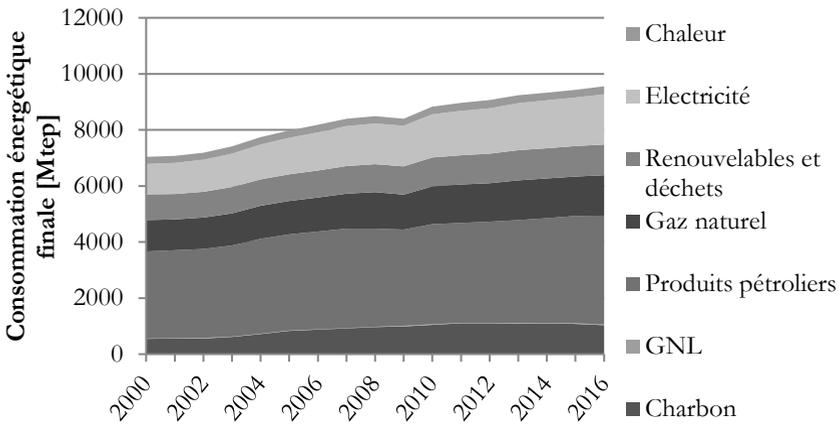


Figure 5 : Évolution de la consommation énergétique finale mondiale selon les vecteurs énergétiques [Source : AIE].

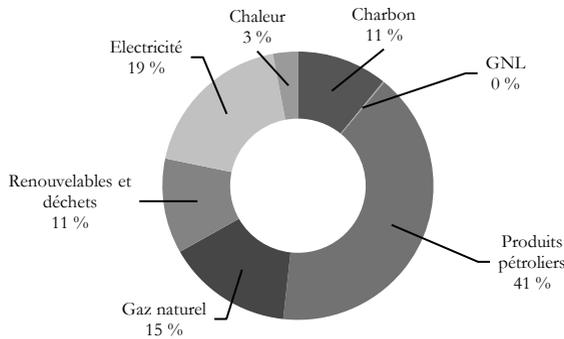


Figure 6 : Répartition de la consommation énergétique finale mondiale de 2016 selon les vecteurs énergétiques [Source : AIE].

La consommation énergétique mondiale est en constante augmentation depuis le début des mesures de l'AIE. Depuis l'an 2000, elle a augmenté de 36 % pour atteindre 9555 Mtep en 2016.

Le secteur économique des transports conserve une part relativement constante de 29 % ce qui fait de lui le secteur le plus énergivore avec l'industrie. C'est donc un levier important dans la réduction des consommations notamment via l'amélioration des performances énergétiques des moyens de transport.

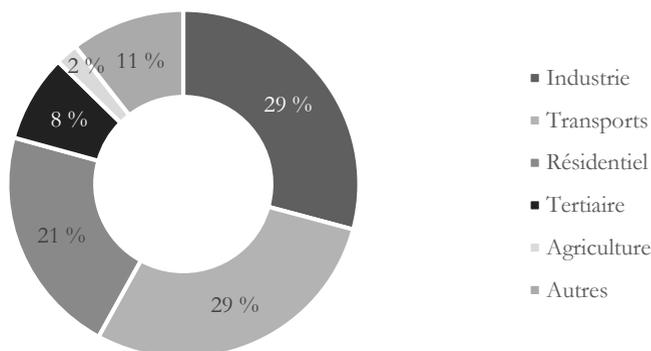


Figure 7 : Répartition de la consommation énergétique mondiale de 2016 des différents secteurs économiques [Source : AIE].

Selon l'AIE, les chiffres de la catégorie Industrie représentent l'énergie totale consommée dans ce secteur qui regroupe :

- Les industries sidérurgique et métallurgique
- Les industries chimique et pétrochimique
- L'industrie minière
- L'industrie agroalimentaire
- L'industrie du tabac
- L'industrie papetière
- L'industrie du bois
- La construction
- L'industrie textile
- L'industrie des équipements de transport

Le détail de ces informations n'est pas accessible dans la banque de données mise à disposition par l'AIE. Il est à noter que l'industrie liée à l'équipement des transports n'est pas décomptée dans le secteur des transports mais dans celui de l'industrie.

La consommation énergétique des transports couvre toutes les formes de transports prévues dans les divisions 49 à 51 de la Classification Industrielle

Standard Internationale (CISI) (Vereinte Nationen, 2008). Elle regroupe donc les consommations liées au transport de passager et le fret.

Le premier inclut :

- Le transport routier de longue distance, urbain et périurbain (véhicules automobiles, motocyclette et bus)
- Le transport ferroviaire de longue distance (trains de passagers), urbain et périurbain (tramway, trolleys, funiculaires, et trains souterrains et élevés)
- Le transport aérien (téléphériques, avion de longs et courts courriers)
- Le transport maritime (ferries, bateaux d'excursion et de croisière côtiers et fluviaux)

Le second inclut :

- Le transport routier (véhicules lourds)
- Le transport ferroviaire de longue distance (trains de marchandises)
- Le transport par pipeline
- Le transport aérien
- Le transport fluvial (ferries, paquebots)
- Le transport de marchandises de stockage

Le secteur tertiaire inclut toutes les activités de commerce et de service public décrits par les divisions 33, 36-39, 45-47, 52, 53, 55-56, 58-66, 68-75, 77-82, 84, 85-88, 90-96 et 99.

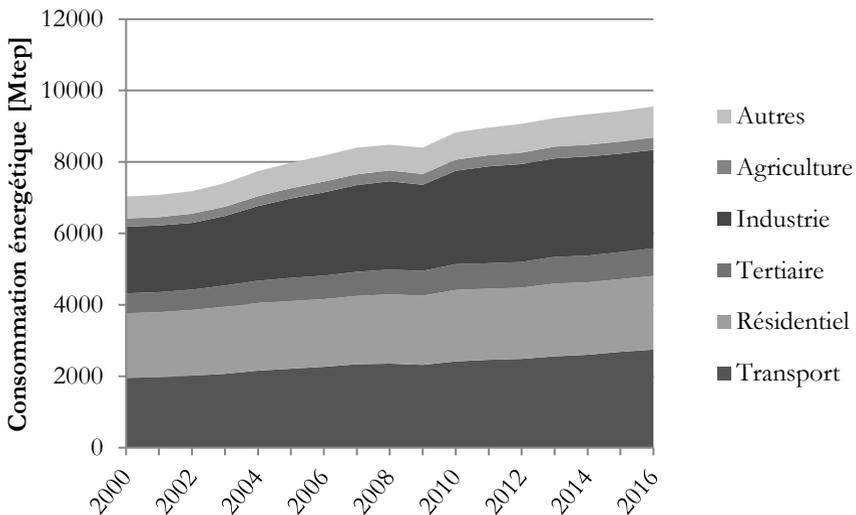


Figure 8 : Evolution de la consommation énergétique mondiale des secteurs économiques depuis 2000 [Source : AIE].

Dans le secteur des transports, les pays les plus développés sont évidemment les plus consommateurs. En 2016, les pays de l'OCDE consomment à eux seuls 47 % de l'énergie totale consommée dans les transports. Mais depuis la crise des *subprimes*, si la consommation globale augmente, la consommation des pays de l'OCDE tend à stagner en raison de l'amélioration des performances énergétiques des moyens de transport. Les pays de l'OCDE regroupent 16 % (2014) de la population mondiale mais génèrent 80 % du PIB. En parallèle, la Chine a multiplié sa consommation énergétique dans les transports par 3,5 entre 2000 et 2016.

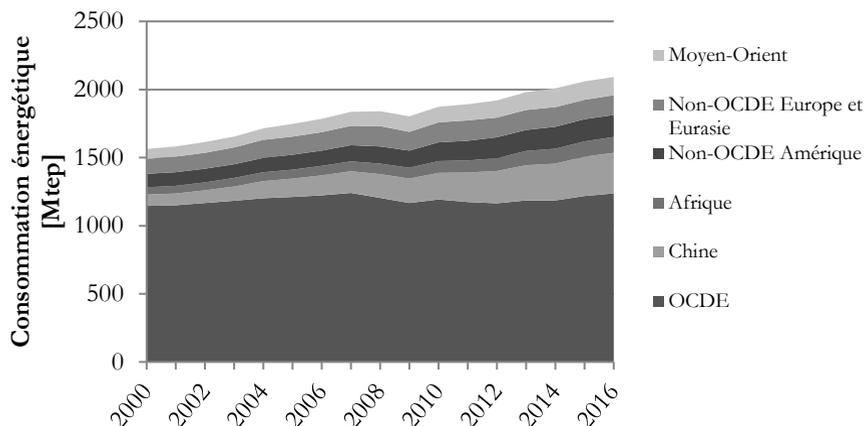


Figure 9 : Evolution de la consommation énergétique finale mondiale dans les transports [Source : AIE].

En 2016, la consommation énergétique mondiale dans les transports est dominée par les produits pétroliers à 92 %.

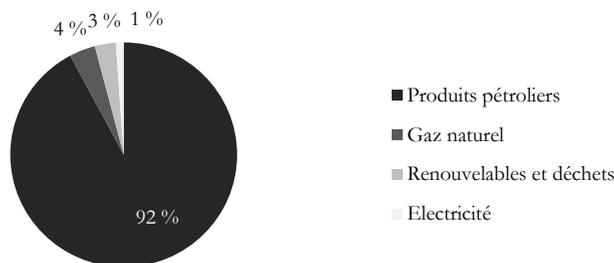


Figure 10 : Répartition de la consommation énergétique finale mondiale dans les transports en 2016 selon les vecteurs [Source : AIE].

La consommation énergétique mondiale des transports est à la hausse. De 2000 à 2016, elle connaît une augmentation de 40,3 %. Sur cette même période, le charbon a quasiment disparu de la consommation pour laisser place aux énergies

renouvelables et au gaz naturel. Bien qu'elle ait progressé de 65,2 %, l'électricité peine à se faire une place dans le mix énergétique et sa part reste négligeable.

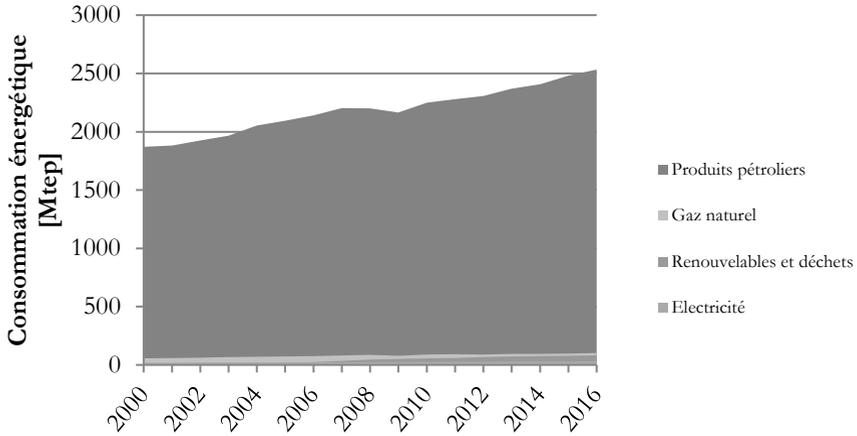


Figure 11 : Evolution de la consommation énergétique finale mondiale dans les transports selon les vecteurs [Source : AIE].

La répartition modale des transports dans le monde est décrite dans la figure suivante :

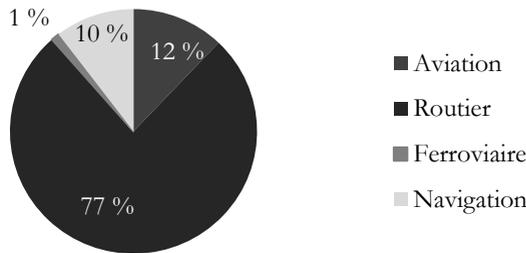


Figure 12 : Répartition de la consommation énergétique finale mondiale de produits pétroliers dans les transports en 2016.

2.3.2. Les transports au niveau national

La consommation d'énergie à l'échelle française représente 152 Mtep par an, tous secteurs d'activité confondus. C'est moins que l'Allemagne avec 224 Mtep/an mais plus que le Royaume-Uni avec 128 Mtep/an.

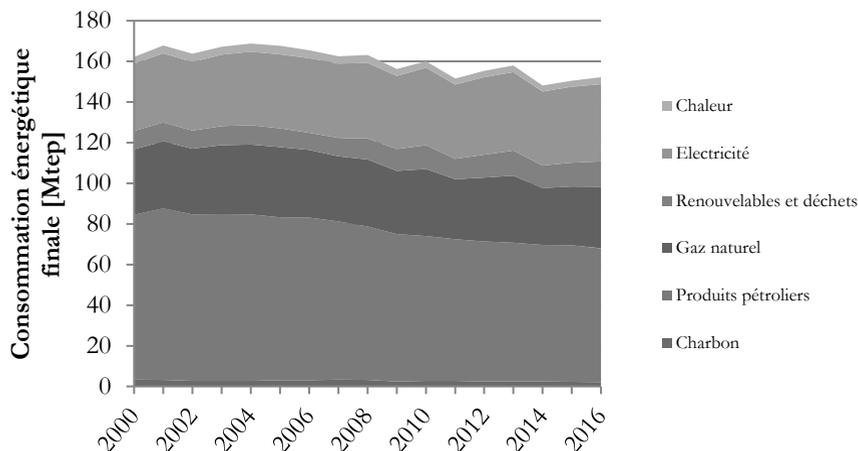


Figure 13 : Consommation énergétique finale de la France selon les vecteurs énergétiques [Source : AIE].

Depuis les années 2000, la tendance générale de la consommation énergétique finale de la France est à la baisse. Cette diminution s'évalue à 4 % entre 2000 et 2016 et s'explique notamment par les politiques de réduction des consommations et de performances énergétiques mises en place. Ainsi, à l'image de la consommation énergétique finale mondiale, la consommation française est dominée par l'utilisation des produits pétroliers à hauteur de 43 %.

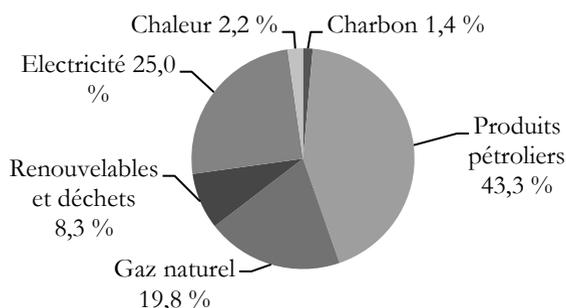


Figure 14 : Répartition de la consommation énergétique finale de la France en 2016 selon les vecteurs énergétiques [Source : AIE].

Le secteur des transports représente 29 % de la consommation énergétique finale de la France, c'est pourquoi c'est une activité sur laquelle il est important de s'attarder pour réduire nos consommations.

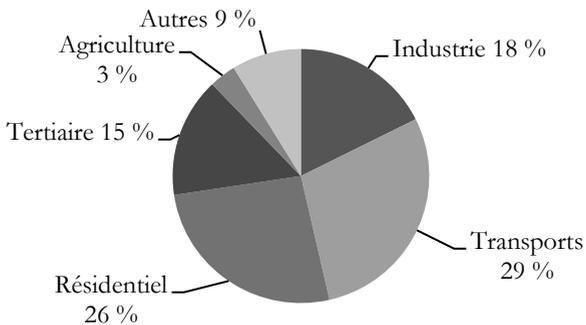


Figure 15 : Répartition de la consommation énergétique finale française en 2016 par secteurs d'activité [Source : AIE].

Dans la mobilité française, la consommation énergétique est bien évidemment centrée sur les produits pétroliers (qui rassemblent le diesel et l'essence) à hauteur de 91 %. Le transport routier et notamment l'usage des voitures individuelles thermiques sont largement dominants.

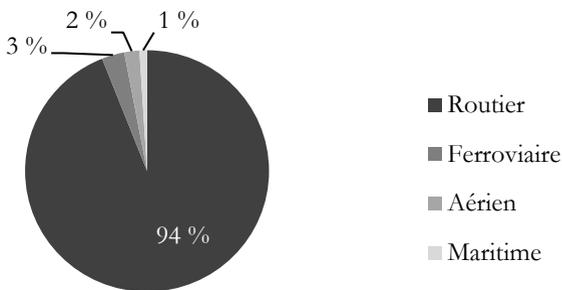


Figure 16 : Répartition de la consommation d'énergie finale française en 2016 par mode de transport [Source : AIE].

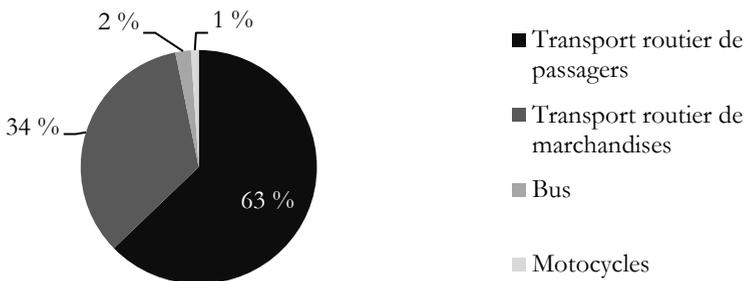


Figure 17 : Répartition de la consommation d'énergie finale française de 2016 par type de transport routier [Source : AIE].

Table des Matières

Sommaire	VIII
Préface	IX
Avant-propos	XI
Introduction	15
Chapitre 1 : Un état des lieux de la mobilité	19
1. La mobilité.....	20
2. Les usages de la mobilité.....	21
2.1. La mobilité au service du transport des personnes	21
2.1.1. Le transport de voyageurs en France	21
2.1.2. L'usage de la mobilité par les Français	21
2.2. La mobilité au service des activités commerciales	24
2.2.1. Le transport de marchandises en France	24
2.3. La consommation énergétique	25
2.3.1. Les transports au niveau mondial	26
2.3.2. Les transports au niveau national	31
2.4. Les émissions de GES	36
2.4.1. Échelle mondiale	36
2.4.2. Échelle française	37
3. Les objectifs de réduction.....	39
3.1. À l'échelle mondiale	39
3.1.1. Protocole de Kyoto	39
3.1.2. Accord de Paris	41
3.2. À l'échelle européenne	41
3.3. À l'échelle française	44
3.3.1. La LTECV	44
3.3.2. La PPE	46
3.3.3. La SNBC	48
3.3.4. La Loi Mobilités	49
4. Bibliographie.....	51

Chapitre 2 – Les leviers au service de ces objectifs	53
1 Nouvelles pratiques.....	55
1.1 L'engagement dans la mobilité durable	55
1.1.1 La société face à l'impact climatique du transport	56
1.1.2 Les comportements dans la mobilité et les barrières au changement	56
1.1.3 Quelles leçons pouvons-nous en tirer ?	58
1.2 Adaptation des transports aux besoins	59
1.3 La planification et la logistique urbaine	62
1.3.1 Coordination transport – urbanisme	62
1.3.2 La logistique urbaine	63
1.4 L'Eco-mobilité – clés du succès	64
1.4.1 Mobilité partagée	64
1.4.2 Mobilité non-motorisée	66
1.4.3 Eco-conduite	66
1.5 La digitalisation au service de la mobilité	68
1.6 Conclusion	69
2 Intermodalité et mobilité durable	71
2.1 Définitions	71
2.2 Intérêt de l'intermodalité	72
2.3 Les différents modes de transport	73
2.3.1 La voiture particulière	73
2.3.2 Les transports en commun	74
2.3.3 L'avion	74
2.3.4 Les modes actifs	74
2.3.5 Les nouveaux modes de transport	75
2.3.6 Mode ferroviaire, fluvial et maritime	75
2.4 Part d'utilisation des différents modes de transport	75
2.5 Emissions de GES par mode de transport	77
2.6 Efficacité énergétique	78
2.7 Repenser la mobilité de demain	79
2.8 Systèmes d'information multimodaux	79
2.9 Comparaison trajets intermodaux et trajet en voiture individuelle	81
2.10 Conclusion	83
3 Technologies et innovations hydrocarbures et moteurs thermiques	85
3.1 Moteur à combustion interne	86
3.2 Innovations véhicule	87
3.2.1 Réduction de la masse du véhicule	88
3.2.2 Amélioration de l'aérodynamisme	88

3.2.3	Réduction des frottements pneumatiques	89
3.3	Innovations moteur	90
3.3.1	Amélioration du rendement des moteurs à explosion	90
3.3.2	Techniques de dépollution des moteurs à explosion	93
3.3.3	Moteur à réaction	95
3.4	Conclusion	97
4	Bibliographie	97

Chapitre 3 : Les vecteurs énergétiques pour une mobilité décarbonée 109

1	Technologies et innovations	112
1.1	Vecteur gaz	113
1.1.1	Innovations moteurs	113
1.1.2	Nouveaux véhicules	116
1.2	Vecteur électrique	118
1.2.1	Véhicules sur routes	118
1.2.2	Transport par rail	126
1.2.3	Nouveaux moyens	127
1.3	Vecteur hydrogène	128
1.3.1	Pile à Combustible à hydrogène	128
1.3.2	Hydrogène et moteur à combustion interne	129
1.3.3	Nouveaux moyens	131
2	Réseaux et infrastructures	134
2.1	Impacts sur le système électrique	134
2.1.1	Le système électrique français	134
2.1.2	Les conséquences de l'intégration des véhicules électriques au réseau électrique	136
2.1.3	Les apports de flexibilité du véhicule électrique	140
2.1.4	Le raccordement des installations de recharge	142
2.1.5	Coût des bornes de recharge et temps de recharge estimatifs	147
2.1.6	Mise en place d'infrastructure de recharge de véhicules électriques	148
2.2	Gaz carburant	151
2.2.1	Le réseau de gaz français	151
2.2.2	L'infrastructure Gaz carburant	154
2.2.3	Synthèse	168
2.3	L'infrastructure hydrogène actuelle	169
2.3.1	Réseau de transport dédié à l'hydrogène carburant	169
2.3.2	Stations de recharge d'hydrogène carburant	171
2.3.3	Description des infrastructures dédiées	172
2.3.4	Acteurs concernés	173
2.4	Biocarburants	174

2.4.1	L'infrastructure biocarburants actuelle	174
2.4.2	Perspective de développement de l'infrastructure accueillant des biocarburants	175
2.5	Conclusion générale	175
3	Contraintes technologiques pour le stockage	177
3.1	Batteries électrochimiques	177
3.1.1	Présentation générale d'une batterie électrochimique	177
3.1.2	Composition d'une batterie électrochimique	177
3.1.3	Fonctionnement d'une batterie électrochimique	178
3.1.4	Batterie au Plomb	179
3.1.5	Batteries alcalines : Nickel-Cadmium et autres métaux	181
3.1.6	Batterie Lithium-Ion	183
3.1.7	Lithium Solide	187
3.1.8	Perspectives long terme des batteries : Air Métal et Lithium Soufre	188
3.2	Super condensateur	190
3.3	Stockage de l'hydrogène et Pile à combustible	191
3.3.1	Le stockage de l'hydrogène	191
3.3.2	La pile à combustible	192
3.4	Stockage inertiel (volant d'inertie)	195
3.5	GNV et BioGNV	198
4	Analyse environnementale sur le cycle de vie	200
4.1	Introduction : qu'est-ce qu'une analyse de cycle de vie ?	200
4.1.1	Les différents impacts étudiés	200
4.1.2	L'importance des hypothèses de départ	202
4.1.3	La comparaison des analyses difficile voire impossible	203
4.2	Électricité, hydrogène et gaz naturel	204
4.2.1	Potentiel de réchauffement climatique	204
4.2.2	Étude des autres impacts environnementaux	208
4.2.3	Déplétion des métaux : le cas du lithium	210
4.2.4	Déplétion des métaux : Le cas du cobalt et du nickel	211
4.2.5	Le recyclage des batteries et des piles à combustible	211
4.3	BioGaz et biocarburants	212
4.3.1	Contexte et objectifs	212
4.3.2	Mise en garde	212
4.3.3	Les filières alternatives étudiées	215
4.3.4	Présentation et analyse des résultats	216
4.3.5	Les limites des carburants à base de cultures bioénergétique	218
4.4	Conclusion	220
5	Analyse de cycle de vie de la consommation énergétique.....	222
5.1	Le gaz	222

5.1.1	Production et transport	222
5.1.2	Résultats de consommation	223
5.2	Les véhicules électriques	225
5.2.1	Production et transport	225
5.2.2	Résultats	226
5.3	Hydrogène	227
5.3.1	Production et transport	228
5.3.2	Résultats de consommation	229
5.4	Résumé	231
5.5	Conclusion	233
6	Bibliographie	237
Chapitre 4 : Politiques et conduite du changement		255
1.	Importance des politiques pour une mobilité plus durable	257
2.	Orientations générales pour une mobilité décarbonée	258
2.1.	Les directives de l'Europe	258
2.1.1.	Normes européennes pour la qualité de l'air	258
2.1.2.	Informations GES des prestations de transport	260
2.1.3.	Étiquetage des voitures	260
2.1.4.	Normes Euro pour les voitures et véhicules lourds	261
2.1.5.	Norme Euro pour les engins mobiles non routiers	264
2.1.6.	Objectifs de réduction des émissions de CO ₂ pour les voitures et les camionnettes	264
2.1.7.	Réduction des émissions de CO ₂ des véhicules utilitaires lourds	267
2.1.8.	Qualité des carburants	267
2.1.9.	Clean Power for Transport Package	268
2.1.10.	Projets pour réduire les émissions du transport aérien	269
2.1.11.	Projets pour réduire les émissions du secteur maritime	271
2.1.12.	La mobilité urbaine et publique	272
2.1.13.	Mobilisation de fonds	273
2.1.14.	Résumé	273
2.1.15.	Conclusion	275
2.2.	La législation française et les dispositifs existants	275
2.2.1.	LTECV (Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte)	275
2.2.2.	Zones Basses Emissions et Crit'air	277
2.2.3.	Plan vélo	279
2.2.4.	Mobilités partagées	280
2.2.5.	Péages urbains	280
2.2.6.	Bonus malus	281
2.2.7.	Exonération carte grise pour véhicules propres : quelle législation ?	284

2.2.8.	La Composante Climat Energie, ou taxe carbone	284
2.2.9.	Rattrapage fiscalité diesel par rapport à l'essence	286
2.2.10.	Abaissement de la vitesse maximale autorisée	287
3.	Outils de promotion des différents vecteurs énergétiques	287
3.1.	Les biocarburants	287
3.1.1.	Historique des directives européennes sur les biocarburants	287
3.1.2.	La TGAP sur les biocarburants	290
3.1.3.	Nouveaux objectifs d'intégration de biocarburants avancés	291
3.1.4.	Homologation des boîtiers Superéthanol-E85	291
3.1.5.	Conclusion	291
3.2.	Les mobilités électriques	292
3.2.1.	Mesures d'incitations	292
3.2.2.	Financement des bornes de recharge	294
3.2.3.	Politiques étrangères	297
3.3.	Mobilité hydrogène	299
3.3.1.	État des lieux	299
3.3.2.	Le rôle des territoires et financement de projets	302
3.3.3.	Conclusion	305
3.4.	GNV/bioGNV	306
3.4.1.	Contexte	306
3.4.2.	Les dispositifs incitatifs pour les véhicules terrestres en France et en Europe	306
3.4.3.	Les dispositifs incitatifs pour le transport fluvial et maritime en France et en Europe	311
4.	Conclusion.....	312
5.	Bibliographie	313

Chapitre 5 : Vision prospective **323**

1.	Evolution des technologies.....	324
1.1.	Evolution des batteries	324
1.2.	Evolution de la pile à combustible	326
2.	Scénario de déploiement des mobilités décarbonées.....	326
2.1.	Étude prospective du rapport SCElecTRA 2015	327
2.2.	Le Rapport Cap 2040 présenté au parlement en mars 2019	333
3.	L'exercice de prospective de l'ADEME « Vision 2030-2050 »	336
3.1.	Les hypothèses utilisées	336
3.2.	Conditions de réalisation	342
3.3.	Résultats	342
3.4.	Conclusion de l'étude ADEME	345

<i>Table des matières</i>	359
4. Synthèse	345
4.1. Synthèse des prévisions sur les technologies	345
4.2. Synthèse des exercices de prospective	346
5. Bibliographie	350
Table des matières	353

La mobilité est au cœur des débats sur la transition énergétique. Premier émetteur de gaz à effet de serre, premier poste de dépense des ménages en France, le secteur du transport doit être repensé pour mieux faire face aux problématiques environnementales. La loi d'orientation des mobilités fraîchement promulguée prône les modes de déplacement doux pour les transports du quotidien. Néanmoins, la mobilité englobe aussi le transport longue distance de personnes et de marchandises. Dans ce contexte, les enjeux se recentrent alors sur les technologies à notre disposition pour décarboner ces moyens de transport.

Dans cet ouvrage collectif proposé par les élèves du Mastère Spécialisé OSE, les vecteurs énergétiques les plus avancés pour envisager une mobilité des biens et des personnes la plus décarbonée possible sont comparés. Electricité, biogaz, biocarburants, hydrogène sont autant de vecteurs pouvant participer à la réduction de l'impact environnemental du secteur. Néanmoins, en fonction des objectifs variés des pays, les leviers proposés comme les nouvelles pratiques ou l'intermodalité ne suffisent pas pour répondre à la demande toujours croissante de mobilité. Les innovations technologiques au niveau des hydrocarbures, mais aussi des moteurs thermiques, viennent élargir la palette des solutions envisageables.

Quel que soit le vecteur énergétique, une attention particulière doit être portée à son usage en traitant l'ensemble de la chaîne permettant sa mise à disposition. Une analyse de cycle de vie semble donc pertinente pour tenter de comparer ces différents vecteurs. Ils pourront ainsi être évalués en tenant compte de toutes les infrastructures nécessaires à leur développement du berceau à la tombe. Une projection sur le long terme intégrant différents scénarios de déploiement vient compléter l'ouvrage par une analyse des exercices de prospective dédiés à la mobilité ayant eu lieu ces derniers années.

Vous trouverez dans ce livre un état des lieux et des pistes de réflexion argumentées sur tous les éléments à envisager pour l'aboutissement d'une mobilité globale décarbonée.



Les auteurs à Taiwan



Chaire Modélisation prospective
au service du développement durable



OPTIMISATION DES SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES