

École polytechnique de Louvain

Étude de la durabilité de la voiture autonome

Auteurs : **Benoît GOMBAULT, Raphaël ZANELATO**

Promoteur : **Jean-Pierre RASKIN**

Lecteurs : **Damien DEROANNE, Hervé JEANMART, Sidina WANE**

Année académique 2018–2019

Master [120] : ingénieur civil électricien

Master [120] : ingénieur civil électromécanicien

Remerciements

Tous nos remerciements...

À ceux qui ont, pendant toute cette année, suivi notre travail avec efficacité, bienveillance sans oublier leurs conseils judicieux.

D'abord, permettez-nous de commencer par celui qui est à l'initiative de notre projet par son enthousiasme et ses encouragements. Il a contribué à nous investir au maximum et à ne jamais baisser les bras. Merci, Monsieur Jean-Pierre Raskin, pour votre confiance indéfectible, votre soutien et vos nombreuses idées.

Ensuite, nous tenons à remercier Messieurs Sidina Wane et Philippe Descamps. Grâce à vous et à notre promoteur, nous avons eu la chance de visiter l'ESIGELEC à Rouen et leurs installations. Ce fut pour nous l'occasion d'avoir un aperçu concret de la voiture autonome et une expérience riche en rencontres.

Nous ne manquerons pas de remercier Messieurs Sidina Wane, Damien Deroanne, Éric Pirard, Bart Van Dorpe, Jean-François Gaillet, Thomas Pardoën, Damien Ernst et Madame Aude Simar du temps qu'ils nous ont octroyé en partageant leurs connaissances pour nous aider dans notre étude.

Ajoutons encore des remerciements pour les assistants Maïté Croonenborghs et Karim Ismaïl pour leur temps et leur expertise en ce qui concerne la sélection des matériaux et leur aide précieuse pour l'utilisation du logiciel *CES Edupack*.

Nous sommes aussi reconnaissants à la *Maison du Développement Durable* de Louvain-la-Neuve pour nous avoir si aimablement ouvert leurs portes pour notre débat. Nous en profitons pour remercier Messieurs Hervé Jeanmart, David Bol, Nicolas Moreau et Alain Strowel d'avoir participé à ce débat et sans qui nous n'aurions pas pu pousser nos réflexions aussi loin.

Enfin, merci à nos familles, à nos amis et à tous ceux qui nous ont soutenus par leurs encouragements sans relâche et qui ont cru en nous jusqu'au bout.

Résumé

De nos jours, les changements climatiques sont au coeur des préoccupations mondiales. Leurs répercussions sur l'économie ainsi que leurs effets néfastes sur les écosystèmes naturels concernent la planète entière. Dans cette optique, il importe de privilégier les éco-innovations, c'est-à-dire les technologies industrielles qui intègrent les critères du développement durable.

De ce fait, l'arrivée des voitures autonomes pourrait réduire considérablement les émissions de carbone du secteur des transports, en permettant de fluidifier le trafic et en diminuant le nombre de véhicules sur les routes. De plus, elles permettraient d'améliorer significativement la sécurité routière. Cependant, bien que cette technologie présente de nombreux avantages, elle ne fait pas l'unanimité en matière d'impacts sur la durabilité et doit encore faire ses preuves en relevant différents défis. Ceux-ci concernent principalement la fiabilité du système autonome, le coût additionnel par rapport à une voiture actuelle, la multiplication des données générées par les capteurs et leur stockage, ainsi que les effets sur l'environnement.

Le résultat de notre étude qualitative a pour objectif d'évaluer la durabilité de la voiture autonome, en se concentrant sur un scénario de mobilité électrique et partagée.

Dans un premier temps, six enjeux sont développés : énergie, matériaux, environnement, législation, économie et société.

Dans un deuxième temps, sa durabilité est étudiée sous trois problématiques : les systèmes qui permettent l'autonomie (capteurs, communications, échanges de données), les matériaux utilisés (batterie, châssis) et l'impact énergétique (consommation de la voiture, impact sur le réseau et V2G).

Dans un troisième temps, les freins et les leviers sont résumés selon les trois piliers du développement durable : population, prospérité et planète.

Pour terminer, une réflexion nuance la durabilité de cette voiture afin d'aboutir à un certain nombre de recommandations.

Abstract

Nowadays, climate change is at the heart of our concerns. Its impact on the economy and its adverse effects on natural ecosystems affect all regions of the world. In this context, it is important to focus on eco-innovations, that is to say, industrial innovations that incorporate the criteria of sustainable development.

Let us consider autonomous cars for instance. Their emergence could significantly reduce the carbon emissions of the transport sector by making traffic more fluid and by reducing the number of vehicles on the roads. They could also improve road safety. However, while there are many benefits to this innovative technology, its efficiency in terms of sustainability impacts is not yet universally agreed upon. Besides, it still needs to prove itself by addressing different challenges. Such challenges mainly concern the reliability of the autonomous system, the additional cost compared to a regular car, the added data generated by the sensors and their storage, as well as the effects on the environment.

This research is a qualitative study which aims to evaluate the sustainability of the autonomous car. It is based on an electric and shared mobility scenario.

Firstly, six topics are developed : energy, materials, environment, legislation, economy and society.

Secondly, the sustainability is studied under three main concerns : the autonomous systems (sensors, communications, data exchanges), the materials used (battery, chassis) and the energy impact (consumption of car energy, impact on the grid and V2G).

Thirdly, the incentives and obstacles will be summarized according to the three pillars of sustainable development : population, prosperity and planet.

Finally, a reflection qualifies the durability of this car with the aim to come up with a number of recommendations.

Table des matières

Nomenclature	III
Introduction	1
1 Mise en contexte de la problématique	3
1.1 Définition de l’articulation	3
1.2 Analyse des intervenants	4
2 Recherche de faits	7
2.1 Énergie	7
2.2 Matériaux	8
2.3 Environnement	8
2.4 Société	9
2.5 Législation	10
2.6 Économie	11
2.7 Cas d’étude	13
3 Systèmes de communication et échanges de données	17
3.1 Description des technologies	17
3.2 Description des systèmes de communication	26
3.3 Perception de l’environnement	27
3.3.1 RADAR	28
3.3.2 LiDAR	28
3.3.3 Caméra	30
3.3.4 Capteur à ultrasons	31
3.3.5 En résumé	32
3.4 Échanges de données	34
3.5 Effets de la multiplication des communications	36
3.5.1 Effets sur l’environnement	36
3.5.2 Effets sur la santé	38
4 Matériaux et énergie	41
4.1 Passage à un parc 100 % électrique	41
4.1.1 Impacts sur la demande des métaux : comparaison entre un véhicule thermique et un véhicule électrique	41
4.1.2 Impacts sur la demande des matériaux critiques	43
4.1.3 Technologies de batteries	48
4.1.3.1 Technologies actuelles	48
4.1.3.2 Matériaux utilisés pour la batterie Li-ion	51
4.1.3.3 Recyclage de la batterie Li-ion	53
4.1.3.4 Technologies en cours de développement	55
4.1.4 Choix des matériaux pour la carrosserie	61

4.1.5	Impacts sur le réseau électrique	69
4.2	Passage à un parc électrique autonome	75
4.2.1	Adaptation de la structure portante de la voiture	75
4.2.2	Variations de la consommation d'énergie	81
4.2.2.1	Effets de la conduite autonome sur la consommation d'énergie	81
4.2.2.2	Influence du comportement des utilisateurs sur la consommation d'énergie	84
4.2.2.3	Tableau récapitulatif	84
4.2.3	Cas d'étude : évolution de la consommation d'une VE rendue autonome	86
5	Synthèse	91
	Réflexion et conclusion	95
	Bibliographie	99
	Liste des figures	117
	Liste des tableaux	119
	Annexe : Retranscription des interviews	121

Nomenclature

Abréviations

ADAS	Advanced Driver-Assistance Systems
AHSS	Advanced High Strength Steel
EDR	Enregistreur de données
GSC	Graphene Sand Composite
ICT	Information and Communication Technologies
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IoT	Internet of Things
LCA	Life-Cycle Assessment
LiDAR	Light Detection and Ranging
LRR	Long-Range RADAR
MaaS	Mobility as a Service
MCI	Moteur à Combustion Interne
MIMO	Multiple-Input and Multiple-Output
NCA	Nickel Cobalt Aluminium
NMC	Nickel Manganese Cobalt
PIB	Produit Intérieur Brut
RADAR	RAdio Detection And Ranging
RDC	République Démocratique du Congo
RSB	Rapport Signal à Bruit
SAE	Society of Automotive Engineers
SPAD	Single-Photon Avalanche Diode
SRR	Short-Range RADAR
THD	Total Harmonic Distortion
UBS	Union Bank of Switzerland
UE	Union européenne
V2G	Vehicle-to-Grid
V2I	Vehicle-to-Infrastructure
V2V	Vehicle-to-Vehicle
VA	Voiture Autonome
VAE	Voiture Autonome Électrique
VE	Voiture Électrique

Introduction

*"Le développement durable est un développement répondant aux besoins actuels sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs."*¹

À partir de cette définition, comment la voiture autonome utilisée en mobilité partagée pourrait-elle constituer une alternative *durable* à la mobilité d'aujourd'hui ?

Grâce aux nombreuses avancées technologiques de ces dernières années telles que les robots, l'intelligence artificielle et les ordinateurs à haute performance, la voiture autonome que nous imaginions dans les films et les livres est sur le point de devenir réalité. La principale motivation de son développement se trouve au niveau de la sécurité routière. L'erreur humaine est responsable d'environ 95 % des accidents de la route en Europe, et plus de 25 000 personnes y ont trouvé la mort en 2017². En effet, les véhicules sans conducteur peuvent considérablement réduire ces chiffres. Leurs technologies embarquées ont également le potentiel de diminuer les embouteillages, les émissions, les polluants atmosphériques, et de promouvoir la mobilité partagée, utilisée comme un service. La mobilité serait aussi plus accessible, en permettant à ceux qui ne sont pas en mesure de conduire de se déplacer plus facilement.

Dans les années à venir, le marché des véhicules autonomes devrait connaître une croissance exponentielle, créant de nouveaux emplois et générant des bénéfices pour les pays qui les adoptent.

Bien que cette avancée technologique semble prometteuse, un certain nombre de défis sont à prévoir. Ils concernent principalement la fiabilité du système autonome, le coût additionnel par rapport à une voiture actuelle, la multiplication des données générées par les capteurs et leur stockage, ainsi que leurs impacts sur l'environnement.

L'objectif de notre mémoire est alors de fournir une étude scientifique et rigoureuse des principaux effets qu'engendreraient les voitures autonomes pour juger de leur durabilité. Par la suite, nous tâcherons d'en identifier les freins et les leviers selon les trois piliers du développement durable, que sont la prospérité économique, écologique et sociale.

Pour nous aider dans notre analyse, nous nous baserons sur la méthodologie décrite par Michael F. ASHBY dans son livre *"Materials and Sustainable Development"* et résumée à la Figure 1. Nous structurerons notre étude en quatre parties en nous inspirant de cette méthode.

En premier lieu, nous définirons le cadre de la problématique : les objectifs qui motivent le développement de la voiture autonome de même que la vision de son déploiement dans le temps. Puis, nous établirons les différents intervenants, c'est-à-dire les acteurs qui auront un rôle à jouer ou qui seront touchés par cette nouvelle forme de mobilité.

En deuxième lieu, nous dresserons les principales conséquences qu'auraient ces voitures sur six thématiques précises en effectuant une recherche de faits. Pour cela, nous passerons en revue leurs impacts énergétiques, environnementaux, législatifs, économiques, sociétaux et les matériaux qu'elles requièrent. Chacune de ces thématiques fera l'objet d'une recherche en utilisant les ressources disponibles, comme les livres, les bases de données scientifiques, internet, et des interviews d'experts qui sont résumées et annexées à ce document.

1. Rapport Brundtland

2. Source : Commission européenne

En troisième lieu, nous approfondirons cette recherche en développant les systèmes de télécommunications nécessaires pour assurer l'autonomie de la voiture, les matériaux utilisés pour leur conception, et leur impact énergétique. Nous mettrons en avant des facteurs de mérite tels que la latence des communications, la densité d'énergie des batteries ainsi que la consommation par kilomètre de la voiture à l'usage.

En quatrième et dernier lieu, nous synthétiserons nos recherches en dégagant les impacts des voitures autonomes sur les trois piliers du développement durable. Nous conclurons en fournissant notre interprétation des résultats afin de mettre en lumière la durabilité de cette voiture par rapport à la situation actuelle. Nous pointerons les défis à venir et des recommandations qui pourraient être utiles au développement de cette technologie. Enfin, nous terminerons en insistant sur l'intérêt d'une telle étude préliminaire au lancement d'un produit ainsi que les avantages qu'apportent la structure et la méthode développée par Ashby.

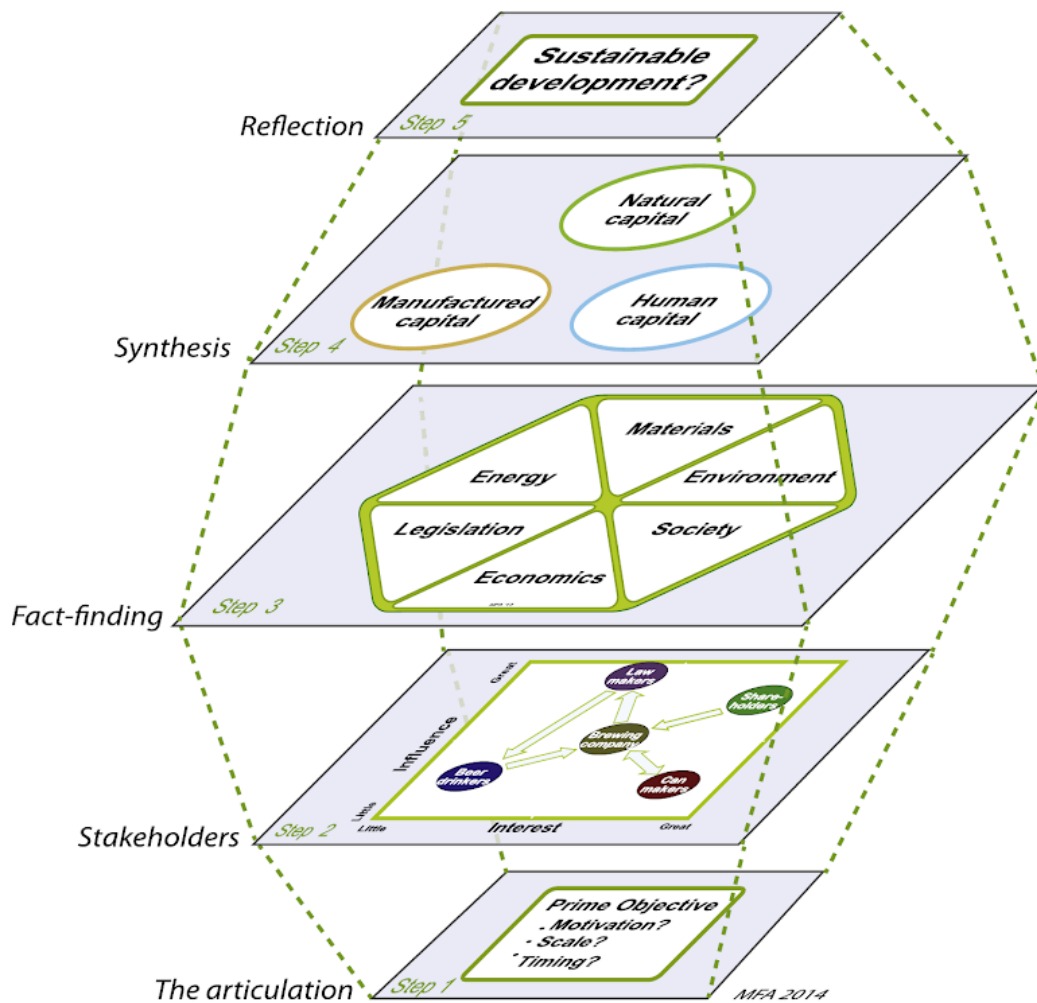


FIGURE 1 – L'approche par couches de Ashby pour l'analyse de durabilité [1].

Chapitre 1

Mise en contexte de la problématique

1.1 Définition de l’articulation

Notre étude s’articule autour de la voiture autonome (VA). Les principaux objectifs qui motivent son déploiement sont décrits ci-dessous [2].

- Améliorer la sécurité automobile : réduire les nombreux accidents de la route, causés dans 95 % des cas par des erreurs humaines ;
- Rendre la mobilité plus accessible ;
- Réduire le nombre de parkings et réaménager l’espace urbain ;
- Réduire le stress lié à la conduite et augmenter la productivité lors des trajets ;
- Faciliter la mobilité partagée et développer les concepts d’économie collaborative et de *Mobility as a Service* (MaaS) : privilégier les déplacements multimodaux (voiture, train, vélo...) et diminuer le besoin de posséder son propre véhicule ;
- Décarboniser et décongestionner le trafic grâce à la propulsion par un moteur électrique et à la réduction du nombre de voitures sur les routes, pour améliorer la qualité de vie en particulier dans les espaces urbains.

L’association *Society of Automotive Engineers* (SAE) a établi un guide (SAE J3016) pour classer l’automatisation des véhicules en cinq niveaux.

D’une part, il y a ceux partiellement automatisés (niveaux 1 et 2) qui permettent d’assister le conducteur en transférant certaines tâches de la conduite à un ordinateur. Citons par exemple le régulateur de vitesse adaptatif, qui respecte une consigne en accélérant et en freinant automatiquement.

D’autre part, il y a les véhicules autonomes (niveaux 3, 4 et 5) qui assurent une conduite automatisée. Nous nous intéressons aux VA du niveau 5, qui correspond à une autonomie complète, sans possibilité d’intervention humaine.

Il est prévu que le taux de pénétration des VA soit de 17 % en 2035, dont 7 % pour celles de niveau 5 [3]. Notre étude est basée sur le très long terme, où nous supposons un taux de 100 % pour les voitures complètement autonomes.

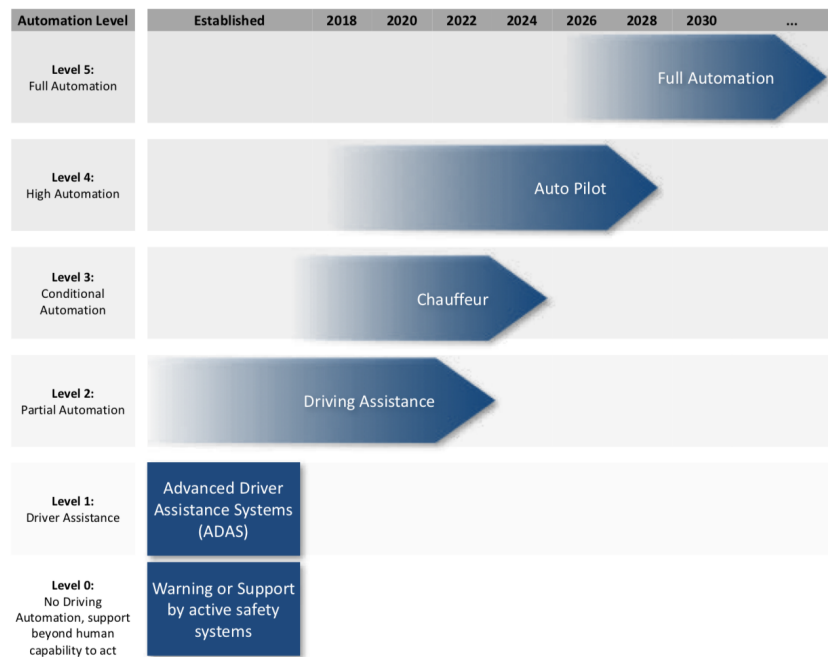


FIGURE 1.1 – Déploiement prévu selon le niveau d'autonomie [4].

1.2 Analyse des intervenants

Le passage aux VA aura des conséquences directes et indirectes sur un certain nombre de secteurs, d'industries, d'organisations et sur la société en général.

Nous dressons une liste non exhaustive des principaux acteurs qui pourraient être impliqués [5, 6] dans ce nouvel écosystème de la mobilité.

- Conseillers en mobilité ;
- Expérience dans les véhicules :
 - Hôtels/motels : les passagers d'une VA pourront dormir dans le véhicule plutôt que dans une chambre d'hôtel lors de trajets nocturnes de longues distances ;
 - Compagnies aériennes de vols domestiques/courts courriers : les passagers qui effectuent de longs déplacements pourront choisir de se laisser transporter dans un véhicule autonome jusqu'à leur destination finale plutôt que de voyager en avion ;
 - Compagnies fournisseur d'expérience : des fournisseurs de contenu et de services embarqués, des développeurs d'applications, des annonceurs, des fournisseurs de matériel de divertissement et des entreprises de médias sociaux : tous joueront un rôle dans le développement de l'expérience utilisateur à bord du véhicule. Le passager pourra choisir entre se relaxer, travailler, ou se divertir.
- Opérateurs de flottes automobiles :
 - Chauffeurs professionnels (taxi, poids lourds, limousines ...) : ces métiers auront tendance à disparaître, laissant place à d'autres tels que superviseurs de flottes (veillent à la sécurité et au bien-être des passagers) ou techniciens spécifiques ;
 - Transports en commun et services de location de voitures : la VA permettra d'amener les utilisateurs à n'importe quel endroit, alors que les transports en commun collectent et débarquent à des lieux fixes ; de la même façon, l'utilisation d'un service de mobilité autonome pourrait

remplacer la location de voiture.

- Véhicules :
 - Concessionnaires et fabricants de voitures : moins de consommateurs posséderont une voiture et le nombre total de voitures produites diminuera grâce à une mobilité de plus en plus partagée ;
 - Compagnies de réparation automobile : moins d'accidents signifient moins de visites chez les garagistes.
- Infrastructures énergétiques :
 - Compagnies de pétrole et d'électricité, en supposant que les VA seront entièrement électriques ;
 - Gestionnaires de réseau : devront adapter les installations et l'approvisionnement en électricité pour faire face à la demande des VA.
- Infrastructures physiques
 - Les exploitants de parking : la demande en stationnement aura tendance à diminuer ;
 - Secteur de l'immobilier : comme chacun aura accès plus facilement à la mobilité, les propriétés résidentielles les plus valorisées pourraient être relocalisées des zones urbaines aux banlieues (zones suburbaines) ;
 - Urbanistes : étant donné une dynamique des transports modifiée, les villes seront conçues différemment.
- Infrastructures digitales :
 - Compagnies de télécommunications : ils devront assurer les communications entre les véhicules et l'infrastructure ;
 - Experts en cybersécurité : leur but sera de contrôler la sécurité des communications du système autonome.
- Compagnies d'assurance : comme le conducteur devient passager, les produits d'assurance seront adaptés en conséquence ;
- Secteurs publics : les revenus générés par la voiture personnelle tels que les taxes sur le carburant, les péages, les taxes de vente sur les véhicules, les parkings publics, les taxes de mise en circulation et le permis de conduire risquent de disparaître. De nouvelles taxes seront créées pour combler ces pertes ;
- Forces de l'ordre : quelle autorité aura un policier sur une VA ?
- Propriétaires de véhicules actuels : ils deviendront passifs en termes de conduite.

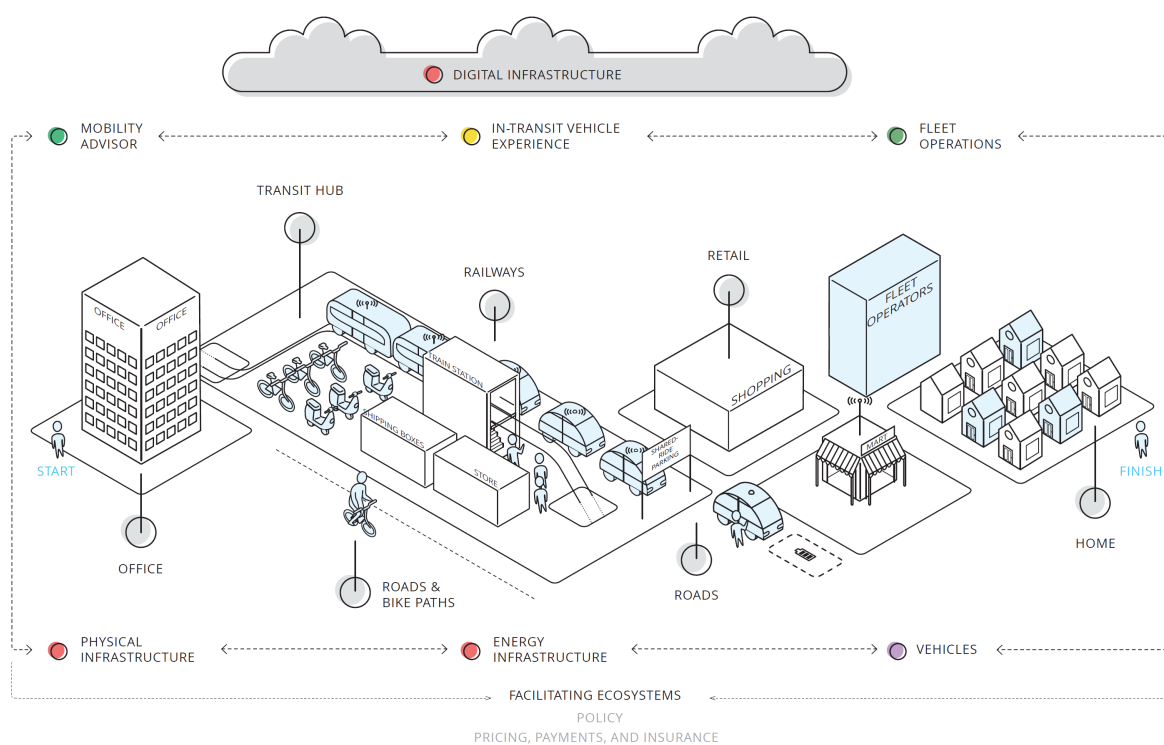


FIGURE 1.2 – Intervenants principaux [7].

Chapitre 2

Recherche de faits

Nous avons défini le contexte ainsi que les différents intervenants impliqués par l'arrivée de la voiture autonome. Dans ce chapitre, nous mettrons en lumière les secteurs suggérés par Ashby et représentés à la Figure 2.1. Dans les chapitres suivants, nous développerons les trois aspects les plus en lien avec notre spécialité : les systèmes de télécommunication, les matériaux et l'énergie.

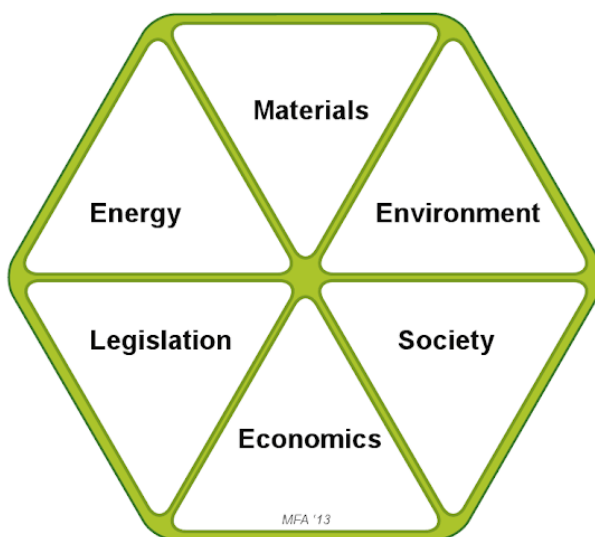


FIGURE 2.1 – Étude des conséquences des VA sur six secteurs [1].

2.1 Énergie

La tendance actuelle souhaite remplacer les moteurs à combustion interne traditionnels par des solutions moins polluantes, comme le moteur électrique, hybride ou au gaz naturel (*Compressed Natural Gas*, CNG). Une étude considère l'analyse du cycle de vie complet de ces quatre technologies et affirme que les moteurs hybrides (électricité/essence) et CNG possèdent l'impact environnemental le plus faible [8]. Depuis plusieurs années, le moteur à hydrogène suscite l'attention de nombreux chercheurs. Cependant, bien que celui-ci n'émette pas de CO_2 à l'utilisation, il possède un certain nombre de désavantages. En effet, l'hydrogène se stocke et se transporte difficilement, sa production est énergivore et coûteuse et son inflammabilité peut compromettre la sécurité des passagers [9].

Pour le futur développement des VA, le moteur électrique est privilégié pour son rendement élevé, sa fiabilité et sa durée de vie, le peu d'entretien nécessaire, son bas niveau sonore et ses émissions nulles à l'utilisation. Ses faiblesses, qui concernent principalement la batterie (construction, matériaux utilisés, autonomie et masse), sont en voie d'amélioration et seront développées dans le Chapitre 4. Nous y aborderons aussi ses enjeux sur le réseau électrique.

Il importe également de s'intéresser à la consommation énergétique de la VA pendant son utilisation. D'un côté, l'automatisation a le potentiel de fluidifier le trafic et d'optimiser la conduite écologique en roulant, par exemple, de façon rapprochée. Les avancées de la science des matériaux permettront d'alléger la structure du véhicule et la batterie pour en diminuer sa consommation.

D'un autre côté, la conduite autonome partagée rendra la mobilité plus accessible, ce qui pourrait augmenter le nombre de trajets en voiture et par conséquent l'énergie utilisée dans ce moyen de transport. Une estimation de l'énergie consommée par kilomètre est détaillée à la Section 4.2.2.

2.2 Matériaux

Le passage à la VA aura des conséquences non négligeables sur l'industrie automobile. En effet, en estimant qu'une VA partagée remplacera dix voitures privées non autonomes [10], son taux d'utilisation sera nettement supérieur. Il est donc indispensable d'intégrer des matériaux robustes et résistants, couplés à une excellente qualité de fabrication. Une refonte totale de leur design est également à prévoir [11], car il ne sera plus nécessaire d'intégrer un volant, des rétroviseurs, des pédales de frein et d'accélérateur ou encore des systèmes de sécurité massifs.

À l'heure actuelle, les matériaux les plus controversés utilisés dans la construction des voitures électriques (VE) sont d'une part le lithium, le cobalt et le nickel pour les batteries, et d'autre part le néodyme, le dysprosium et le samarium pour la fabrication des aimants permanents du moteur [12].

Leurs enjeux ainsi que leur utilité au sein de la voiture et leurs alternatives envisageables seront développés dans le Chapitre 4.

En ce qui concerne la fin de vie des batteries, différentes options existent. Par exemple, des associations entre des constructeurs automobiles et des fabricants de solutions de stockage d'énergie (comme *Renault* et *Powervault*) se lancent dans le reconditionnement afin d'allonger leur durée de vie avant de devoir les recycler. Ces dernières disposent en effet d'une capacité importante et exploitable en fin de première vie, après 8 à 10 ans d'utilisation dans l'automobile. Le constructeur estime la durée de la seconde vie de ces batteries dans un système *Powervault* entre 5 à 10 ans [13].

Lorsque la capacité résiduelle n'est plus suffisante pour être exploitée, la batterie est recyclée. Les traitements possibles ainsi que leurs enjeux énergétiques et environnementaux seront détaillés dans le Chapitre 4.

2.3 Environnement

Les VE ont un impact CO_2 nul pendant leur utilisation sur les routes, mais une *énergie grise* (c.-à-d. la quantité d'énergie consommée pendant le cycle de vie) très élevée, ce qui les rend moins écologiques qu'une voiture à combustion interne [8]. Par exemple, l'assemblage d'une batterie de 100 kWh émet 15 à 20 tonnes de CO_2 [14]. L'idéal pour minimiser l'empreinte environnementale des voitures consisterait en un passage du parc automobile actuel vers des VA *électriques*, avec une énergie nécessaire à leur cycle de vie et à leur utilisation qui proviendrait de sources renouvelables.

De plus, des études [15, 16] estiment que le besoin de disposer de parkings à proximité des centres-villes ainsi que l'espace nécessaire au stationnement diminueraient, étant donné que ces voitures peuvent se garer dans des endroits plus éloignés et sur des places plus étroites. La construction de nouveaux parkings serait donc évitée, ce qui constitue un avantage pour l'environnement. En effet, elle génère en

moyenne 6 à 23 grammes de CO_2 par passager par kilomètre dans le cycle de vie d'émissions d'un véhicule, typiquement autour de 230 à 380 grammes de CO_2 .

Enfin, un système de communication rapide entre les véhicules est indispensable pour permettre l'échange d'informations qui assurent la conduite autonome. Un grand nombre de données transiteront en continu entre les voitures et l'infrastructure routière. Pour se faire, le réseau devra être doté d'une technologie d'échange à haut débit, comme celui qu'offrirait la 5G. Or, les conséquences de la multiplication des champs électromagnétiques (1G, 2G, 3G, 4G, 5G) sur la santé humaine, la faune et flore ne sont pas encore bien connues, et méritent d'être approfondies dans le Chapitre 3.

2.4 Société

Avec l'arrivée des VA, de nombreux changements sont à prévoir en termes de qualité de vie : meilleure productivité, mobilité plus accessible, moins de stress, modification des infrastructures et de l'urbanisme, etc. Comment seront perçus ces changements, et a fortiori cette transition, par les consommateurs ?

D'une part, les VA permettraient de réduire le stress et l'ennui des passagers sur la route. Elles pourront être aménagées comme des bureaux, des salles de jeu ou encore des lits mobiles, permettant aux voyageurs de se reposer ou de travailler [17]. Aussi, la contrainte de trouver une place de parking et la perte de temps dans les embouteillages disparaîtront grâce à l'automatisation et à la décongestion du trafic. Les passagers seront donc de plus en plus enthousiastes à faire de longues distances en voiture, et de façon générale, à passer plus de temps à l'intérieur de celles-ci.

D'autre part, les VA utilisées en mobilité partagée peuvent introduire de nouveaux types d'inconforts. Par exemple, pour éviter le nettoyage et le vandalisme, les taxis autonomes (robotaxis) auraient des intérieurs au design minimaliste : sièges en vinyle, surfaces en acier inoxydable, le moins d'accessoires possible et des caméras de sécurité [18]. L'insécurité et l'inconfort ressentis par certains en voyageant avec des inconnus pourraient aussi les dissuader d'utiliser ce service. Un autre peut être engendré par les temps de parcours allongés par les arrêts plus fréquents, et par le fait que la VA partagée débarque les passagers à proximité et non exactement à leur destination pour l'optimisation de son itinéraire [19].

De plus, par son absence de conducteur, sa flexibilité et son coût d'utilisation réduit, la VA rendra la mobilité plus accessible. Cela profitera principalement aux personnes à mobilité réduite, aux adolescents et jeunes enfants, aux aveugles et à toute autre personne ne pouvant ou ne souhaitant pas conduire. Cela réduit aussi le fardeau de chauffeur imposé aux membres de leur famille ou à leurs amis. La mobilité autonome pourrait également améliorer l'accès à l'éducation et à des possibilités d'emplois plus éloignés, ce qui augmenterait la productivité économique. Ainsi, des non-conducteurs aisés vivant dans des zones reculées pourraient acheter des VA personnelles, et les non-conducteurs urbains seraient susceptibles d'utiliser un service de taxi autonome [17]. Une augmentation des déplacements par ces nouveaux groupes d'utilisateurs est à prévoir, ce qui n'est pas sans conséquence sur la consommation d'énergie de la flotte automobile, comme nous le verrons au Chapitre 4.

Notons également que le confort et l'accessibilité des VA pourra encourager l'étalement urbain. Les utilisateurs de cette technologie pourront relocaliser leur habitation, pour profiter des avantages qu'offre la banlieue notamment au niveau des prix plus attractifs [20].

En outre, des menaces informatiques [21] telles qu'une prise de contrôle à distance de la voiture, le piratage ou encore le vol des données personnelles ne sont pas à exclure. La police de la route pourrait être remplacée par des experts en cybersécurité, pour gérer de nouveaux cas extrêmes comme des criminels qui utilisent ces voitures pour faire traverser des armes, de l'argent ou de la drogue aux frontières. Dans ce contexte, *General Motors* a créé en 2015 un centre d'analyse en cybersécurité, qui a pour mandat de recueillir et de partager de l'information sur les cybermenaces en collaboration avec des pirates éthiques [22]. La protection de la vie privée et des renseignements personnels est également un enjeu majeur. En effet, les VA rassembleront un nombre élevé de données et connaîtront le lieu de résidence et de travail ainsi que les habitudes et l'emploi du temps des voyageurs. Ces informations pourraient être utilisées à

des fins de télémarketing ciblé.

Les VA auront donc des conséquences positives et négatives sur notre société. Avant une production à grande échelle, les industriels, les gouvernements, les législateurs et académiques doivent prendre des mesures concrètes pour préparer les consommateurs à cette transition et à ce nouveau mode de mobilité. De plus, comme évoqué à la Section 1.2, elles impacteront le marché du travail en créant de nouveaux emplois et en supprimant d'autres. Il faut également combattre le scepticisme des consommateurs [23] en assurant une mobilité autonome fiable et sécurisée. Cela constitue un enjeu majeur, étant donné que toute faille du système risque de ralentir l'adoption de la technologie.

2.5 Législation

Bien que la conduite autonome soit supposée réduire considérablement le nombre d'accidents, le risque zéro n'existe pas et plusieurs scénarios sont à prévoir. En cas de collision avec un piéton, qui est le responsable? Le propriétaire de la voiture, le conducteur qui aurait dû reprendre le volant (si niveau d'autonomie 3 ou 4), le constructeur automobile ou encore la compagnie informatique qui a développé le logiciel d'autonomie? Ces véhicules soulèvent des questionnements dont les réponses n'existent pas encore, et qui pourtant, ont des répercussions sur leur image et leur fiabilité comme cela a été le cas récemment avec l'accident mortel entre une Tesla semi-autonome et un piéton en Arizona [24].

L'article 8 de la Convention de Vienne, qui définit les règles internationales pour la circulation routière, stipule que "*tout véhicule en mouvement (...) doit avoir un conducteur*". Elle précise également que le conducteur doit toujours rester maître de son véhicule, mais autorise depuis 2016 les systèmes automatisés à condition qu'ils puissent être contrôlés, voire désactivés par le conducteur. Plusieurs VA circulent déjà sur les routes, mais encore à titre expérimental. Qu'advient-il des responsabilités à bord d'une VA de niveau 5, où le passager n'aura aucun contrôle sur la conduite?

Des assureurs se sont penchés sur la question. L'évolution vers des voitures entièrement autonomes entraînerait un glissement de la responsabilité [25, 26]. À l'heure actuelle, la faute revient dans 95 % des cas au conducteur. Dans une VA, la technologie peut faire l'objet d'une défaillance et être à l'origine de l'accident. Dans ce cas, il se peut que la responsabilité soit celle des fabricants (les constructeurs automobiles, les fournisseurs de pièces et des logiciels) ou celle du gestionnaire de la voirie. En déplaçant la responsabilité dans la chaîne de la mobilité, les entreprises technologiques pourraient ainsi être déclarées responsables d'un accident. Il serait alors nécessaire de créer une assurance appropriée qui défendrait leurs intérêts. Les autorités locales, les provinces et les régions devront également s'assurer contre les dommages qui pourraient être occasionnés par une infrastructure routière défaillante.

Comme la question de la responsabilité devient plus complexe, il pourrait être envisageable de rendre l'utilisation des enregistreurs de données (*Event Data Recorders*, EDR) obligatoire [27]. Ils faciliteraient la mise à disposition des preuves nécessaires afin de parvenir à une clôture rapide et efficace de chaque sinistre [28]. Il est cependant important de déterminer où ces données seront stockées, à bord de la voiture ou dans le *cloud*, pendant combien de temps et qui pourra y avoir accès.

De plus, étant donné que les conducteurs deviendront passagers, de nouveaux produits d'assurance verront le jour afin de pouvoir les indemniser en cas de défaillance du matériel et/ou du logiciel. Les accidents devenant plus rares avec ce type de véhicules, il faudra sans doute repenser les formules, en insistant moins sur les dégâts matériels que peut subir la voiture mais plus sur l'assistance des voyageurs par exemple. Il sera aussi nécessaire d'assurer les voitures et les passagers contre les risques cybernétiques [25].

Enfin, en ce qui concerne les informations des passagers, l'Union européenne a introduit en 2018 un règlement général sur la protection des données (GDPR : *General Data Protection Regulation*), qui permet aux clients un meilleur contrôle de celles-ci. C'est à ce jour l'une des réglementations les plus strictes en matière de protection des données personnelles. Cependant, comme expliqué précédemment, les services offerts aux passagers nécessiteront de stocker et de traiter leurs données (position, préférences,

agenda, etc.), ce qui risque d'entrer en conflit avec ce règlement en raison du consentement strict requis des clients [29].

2.6 Économie

Comme évoqué à plusieurs reprises, l'une des principales motivations du déploiement de la VA est la réduction du nombre d'accidents de la route. Ceux-ci sont actuellement causés dans 95 % des cas par des erreurs humaines et ont un coût annuel estimé à 47 milliards d'euros en France (en 2017) [30], soit 2,2 % du PIB. La VA représente une solution évidente et permettrait, dans une certaine mesure, de combler ce déficit économique.

De plus, les bénéfices économiques liés à la décongestion des routes seraient significatifs, sachant que les coûts liés au trafic sont très élevés. Ils représentent annuellement entre 4 et 8 milliards d'euros pour la Belgique [31].

De façon plus globale, une étude réalisée par la banque américaine Morgan Stanley [32] estime qu'une fois largement déployées, les VA permettraient des économies annuelles de 1300 milliards USD aux États-Unis. Cela représente environ 6 % de leur PIB en 2018 ou plus de 160 % de leur budget fédéral octroyé à l'éducation.

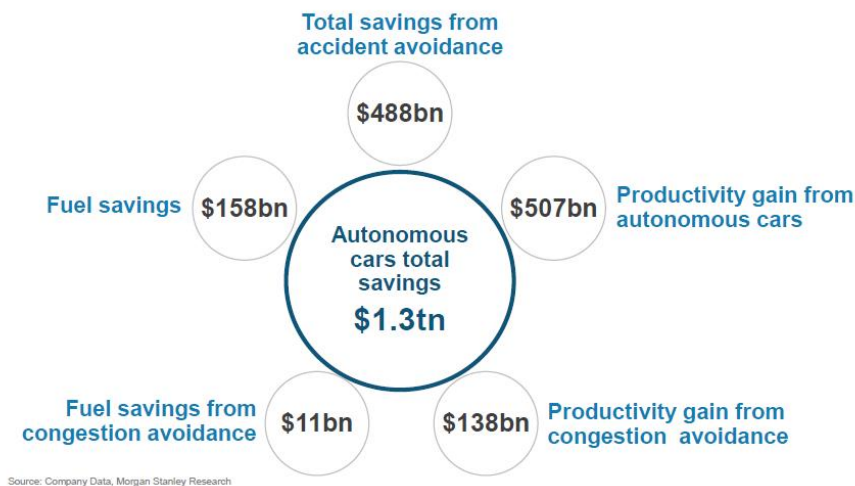


FIGURE 2.2 – Estimation des économies annuelles aux États-Unis grâce à la VA [32].

En outre, les VA et plus particulièrement celles utilisées en mobilité partagée auront un impact sur le prix du transport. En effet, un tel système répartit les coûts de propriété (amortissements, financement, assurances, immatriculation et taxes) et les coûts opérationnels sur un grand nombre d'utilisateurs. Ensuite, ce système maximise le taux d'occupation du véhicule : par exemple, une voiture privée reste environ 90 % du temps en stationnement et parcourt quotidiennement une cinquantaine de kilomètres. Une VA partagée roulerait plus de 300 kilomètres par jour et circulerait plus de 50 % de son temps [33]. Une recherche menée par UBS [34] estime que le prix au kilomètre des robotaxis vaudrait 30 % de celui d'un taxi ordinaire équipé d'un moteur thermique (voir Figure 2.3), grâce à quatre facteurs principaux.

- **Service de mobilité optimal** : les robotaxis utiliseront des algorithmes efficaces pour minimiser les temps d'attente des clients et optimiser le taux d'utilisation de chaque voiture ;
- **Utilisation de VE** : selon l'étude, les coûts liés à l'usage d'un véhicule électrique sont en moyenne 15 à 20 % inférieurs à ceux d'un véhicule thermique (MCI) (prix de l'énergie, moins d'entretien, etc.) ;

- **Utilisation de VA** : à l'heure actuelle, environ 60 % du total des frais payés par l'utilisateur d'un trajet à la demande partagé vont au conducteur du véhicule. Le passage à un service de robotaxis diminuerait ces frais à 25 % ;
- **Intensification de la concurrence entre les services de mobilité partagée** : la croissance de ce type de service attirera de plus en plus d'acteurs. De plus, grâce à l'automatisation des véhicules, une plus grande partie des bénéfices générés reviendra aux exploitants de ces flottes. Si l'on suppose que ceux-ci conservent le même niveau de rentabilité qu'aujourd'hui pour les voitures thermiques non autonomes, les prix pourraient baisser de 30 %, c'est-à-dire de 0,4 €/km.

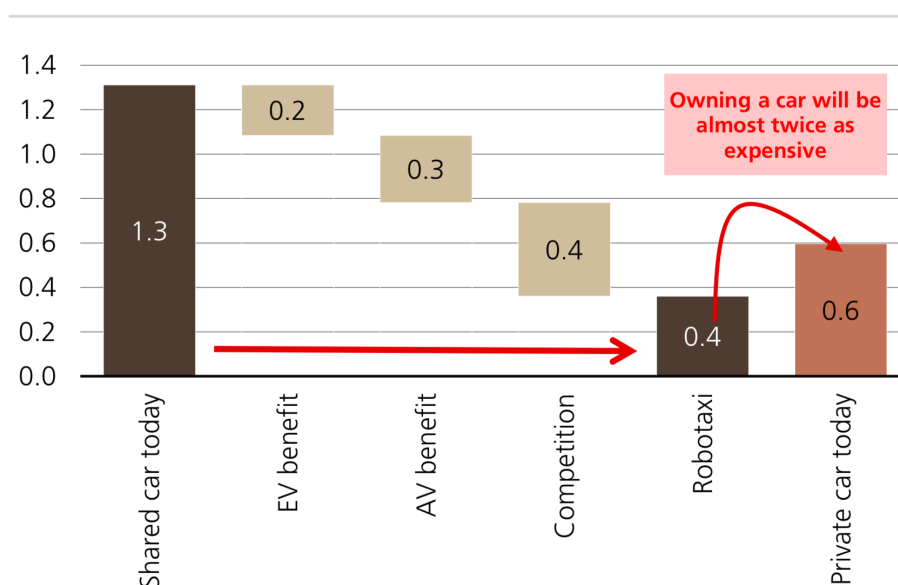


FIGURE 2.3 – Coût (€/km) pour l'utilisateur d'un service de mobilité autonome partagée (robotaxi) [34].

D'autres études [35, 36] fournissent une estimation plus prudente et affirment que les trajets partagés ne seraient que légèrement moins onéreux que les déplacements en véhicule privé. Cela s'explique par les coûts liés au nettoyage et à l'entretien des flottes partagées. Il faut de plus tenir en compte que la baisse des prix des déplacements aura tendance à augmenter la demande en transport, un effet rebond qui impacterait la consommation énergétique totale des voitures comme nous le détaillerons dans le Chapitre 4.

Pour terminer, pour avoir une idée du coût additionnel de la VA par rapport à la VE, le prix du système autonome est estimé [37]. Sur base des coûts des technologies actuelles, le LiDAR représente à lui seul 7500 USD. À cela s'ajoute le RADAR (entre 100 et 150 USD), la caméra (environ 200 USD) et le capteur à ultrasons (entre 15 et 20 USD). Le coût d'une puce GPS jumelée avec un capteur inertiel (INS) est de 180 USD, et les données générées seront traitées par un ordinateur dont le prix est estimé à 150 USD [38]. Ainsi, le système complet composé de 5 LiDAR, 4 RADAR, 9 caméras, une puce GPS/INS et 2 ordinateurs (sur base du système de Waymo [39]) possède un coût de plus de 40 000 USD. Ce chiffre aura tendance à fortement diminuer une fois que l'industrie automobile se tournera vers une production de masse des VA. Par exemple, il est prévu que le prix du LiDAR chute à 250 USD grâce au développement prometteur de la technologie du *Solid State*.

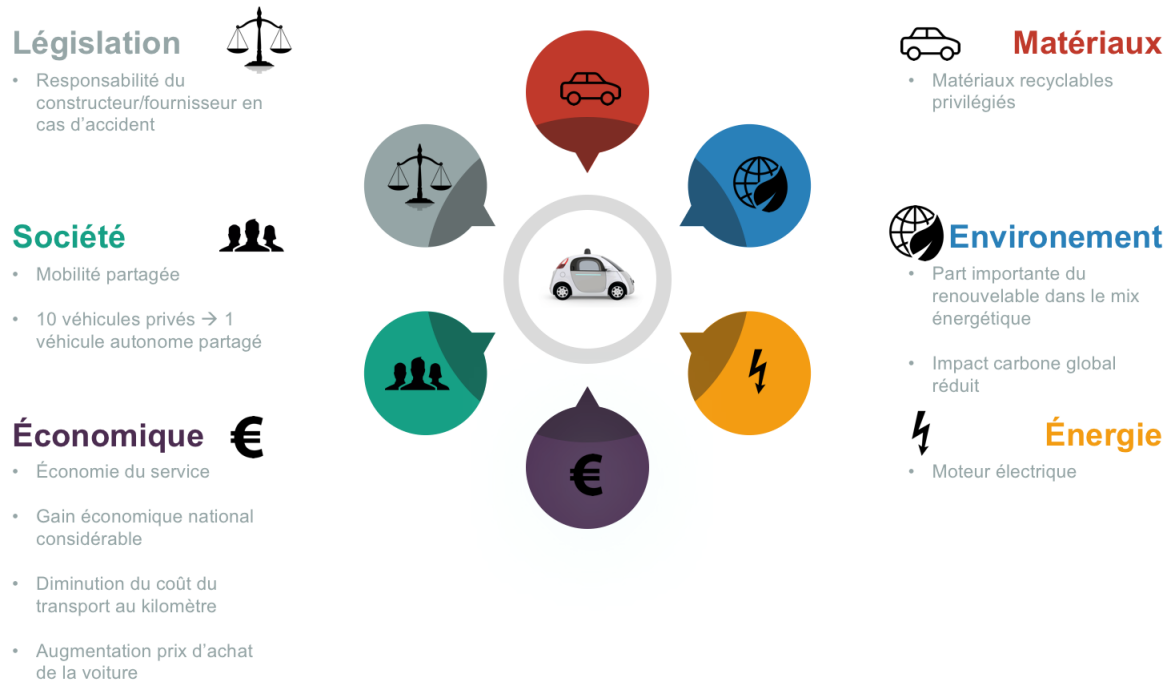
Nous détaillerons le fonctionnement, l'intérêt et les enjeux de ces technologies dans l'approfondissement du Chapitre 3.

2.7 Cas d'étude

À la suite des recherches préliminaires sur les VA, nous dressons des hypothèses utilisées dans les prochains chapitres et qui constituent notre cas d'étude.

Nous nous intéressons au développement des voitures autonomes plutôt qu'aux véhicules au sens large, dans un système de mobilité partagée. Bien que l'avenir de leur source d'énergie soit incertain, nous nous concentrons sur les tendances actuelles qui mettent en avant la mobilité électrique. De plus, nous plaçons notre vision sur le long terme, où 100 % du parc automobile est autonome de niveau 5. Sachant qu'il y a environ 6 millions de voitures privées en Belgique (chiffres de 2018), et que nous supposons qu'une VA en remplacera 10 actuelles [40] grâce au développement massif de la mobilité partagée, nous prévoyons à terme une flotte autonome belge de 600 000 VA.

Ces résultats sont obtenus sans tenir compte des évolutions démographiques, qui pourraient aussi induire des changements dans la taille du parc automobile.



Approfondissements

Après avoir dépeint l'environnement dans lequel s'inscrirait la VA, nous avons établi une vue d'ensemble des changements principaux qu'elle engendrerait. Dans les chapitres suivants, dans un souci de faisabilité, nous approfondirons certains points.

Nous nous intéresserons en premier lieu aux systèmes à mettre en place pour permettre à la VA de communiquer avec son environnement, et les échanges de données qui en résultent.

En deuxième lieu, nous étudierons les matériaux nécessaires à la construction de ces voitures, aussi bien au niveau du châssis que des batteries et du moteur.

Nous terminerons en établissant une estimation de leur bilan énergétique de leur utilisation.

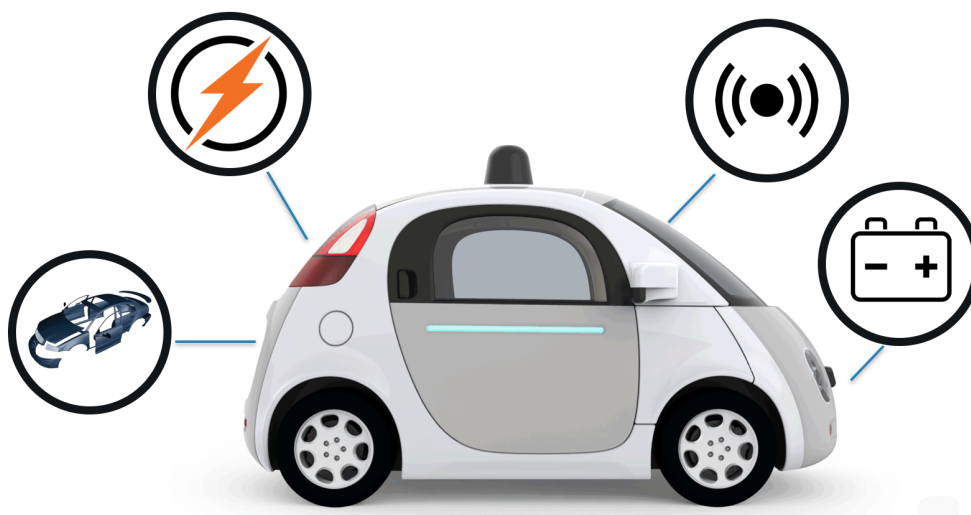


Image : Waymo

FIGURE 2.4 – Secteurs d'approfondissement.

Chapitre 3

Systèmes de communication et échanges de données

Ce chapitre étudie la façon dont les VA communiquent avec leur environnement. En effet, celles-ci seront *hyperconnectées* afin d'être sécuritaires et efficaces.

Tout d'abord, nous développerons les technologies liées aux communications (DSRC, 5G, RADARs, caméras, LiDAR...). Ensuite, nous chiffrerons les différents échanges de données et enfin, nous analyserons les effets de la multiplication des communications sur l'environnement et sur l'humain. Les impacts spécifiques du système autonome sur les matériaux et sur l'énergie seront développés dans le Chapitre 4.

3.1 Description des technologies

Les standards radio-cellulaires actuels ne permettent pas aux voitures connectées d'échanger des informations assez rapidement que pour permettre de remplacer un conducteur. La latence (temps pour envoyer et recevoir une information) est comprise entre 30 et 45 millisecondes pour la 4G. Pour assurer la sécurité des passagers, les VA de niveau 5 requerront des transmissions de données quasiment instantanées. Une solution envisageable serait d'utiliser la 5G, qui permettrait des vitesses de transmission de données allant jusqu'à 10 Gb/s ce qui diminuerait la latence à 1 milliseconde [41] et la rendrait convenable pour des applications en temps réel [42].

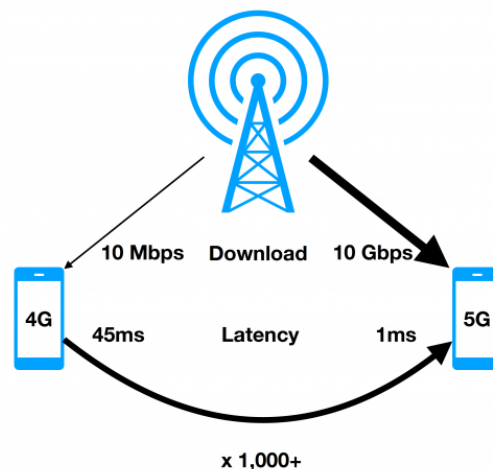


FIGURE 3.1 – Motivation de la 5G pour des applications en temps réel [43].

Les principales missions de la 5G sont en effet de diminuer la latence et d'augmenter la capacité de transmission.

La capacité d'un canal C (en bits par seconde, [b/s]) est régie par la formule de Shannon, représentée à l'équation 3.1.

$$C = B * \log(1 + \frac{S}{B}) \quad (3.1)$$

où B est la bande passante et S/B est le rapport signal à bruit à l'intérieur du canal.

Pour augmenter la capacité du canal, la 5G agit sur les deux paramètres suivants : le nombre de canaux, en augmentant le nombre d'antennes, et l'élargissement de la bande passante B en travaillant à plus haute fréquence. Le rapport signal à bruit étant aléatoire, ce n'est pas un paramètre de contrôle. De plus, comme il suit une relation logarithmique, il a une faible dépendance sur C .

Trois scénarios motivent le déploiement et l'usage de la 5G : l'*Enhanced Mobile Broadband* (EMBB), le *Massive Machine Type Communications* (MMTC) et l'*Ultra-Reliable and Low Latency Communications* (URLLC) [44].

- Le premier, l'**EMBB**, répond aux besoins *connectés* des utilisateurs tels que le streaming intense, le multimédia ou encore l'échange de données qui demandent un débit de plus en plus élevé ;
- Le deuxième, le **MMTC**, représente l'utilisation du réseau par un grand nombre d'appareils connectés transmettant généralement un volume relativement faible de données non sensibles au retard. Ce type d'utilisation de la 5G entraînera de nouveaux domaines d'application et de nouvelles exigences aux applications à large bande mobile existantes, pour une performance améliorée et une meilleure expérience utilisateur ;
- Le dernier, l'**URLLC**, a des exigences strictes en ce qui concerne le débit, la latence et la disponibilité. Des exemples d'applications sont le contrôle sans-fil de procédés de fabrication ou de production industrielle, la chirurgie à distance, l'automatisation de la distribution pour un réseau intelligent, ou encore les communications entre les véhicules autonomes.

Des exemples d'applications de ces trois scénarios peuvent être observés à la Figure 3.2, où la VA se retrouve dans la catégorie URLLC.

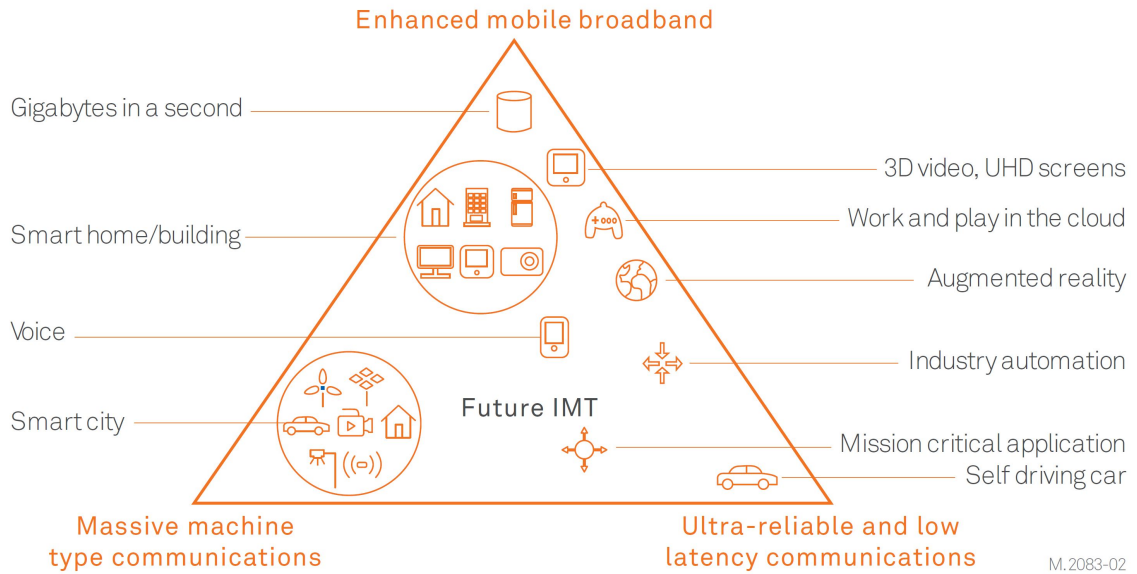


FIGURE 3.2 – Domaines d'utilisation de la 5G [45].

Afin que la 5G satisfasse ces différentes applications, l'adoption de l'approche de spectre multicouche est nécessaire (voir Figure 3.3).

Ainsi, les réseaux 5G auront accès à des fréquences *hautes* (supérieures à 6 GHz), *moyennes* (entre 2 et 6 GHz) et *basses* (inférieures à 2 GHz). Celles en dessous de 6 GHz seront utilisées pour la transmission de données couvrant une zone étendue. Les deux bandes 3300-4200 et 4400-5000 MHz, comprises dans les moyennes fréquences, offriront le meilleur compromis entre couverture et capacité de transmission. La couche des basses fréquences (moins de 2 GHz) restera importante pour permettre la transmission dans des zones étendues ou à travers des couches profondes (à l'intérieur d'un bâtiment par exemple). Enfin, celles au-dessus de 6 GHz assureront des débits élevés, requis pour les applications EMBB.

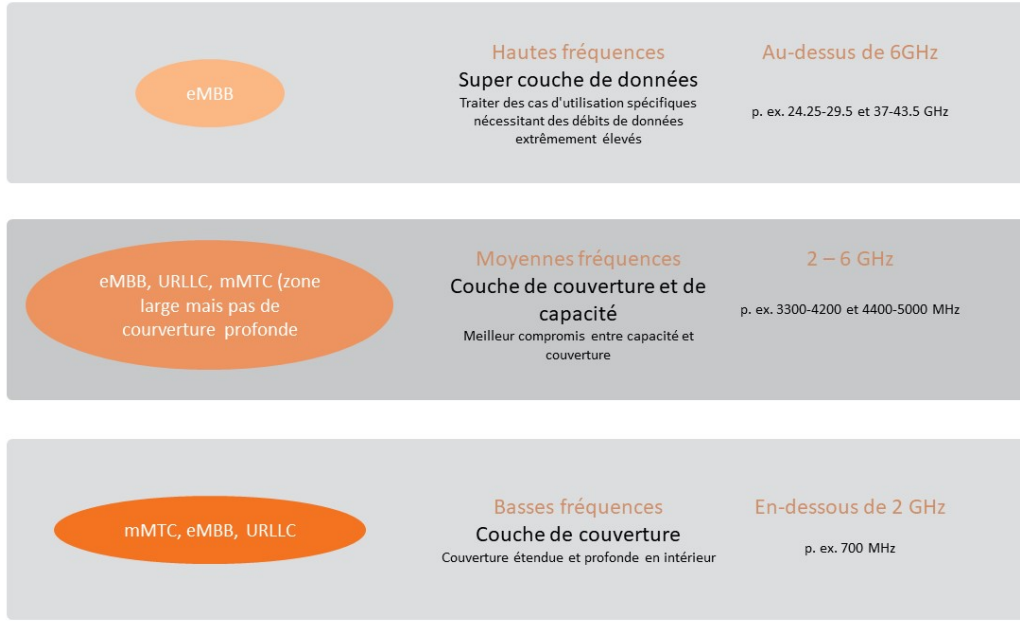


FIGURE 3.3 – Approche de spectre multicouche [45].

Ces fréquences élevées représentent des défis majeurs au niveau de la conception des circuits et de la propagation des ondes : leurs faibles longueurs d'onde (de l'ordre du millimètre) impliquent des phénomènes de dissipation et d'absorption, développés ci-dessous.

Atténuation en espace libre

L'atténuation en espace libre est la diminution idéale par propagation d'un signal à l'intérieur d'un espace où il n'y aurait que les deux antennes d'émission et de réception. Elle est définie par le rapport de la puissance d'émission sur la puissance du signal reçu, en fonction de la distance d (en m) qui sépare le transmetteur du récepteur. Elle est caractérisée par l'équation 3.2 [46].

$$FSPL[dB] = 10\log_{10}\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 = 10\log_{10}\left(\frac{4\pi df}{c}\right)^2 \quad (3.2)$$

L'atténuation est proportionnelle au carré de la fréquence de la porteuse, ce qui implique qu'elle est plus importante pour les ondes millimétriques.

En considérant une fréquence de l'ordre du GHz et une distance de l'ordre du kilomètre, l'équation (3.2) devient :

$$FSPL[dB] = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) + 92.45 \quad (3.3)$$

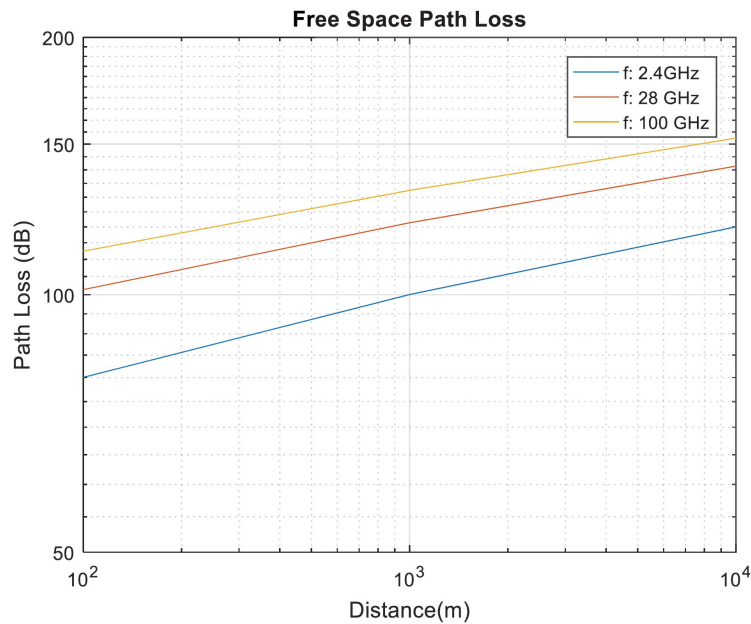


FIGURE 3.4 – Atténuation (dB) en espace libre en fonction de la distance d [47].

Les courbes de la Figure 3.4 représentent l'équation (3.3) pour des fréquences de 2,4 GHz, 28 GHz et 100 GHz. L'atténuation à 28 GHz est plus élevée de 22 dB comparée à celle à 2,4 GHz ; à 100 GHz, elle est plus élevée de 32 dB.

Cela illustre le défi majeur de la dissipation des ondes millimétriques.

Le modèle d'atténuation en espace libre ne prend pas compte de l'interaction des ondes avec les particules présentes dans l'air. En effet, la dissipation varie avec des facteurs ambiants comme la température, le taux d'humidité et la pression. Il faut donc considérer plusieurs cas *réels* sur base du modèle développé par l'*International Telecommunication Union* (ITU) [48], qui considère que la polarisation des ondes est horizontale (angle d'élévation nulle) avec une portée de 1 km.

Ces cas sont développés ci-dessous.

Atténuation due à la pluie

La Figure 3.5 illustre l'atténuation des ondes millimétriques pour différentes fréquences et précipitations, caractérisées par le nombre de millimètres d'eau par heure (mm/h).

6 cas sont considérés :

- Très faible pluie : $< 0,25$ mm/h
- Pluie légère : 0,25 mm/h à 1 mm/h
- Pluie modérée : 1 mm/h à 4 mm/h
- Forte pluie : 4 mm/h à 16 mm/h
- Pluie extrême : 16 mm/h à 50 mm/h
- Pluie torrentielle : > 50 mm/h

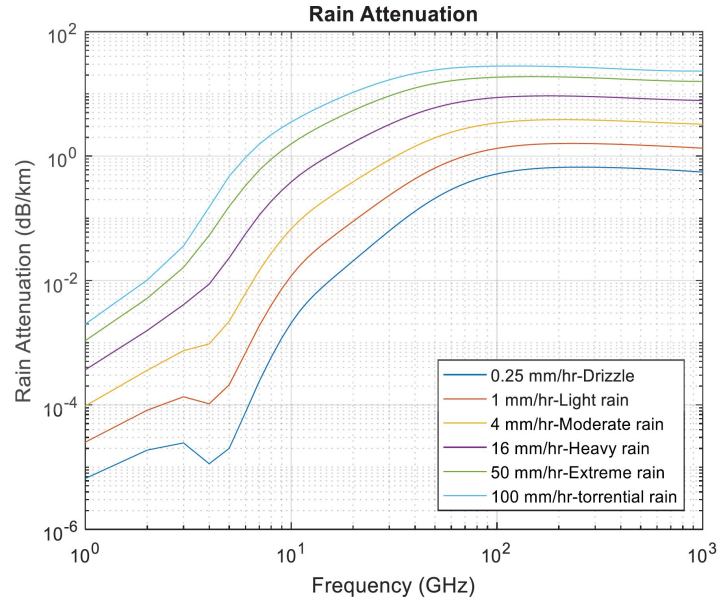


FIGURE 3.5 – Atténuation (dB/km) due à la pluie [47].

Sur cette base, il s'avère que la pluie peut être un facteur limitant pour les communications dont la fréquence est supérieure à 10 GHz.

Atténuation due au brouillard

Les nuages et le brouillard sont également constitués de gouttes d'eau, de taille inférieure à celles de la pluie. L'analyse est à nouveau basée sur le modèle de l'ITU [49], caractérisé par deux paramètres : la température atmosphérique (considérée constante et égale à 15 °C) et le taux d'humidité.

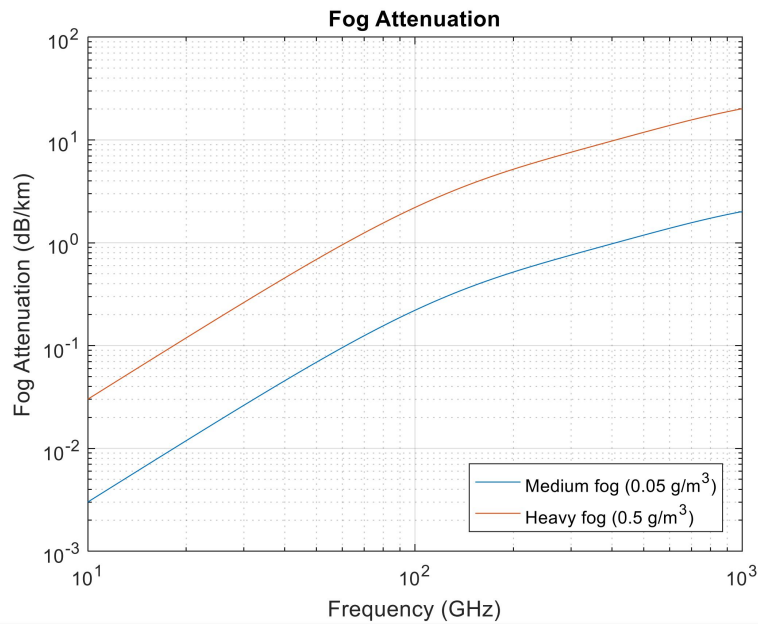


FIGURE 3.6 – Atténuation (dB/km) due au brouillard [47].

La Figure 3.6 illustre la variation de l'atténuation avec la fréquence pour deux cas de densité d'eau liquide dans l'air. Le premier a une densité de $0,05 \text{ g/m}^3$ et correspond à une visibilité par l'œil humain d'environ 300 m. Le deuxième a une densité de $0,5 \text{ g/m}^3$, ce qui représente une visibilité de 50 m. Dans les deux cas, l'atténuation est mineure pour les ondes de fréquences inférieures à 100 GHz.

Atténuation due aux gaz atmosphériques

L'atmosphère est naturellement constituée de différents gaz pouvant dégrader la propagation des ondes. Cet effet est analysé en considérant une pression atmosphérique de 1013,25 hPa, une température de 15°C et une densité de vapeur d'eau de $7,5 \text{ g/m}^3$.

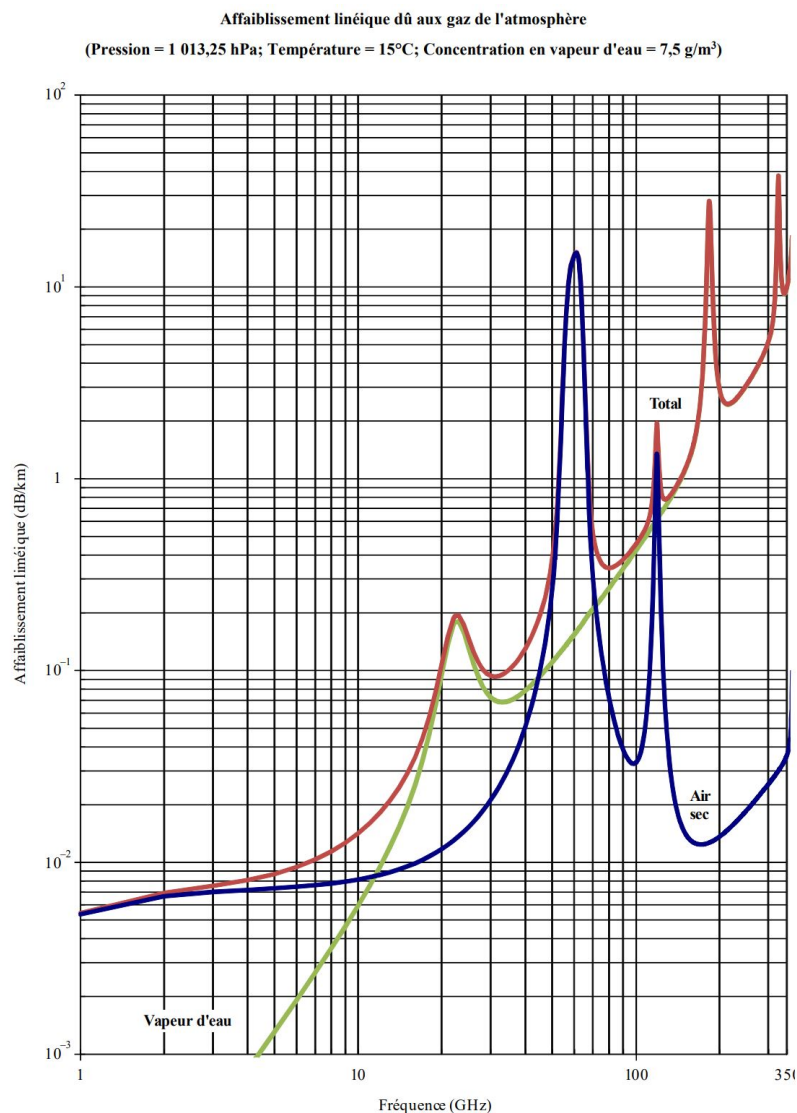


FIGURE 3.7 – Affaiblissement (dB/km) dû aux gaz de l'atmosphère [50].

La Figure 3.7 montre que l'atténuation est relativement faible pour des fréquences allant de 24 à 44 GHz.

Enfin, la Figure 3.8 conclut l'analyse de ces différents cas de dissipation en affirmant que les ondes millimétriques offrent un spectre de fréquences relativement large pour le développement de la 5G : de 3 à 57 GHz, de 64 à 164 GHz et enfin de 200 à 300 GHz, en tenant compte des phénomènes d'atténuation des ondes dans l'atmosphère.

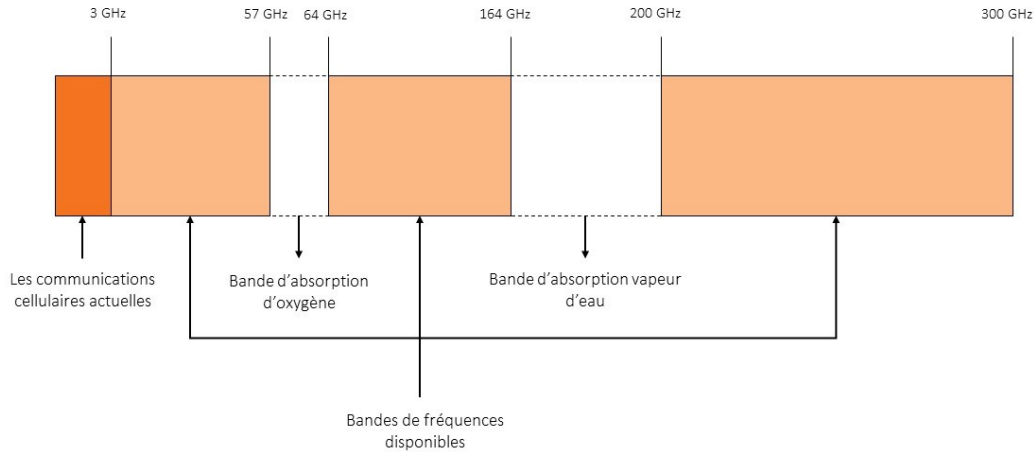


FIGURE 3.8 – Bandes de fréquences disponibles pour le déploiement de la 5G [47].

L'absorption des signaux explique également pourquoi le réseau 5G complète les stations de base avec d'autres stations plus petites. En général, plus la longueur d'onde est élevée (basse fréquence), plus celle-ci se propage loin. Les antennes sont donc plus espacées. Les ondes millimétriques de la 5G et leur taux élevé d'absorption ne parcourent que de faibles distances (quelques centaines de mètres) et il est donc essentiel d'implémenter un nombre plus important d'antennes. La Figure 3.9 illustre ce concept appelé *Phantom Cell*, dans lequel de petites cellules (*Smart Cells*) sont superposées à une macro-cellule, qui garantit une bonne couverture grâce à ses basses fréquences (800 MHz et 2 GHz). Les *Smart Cells* permettent quant à elles de fournir un débit de transmission plus élevé en utilisant des moyennes et hautes fréquences, tout en surmontant la problématique d'atténuation des ondes millimétriques en multipliant leur nombre. De plus, l'incapacité des ondes millimétriques à pénétrer les murs implique l'installation de ces antennes relais à l'intérieur des bâtiments afin de garantir l'accès au réseau 5G.

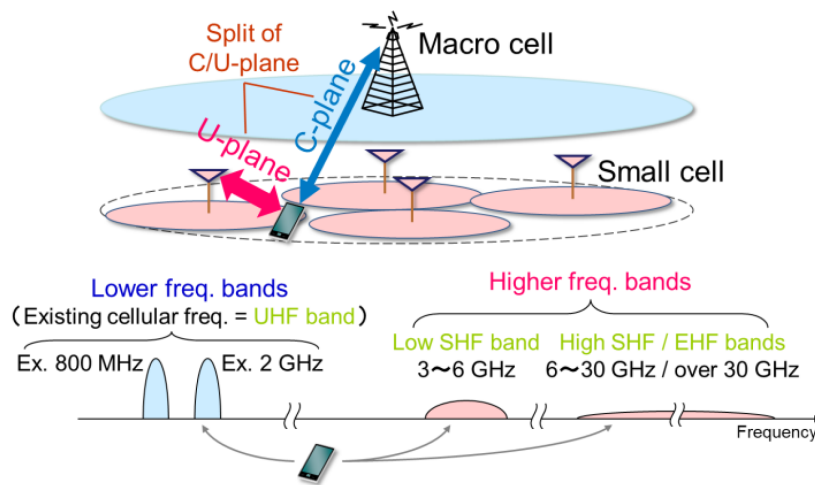


FIGURE 3.9 – Concept de *Phantom Cell* [51].

Plus spécifiquement, les *Smart Cells* nécessitent peu d'énergie et peuvent être placées à environ tous les 250 mètres dans les villes. Elles fonctionnent comme relais d'autres stations de base et peuvent être installées sur des lampadaires ou sur une façade d'immeuble.

Comme décrit dans le Tableau 3.1, il y a trois catégories, qui diffèrent selon la portée, la consommation d'énergie et le coût [52].

	Femtocells	Picocells	Microcells
Couverture	10 à 50 m	100 à 250 m	500 m à 2,5 km
Puissance	100 mW	250 mW	2 à 5 W
Nombre d'utilisateurs simultanés	8 à 16	32 à 64	200
Applications	Pour l'intérieur	Pour l'intérieur (bureaux, hôpitaux, écoles...)	Extérieur (smart cities, smart métros...)
Coût	Bas	Bas	Moyen

TABLEAU 3.1 – Caractéristiques des Smart Cells

Notons qu'il y a aussi une séparation du plan de contrôle (C-plane, qui est responsable de la signalisation des transmissions et est géré par les macro-cellules) et du plan utilisateur (U-plane, qui transporte les données de l'utilisateur et est géré par les *Smart Cells*) [53].

Pour répondre aux exigences et aux utilisations de la 5G, notamment dans le cas des communications des VA, des améliorations potentielles pourraient être envisagées sur le concept de *Phantom Cell*.

La Figure 3.10 représente différentes couches superposées au réseau de macro-cellules : des *petites cellules* Low-SHF (*Super-High Frequency*) de 3 à 6 GHz ainsi que des High-SHF de 6 à 30 GHz, mais également des spots EHF (*Extremely High Frequency*) de plus de 30 GHz. Ces couches permettent d'assurer une vitesse de transmission plus ou moins élevée en fonction des besoins et des applications.

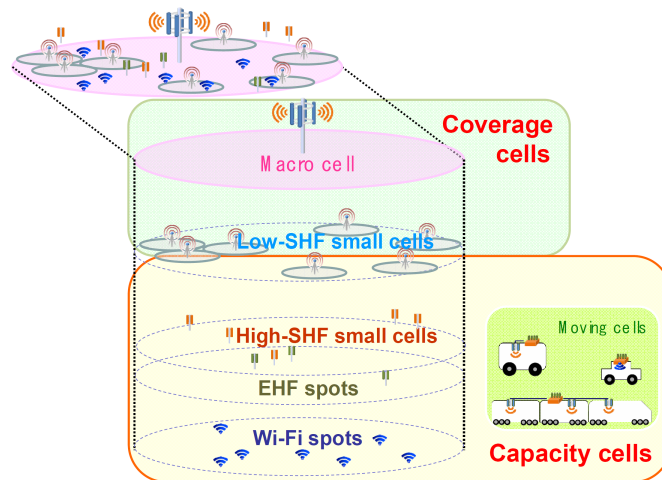


FIGURE 3.10 – Amélioration des *Phantom Cells* [51].

Une autre implication majeure des ondes millimétriques est la possibilité de réutiliser les fréquences d'émission. Dans les précédentes technologies de télécommunications, les signaux sont émis de façon multidirectionnelle, à 360° . La 5G utilise la technologie *MIMO* (Multiple Input and Multiple Output). Elle consiste à utiliser simultanément les mêmes fréquences pour transmettre différents signaux, de façon unidirectionnelle, permettant ainsi la réutilisation de la bande passante. Cela signifie que plusieurs petites antennes d'une station de base peuvent émettre des signaux différents et que plusieurs antennes d'un appareil peuvent les recevoir et les diviser simultanément, ce qui améliore l'efficacité spectrale et énergétique [43]. Comme une bande de fréquence est généralement divisée en plusieurs *séquences*, cela augmente encore le nombre de canaux séparés pouvant être fournis. Non seulement la même fréquence peut être utilisée dans différentes directions sans risque d'interférence, mais les antennes peuvent aussi utiliser plusieurs fréquences en même temps.

Ainsi, entre l'émetteur et le récepteur, plusieurs flux spatiaux peuvent être simultanément transmis et reçus, et la capacité de canal peut augmenter linéairement à mesure que le nombre d'antennes augmente. Par conséquent, le canal MIMO est employé pour multiplier le taux d'utilisation du spectre sans augmenter la largeur de bande et la puissance de transmission de l'antenne.

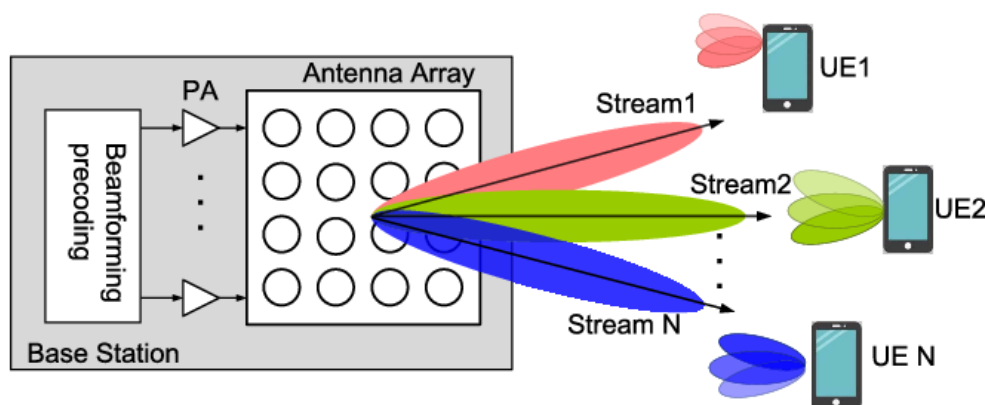


FIGURE 3.11 – Description de la technologie MIMO [54].

Les réseaux MIMO standards utilisent généralement deux ou quatre antennes pour transmettre les données et le même nombre pour les recevoir. La technologie *Massive MIMO* utilise quant à elle un nombre d'antennes particulièrement élevé : des dizaines voire même plus de 100 pour une station de base. Elle offre également deux innovations qui assurent une meilleure couverture réseau et une plus grande capacité de transmission, sans consommer plus de bande passante : le *beamforming* et le MU-MIMO (MIMO multi-utilisateurs) [55].

Le *beamforming* est une technique de traitement du signal qui permet d'obtenir une sélectivité spatiale par la formation de faisceaux à l'émission et à la réception. En effet, certains signaux subissent des interférences constructives à des angles particuliers tandis que d'autres subissent des interférences destructives. Le MU-MIMO augmente davantage la capacité des stations de base en permettant la communication avec plusieurs utilisateurs en même temps.

Le système MIMO massif dirigera alors le signal vers l'utilisateur auquel il est destiné. Par conséquent, il y a moins de gaspillage d'énergie car il n'y a pas de rayonnement dans les directions où cela n'est pas nécessaire [56].

Enfin, l'efficacité énergétique du réseau 5G est supérieure à celle de ses prédécesseurs grâce au MIMO massif et aux *Smart Cells* peu énergivores. De plus, la station de base peut réduire sa consommation d'énergie en passant automatiquement en mode veille pendant de très courts intervalles lors d'interruptions d'activité du réseau. En effet, même dans les réseaux mobiles à forte utilisation, l'usage des stations de base ne dépasse généralement pas 20 % bien qu'elles consomment environ 80 % de l'énergie de l'infrastructure de télécommunications [43, 57].

3.2 Description des systèmes de communication

Après avoir décrit la principale technologie qui permettrait aux voitures de communiquer, nous analysons la manière dont les échanges seraient gérés.

Les communications des VA seront soit *distribuées*, soit *centralisées* selon la Figure 3.12 [58].

Dans le premier cas, il s'agit de communications V2V (*Vehicle-to-Vehicle*) alors que dans le second, ce sont des communications V2I (*Vehicle-to-Infrastructure*).

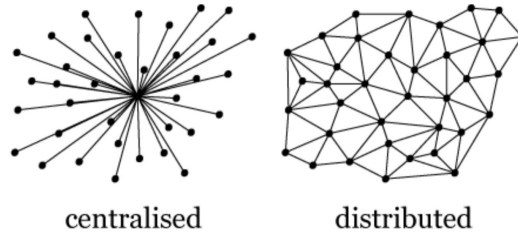


FIGURE 3.12 – Communications centralisées vs distribuées [59].

La technologie V2V, associée aux réseaux distribués pair-à-pair et à faible latence, permet aux véhicules de communiquer entre eux en temps réel et de relayer l'information. Ils sont créés par l'association dynamique des nœuds du réseau et permettent de diffuser des messages (routage). Cependant, plus la distance d'envoi du message est longue, plus le problème d'adressage et de routage est complexe : les réseaux V2V sont donc essentiellement conçus pour être locaux [60].

Ainsi, sachant que ces communications se feront localement et de proche en proche entre les véhicules, il est envisageable d'utiliser le système de radiocommunications DSRC (*Dedicated Short Range Communications*) à 5,9 GHz, qui possède une faible latence (5 ms) et ne nécessite pas d'infrastructure externe, contrairement au réseau 5G. Cependant, cette dernière offrant une meilleure interopérabilité, une bande passante plus large et une cybersécurité accrue, elle resterait privilégiée par les constructeurs de VA [61, 62].

Les communications V2V permettent principalement d'approfondir le niveau d'information pour améliorer la prédiction de chaque véhicule et permettre l'anticipation d'événements. Par exemple, ce système permettra à une voiture à quelques dizaines de mètres de communiquer sur son intention de changer de bande avant de le faire, ou de relayer l'information d'un pneu crevé au moment même où cela arrive, à toutes celles dans les alentours [59].

Le principal avantage d'une architecture de communication distribuée réside dans sa capacité à gérer un grand nombre d'utilisateurs. En effet, comme chaque acteur apporte ses propres capacités de communication au réseau déjà existant, l'impact d'un nouveau véhicule sur les besoins de bande passante est relativement limité. Par conséquent, l'inconvénient majeur de ce type de réseaux est l'incohérence : elle peut être temporelle (pas de garantie de synchronicité), spatiale (portée pratique limitée) ou topologique (fragmentation du réseau) [63].

Alors que les communications V2V nécessitent que d'autres véhicules sur la route soient connectés, les communications V2I sont associées aux réseaux centralisés, stables dans le temps et dans l'espace. Le réseau est maintenu par un point central (serveur, cloud, opérateur...) et les véhicules s'y connectent au démarrage. Les communications centralisées permettent d'assurer la cohérence de l'information à l'échelle du réseau, de garantir une connectivité individuelle et en général certaines garanties de service, fournies par le réseau [63]. Dans ce cas de figure, l'utilisation du réseau cellulaire sera préférée aux communications DSRC, qui nécessiteraient l'implémentation de bornes spécifiques (points d'accès) le long de la voirie [62].

L'infrastructure routière assistera les VA dans leur prise de décisions en collectant des informations sur le trafic et les conditions de la route, et en recommandant des comportements particuliers à un groupe de véhicules : la vitesse idéale à adopter, quand accélérer et freiner ainsi que la distance à respecter entre

eux. Cela permettra une conduite optimale, plus uniforme et une consommation d'énergie réduite [64].

Une autre application de la technologie V2I est le *Smart Parking*. En effet, les parkings connectés permettraient d'envoyer des informations aux véhicules sur les places disponibles, leur coût et a posteriori, savoir combien de temps la voiture est restée stationnée afin de débiter automatiquement le bon montant à l'utilisateur.

Pour résumer, deux types d'informations sont distinguées. D'une part, il y a les informations locales, ayant des effets à court terme (changement de bande, prévenir d'un ralentissement ou d'une accélération...) et qui sont gérées par les communications V2V. Elles permettent également de combler les limites de perception des capteurs. D'autre part, il y a les informations globales, ayant une portée plus importante dans l'espace ou dans le temps (gestion de la mobilité pour optimiser le trafic, planification coopérative...) qui sont traitées par les communications V2I.

3.3 Perception de l'environnement

Après avoir décrit l'architecture et les télécommunications entre les voitures et leur environnement, l'intérêt est porté sur les capteurs qui permettent à ces dernières de percevoir en temps réel le monde qui les entoure. Il en existe une multitude, comme le *Global Positioning System* (GPS) qui localise le véhicule en utilisant la triangulation par satellite (précision de plusieurs mètres), les *Inertial Navigation Systems* (INS) qui utilisent des accéléromètres et des gyroscopes pour estimer la position, l'orientation et la vitesse du véhicule, les LiDAR, RADAR, capteurs à ultrasons, caméras...

L'analyse se limite aux quatre principaux, représentés sur l'infographie de *National Instruments* à la Figure 3.13.

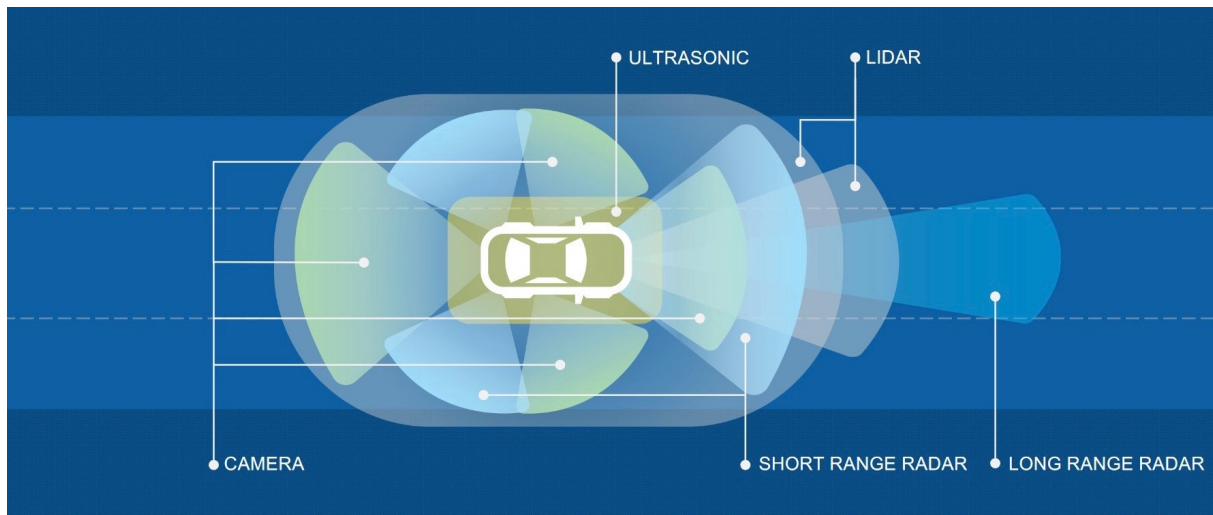


FIGURE 3.13 – Capteurs pour la détection de l'environnement [65].

3.3.1 RADAR

Le RADAR (Radio Detection And Ranging) détecte et localise les objets environnants en utilisant des ondes radio. Il se décline en deux catégories : le *Short-Range RADAR* (SRR) qui permet de surveiller l'environnement proche de la voiture (jusqu'à 30 mètres, avec un champ de vision de 80°) et le *Long-Range RADAR* qui détecte les objets distants de 80 à 250 mètres dans un champ de 30°. La VA utilise conjointement ces deux technologies.

Les bandes de fréquences utilisées sont de 24-29 GHz pour le SRR et de 76-77 GHz pour le LRR, ce qui permet une meilleure résolution. En effet, pour mesurer la vitesse relative d'un objet, le système calcule le déphasage entre le signal transmis et le signal reçu. Si la longueur d'onde diminue, la résolution et la précision de ce calcul augmentent proportionnellement ; si la bande de fréquence varie de 24 GHz à 77 GHz, les mesures de vitesses sont 3 fois plus précises. La résolution sera alors de 4 cm pour le LRR, contre 75 cm pour le SRR [66].

Le SRR sera davantage utilisé pour des applications à courtes distances, comme la détection d'angle mort, la détection des marquages au sol, le changement de file, la détection de collision et les manœuvres pour garer la voiture.

En revanche, le LRR sera utilisé pour des moyennes et longues distances, comme le contrôle de distance automatique, l'anticipation au freinage ainsi que le freinage d'urgence [67].

Actuellement, la plupart des RADAR sont bidimensionnels. Ils envoient des ondes dans un plan horizontal, ce qui implique qu'ils ne peuvent pas déterminer la hauteur et la longueur d'un objet en même temps. Une nouvelle génération de RADAR 3D est en cours de développement pour pallier ce problème.

3.3.2 LiDAR

Le LiDAR (Light Detection and Ranging) détecte et localise les objets en émettant des impulsions d'ondes lumineuses, avec une précision de quelques centimètres pour les obstacles situés à plus de cent mètres [68]. Outre la mesure de distance entre des objets stationnaires ou mobiles, il permet principalement de fournir des images en trois dimensions afin de reconstituer une carte de l'environnement de la voiture. C'est un système complexe, qui permet une visibilité à 360° dans le plan horizontal et à 26° dans le plan vertical, ce qui rend son prix très élevé (plusieurs dizaines de milliers d'euros) et donc son implémentation à grande échelle difficile à l'heure actuelle [69]. C'est une des raisons pour lesquelles les voitures semi-autonomes du constructeur *Tesla* ne possèdent pas de LiDAR.

Son principe de fonctionnement est similaire à celui du RADAR. Tous deux envoient une impulsion de radiations électromagnétiques sur une cible ou un obstacle, et l'onde est réfléchi vers la source émettrice. En connaissant la vitesse de propagation de l'onde émise, il est alors possible de calculer la distance qui sépare la cible de l'émetteur. La différence avec le RADAR réside dans les fréquences de fonctionnement. Le LiDAR utilise des lasers qui rayonnent dans le domaine infrarouge, le domaine visible ou encore le domaine ultraviolet. Leurs longueurs d'ondes sont de quelques centaines de nanomètres à quelques micromètres [68].

Le signal réfléchi est traité par un système électro-optique d'acquisition : un photo-détecteur transforme la lumière reçue en signal électrique, qui est traité par une chaîne électronique pour obtenir l'information recherchée. Le récepteur doit donc être le plus sensible possible et capable de détecter des photons isolés. La technologie de pointe utilisée dans le LiDAR pour atteindre cet objectif est la *Single-Photon Avalanche Diode* (SPAD). Comme l'illustre la Figure 3.14, la jonction P-N de la diode est biaisée afin qu'un simple photon y déclenche un courant d'avalanche. Cette augmentation soudaine du courant dans la diode est détectée par un circuit spécifique qui la traduit en un signal digital [70].

Pour résumer, l'émetteur (le laser) envoie une pulsation d'ondes qui est réfléchi par un obstacle, et après un certain temps, un ou plusieurs photons atteignent la cellule SPAD. La distance est alors mesurée par le temps de parcours, comme le résume la Figure 3.15.

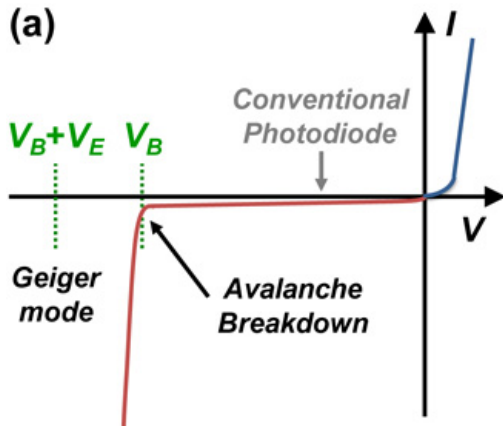


FIGURE 3.14 – Courbe caractéristique du SPAD [71].

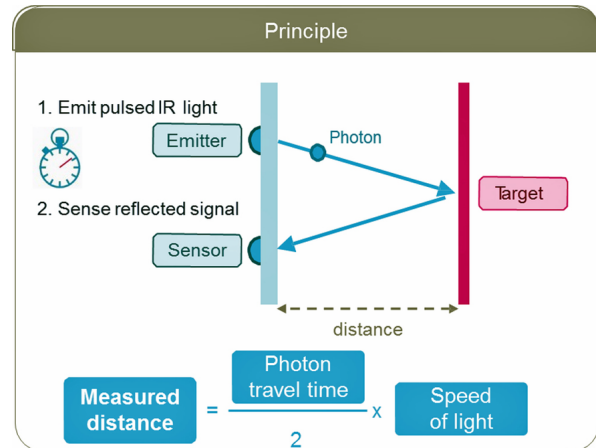
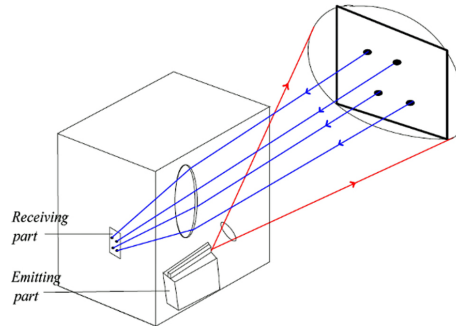


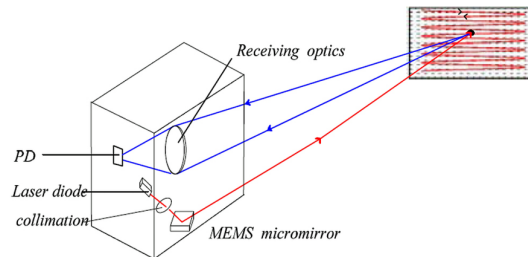
FIGURE 3.15 – Mesure de la distance par un LiDAR [72].

Pour détecter et reconstituer des objets en trois dimensions, l'émetteur doit envoyer plusieurs faisceaux d'impulsions. Deux techniques sont envisageables [72].

- Le *Solid-state LiDAR*, où tous les composants sont immobiles. Dans ce système, l'émetteur est composé d'une centaine de diodes lasers qui envoient des impulsions dont la période est de l'ordre de la nanoseconde. Cette technique semble être le meilleur compromis en ce qui concerne le coût, la taille du dispositif ainsi que la fiabilité du système [73].



- Le micro-miroir, basé sur la technologie MEMS (Micro-Electro-Mechanical System). L'émetteur est composé d'un unique laser, dont le faisceau est réfléchi sur un micro-miroir afin d'obtenir un réseau de stries lumineuses. Cette technique est jugée plus complexe et moins avantageuse que la précédente à cause de ses pièces mobiles, l'extrême précision requise pour le micro-miroir ainsi que la fiabilité du système globale. Son prix est également plus élevé.



Passons en revue les avantages du LiDAR [74, 75] :

- Grâce à ses courtes durées d'impulsions, il détecte les objets avec une précision de l'ordre du centimètre, pour autant que ceux-ci ne soient pas à proximité du véhicule. Il est pleinement opérationnel pour des objets situés entre 120 et 250 mètres ;
- Son indépendance à la luminosité permet d'obtenir une cartographie en trois dimensions en temps réel, de jour comme de nuit ;
- Son temps de traitement est quasiment instantané, ce qui est essentiel la fiabilité du système autonome.

Cependant, outre son coût très élevé, le LiDAR possède plusieurs désavantages à ne pas négliger pour la conduite autonome [76, 77] :

- Il est très efficace pour la détection d'objets distants, beaucoup moins pour les obstacles à proximité du véhicule ;
- Ses performances dépendant fortement des conditions météorologiques [78]. Dans la neige, le brouillard, les fortes pluies et un environnement très poussiéreux, le faisceau peut être perturbé à cause du principe de réfraction. En effet, lorsque le rayon traverse un milieu différent (comme une goutte d'eau), la vitesse de l'onde change, et ainsi la superposition de différentes couches de plusieurs milieux rend approximatif l'évaluation de la distance ;
- Il ne peut distinguer les marquages routiers en deux dimensions : le LiDAR ne peut donc ni détecter les bandes de circulation, ni même identifier les panneaux de signalisation ;
- La puissance de sortie de l'émetteur (des lasers) est limitée, car les ondes lumineuses de longueur comprise entre 600 et 1000 nm peuvent endommager les yeux des autres usagers de la route ;

Il est donc essentiel de coupler son utilisation avec celles d'autres capteurs, comme le RADAR (dont l'efficacité ne dépend pas des intempéries), les caméras ou encore les détecteurs à ultrasons.

3.3.3 Caméra

De façon schématique, une caméra est un capteur passif (contrairement aux LiDAR, RADAR et capteur à ultrasons) qui collecte des points lumineux réfléchis par l'environnement et les arrange en une image, qui est ensuite convertie en un signal digital, lui-même traité par des logiciels d'analyse [79]. Cette technologie est très avantageuse pour la conduite autonome, car elle est considérée comme mature, fiable, facilement intégrable grâce à sa petite taille, ayant une haute résolution et relativement bon marché comparée au LiDAR. Cependant, les données fournies par la caméra doivent être interprétées par des algorithmes complexes ou *Deep Learning*. Une fois analysées, elles fournissent la représentation sémantique la plus riche de l'environnement du véhicule.

Ses atouts principaux par rapport aux RADAR/LiDAR sont la reconnaissance des couleurs, des contrastes et des caractères optiques. Elle sera alors utilisée pour détecter les bandes de circulation, les panneaux routiers et tout autre objet d'intérêt.

Pour ce faire, deux techniques sont utilisées : le *frame differencing* et le *background subtraction* [80] [81]. La première est simple à implémenter et nécessite moins de puissance de calculs. Elle identifie les objets en mouvement en calculant la différence entre deux images consécutives. Cette méthode est optimale si la caméra est statique ; dans le cas des véhicules autonomes, elle serait corrompue par le mouvement en arrière-plan de l'image. Vient alors l'intérêt de la deuxième technique, le *background subtraction*, qui compare chaque image extraite de la vidéo à un modèle de référence pour déterminer les variations possibles.

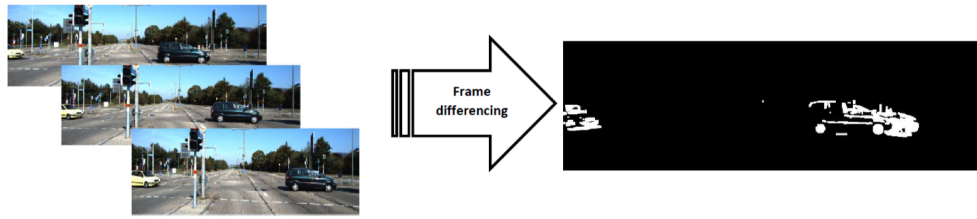


FIGURE 3.16 – Détection d'un objet en mouvement par une caméra [81].

En général, la caméra reconnaît les objets jusqu'à 150 mètres, pour autant que les conditions lumineuses soient optimales. En effet, à l'instar de la vision humaine, l'étendue de sa portée et ses performances diminuent avec l'éclairage ambiant, ce qui la rend dépendante des phares de la voiture [82]. La non-détection d'un objet brillant par rapport à la lumière naturelle environnante était l'un des facteurs de l'accident mortel impliquant une Tesla semi-autonome en 2016 [24].

3.3.4 Capteur à ultrasons

De la même façon que les chauves-souris font pour détecter les obstacles, les capteurs à ultrasons émettent des sons de hautes fréquences (de 40 à 58 kHz), non percevables par l'oreille humaine [83]. Lorsque ceux-ci touchent un objet à proximité, un écho est produit et révèle sa position exacte avec une précision de moins d'un centimètre, en se basant sur le temps nécessaire à l'onde envoyée par le capteur pour revenir.

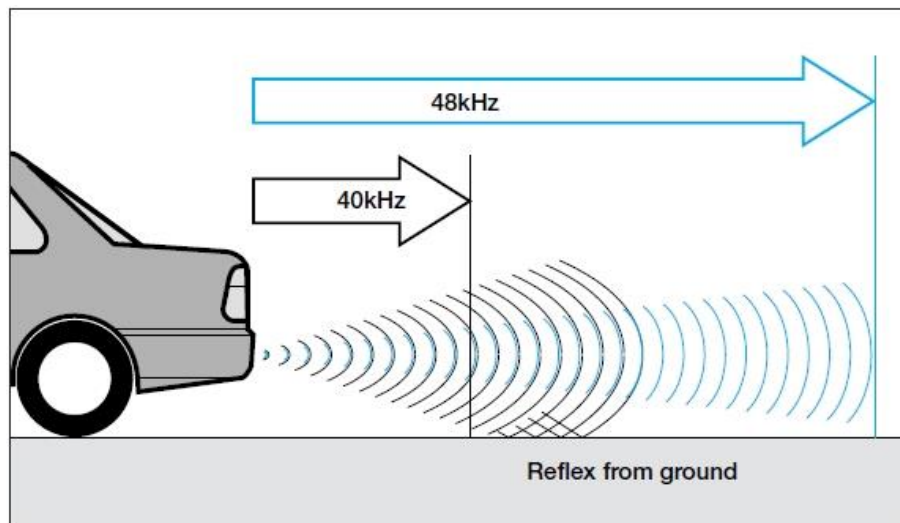


FIGURE 3.17 – Intervalle des fréquences du capteur à ultrasons [84].

L'intérêt d'un tel capteur est la détection d'obstacles à proximité de la voiture pour des applications telles que le stationnement automatisé et la détection d'angles morts. Dès lors, afin de se concentrer sur les objets proches, le système ignore toutes les entrées qui sont sous la valeur de bruit (la réponse quand aucun objet n'est à proximité) plus une marge. Ce seuil détermine la portée maximale du capteur, qui est en général de deux mètres.

Bien que la température ambiante, le taux d'humidité ainsi que le vent affectent tous la vitesse du son dans l'air, cela n'empêche pas le capteur de fonctionner correctement étant donné sa courte portée. Enfin, sa simplicité de fonctionnement le rend facilement réalisable et bon marché [84].

3.3.5 En résumé

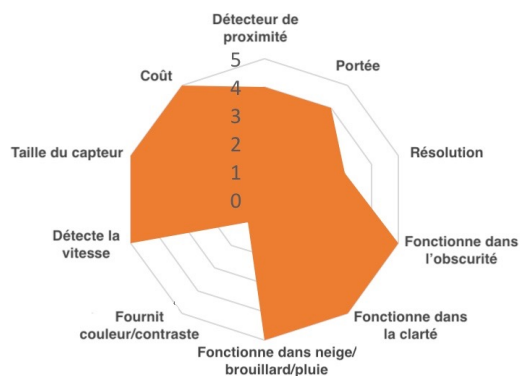
Chaque capteur présent dans la VA participe à la perception de son environnement et possède ses propres avantages et inconvénients.

Les quatre principaux ont été présentés. Cependant, sont-ils tous indispensables ?

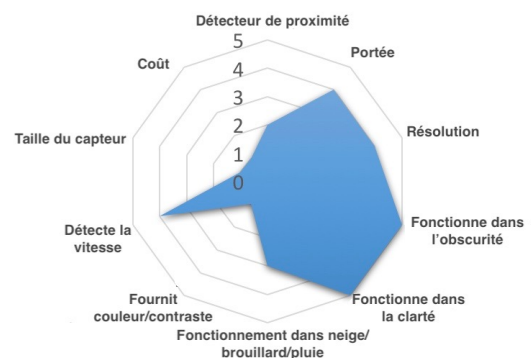
En effet, minimiser le nombre de capteurs permettrait de réduire les échanges de données qui en résultent, la quantité de matériaux utilisée, le coût ainsi que la complexité générale du système. Cette question a donc un intérêt majeur dans le cadre du développement durable d'un système de communication pour les VA.

Pour tenter d'y répondre, résumons tout d'abord les caractéristiques des quatre capteurs [85].

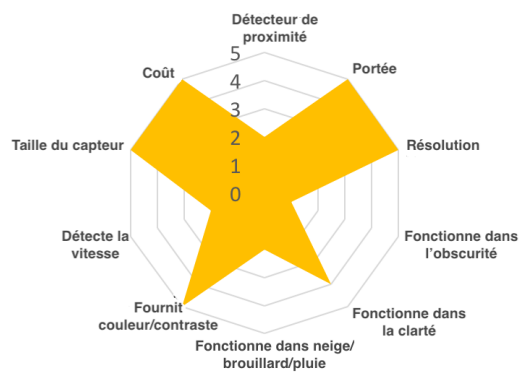
Le RADAR



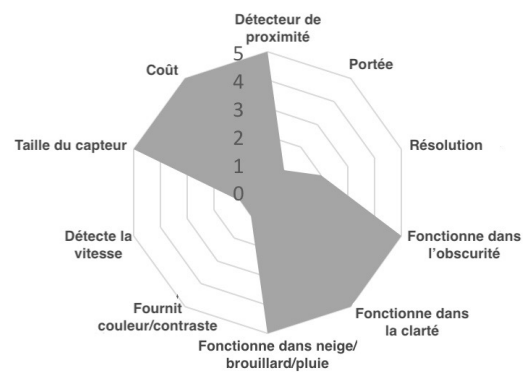
Le LIDAR



Caméra



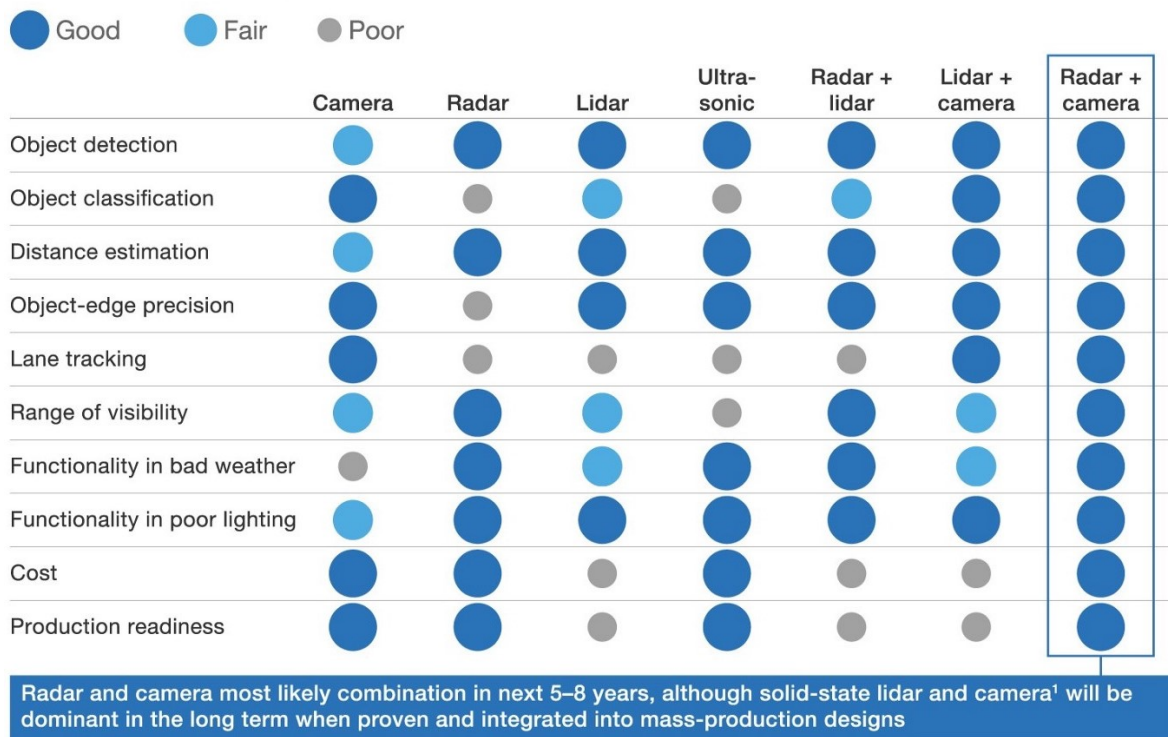
Capteur à ultrasons



Prise séparément, aucune solution n'est parfaite, mais des combinaisons intelligentes peuvent être envisagées en fonction de différents critères pour arriver à pallier les faiblesses de chacune.

D'autres chercheurs se sont aussi penchés sur la question. En considérant les résultats obtenus par le cabinet de conseil *McKinsey* et schématisés à la Figure 3.20, certains capteurs ont des fonctionnalités redondantes en ce qui concerne par exemple la détection d'objets et l'estimation de la distance. Selon eux, la meilleure solution au niveau du coût et de l'efficacité serait de privilégier la combinaison RADAR + caméras, comme c'est déjà le cas sur les voitures semi-autonomes de Tesla. Bien entendu, avoir différents capteurs qui assurent la même fonction permet une meilleure fiabilité en cas de faille d'un de ceux-ci. D'après l'institut de recherche *IRSEEM* à Rouen, qui teste en laboratoire des dispositifs de conduite autonome et que nous avons visité, il est essentiel d'avoir au moins trois redondances pour chaque détection pour assurer un bon fonctionnement : deux redondances permettent de comparer les données reçues et vérifier la pertinence, et une troisième de secours est ajoutée. Les constructeurs automobiles devront donc déterminer le meilleur équilibre en fonction de leurs propres critères (coût, fiabilité, durabilité, etc.).

Sensor function ratings



¹Comparison with other technologies not yet possible due to low maturity of technology.

McKinsey&Company

FIGURE 3.20 – Comparaison des quatre principaux capteurs.

Cela ne signifie pas que le LiDAR n'est pas une solution d'avenir pour les VA. Comme expliqué, cette technologie fait l'objet de nombreuses recherches pour résoudre ses faiblesses par rapport au RADAR [77]. Pour rappel, ce dernier performe mieux dans des conditions météorologiques extrêmes, ce qui est capital pour la conduite autonome qui doit être sûre de tout temps. De plus, les ondes radio sont moins absorbées que les ondes lumineuses quand elles entrent en contact avec des objets, ce qui leur permet de parcourir de plus longues distances. Enfin, la technologie du RADAR est plus ancienne et mieux maîtrisée que celle du LiDAR, ce qui la rend moins coûteuse et plus développée sur le marché. Cependant, la précision

du LiDAR pour la reconstitution de l'environnement de la voiture reste nettement supérieure à celle du RADAR, comme représenté à la Figure 3.21, mais inférieure à celle des caméras. Cette imprécision est compensée par son temps de traitement plus rapide [79].

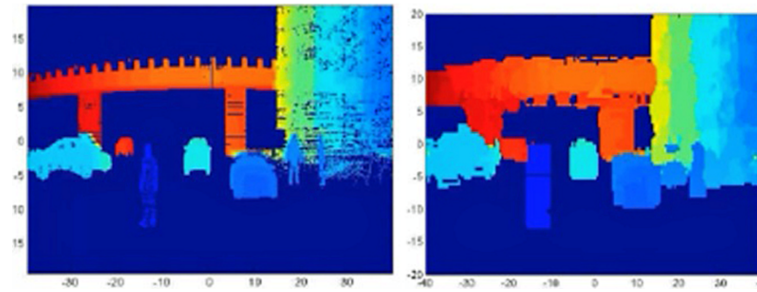


FIGURE 3.21 – Reconstitution par un LiDAR (à gauche) et un RADAR haute précision (à droite) [77].

3.4 Échanges de données

La suite de l'analyse des communications concerne la prise de conscience et les enjeux des échanges de données générées par les différents capteurs, au sein des voitures, mais également entre elles.

À l'heure actuelle, presque toutes les formes de transport sont alimentées au pétrole et ses dérivés ; que cela soit pour la propulsion ou pour la lubrification, il constitue la clé de l'industrie automobile. Selon Intel, les échanges de données imposés par la conduite autonome changeront radicalement l'expérience automobile [86] des consommateurs et des constructeurs de voitures. Leur CEO, Brian Krzanich, affirmait "*data is literally the new oil*".

Cette section a pour but de mettre en évidence le tsunami de données qui s'apprête à débarquer.

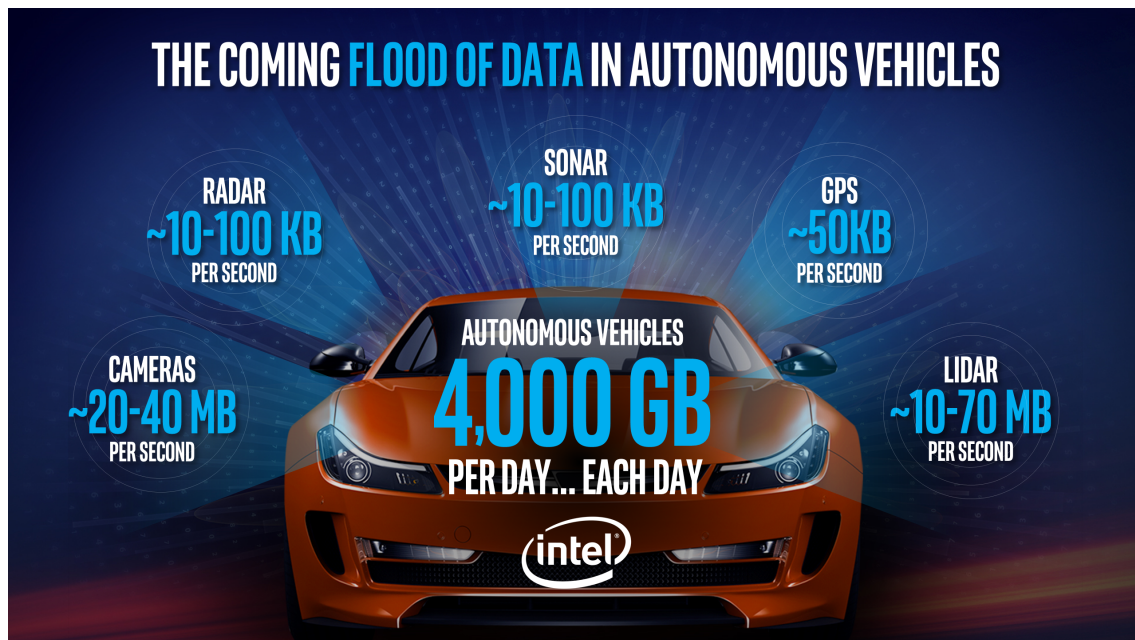


FIGURE 3.22 – "*Data is the New Oil in the Future of Automated Driving*" [86].

Considérons avant tout quelques chiffres.

En 2016, une personne générerait quotidiennement ± 650 Mb de données à travers l'utilisation de son ordinateur, de son smartphone et d'autres objets connectés. Le cabinet de conseil en technologie *Deloitte* [87] affirme que ce chiffre doublera d'ici 2020, et ce n'est rien par rapport aux attentes concernant l'arrivée des véhicules autonomes. En effet, selon la Figure 3.22, les capteurs du système autonome généreront un nombre considérable de données : les caméras entre 20 et 40 Mb/s, les RADARs jusqu'à 100 kb/s, les sonars de 10 à 100 kb/s, le GPS environ 50 kb/s et LiDAR entre 10 et 70 Mb/s.

En une journée, une VA générerait approximativement 4000 Gb (*pm* 167 Gb/h), ce qui correspond aux données échangées par presque 3000 personnes en considérant les prévisions pour 2020. Une partie de ces informations, estimée à 25 Gb/h, seraient stockées dans des data centres [88]. C'est pour cette raison que Ford a investi plus de 200 millions USD dans de nouveaux centres de stockage au Michigan pour supporter l'arrivée de ses véhicules autonomes [89].

Ces chiffres motivent d'autant plus le choix proposé par McKinsey (voir la Figure 3.20) qui évite l'utilisation du LiDAR, qui produit des quantités de données bien plus importantes que le RADAR.

Pour continuer le parallèle avec le pétrole, qui a transformé notre monde ces dernières décennies, les *Big Data* changeront notre monde pour les prochains siècles. Outre les données liées aux capteurs ou à la circulation, des données personnelles seront également échangées, stockées et traitées et pourraient permettre la publicité ciblée : le nombre de personnes dans la voiture, les préférences musicales de chacun ou même les magasins que les passagers préfèrent afin d'afficher les promotions sur l'ordinateur de bord lorsque le véhicule se trouve à proximité de ceux-ci [90]. D'autres capteurs permettront aussi de surveiller les comportements des passagers, leurs statuts biométrique et émotionnel [91]. Ainsi, une *guerre des données* sera lancée : ceux qui en auront le plus pourront développer et délivrer la meilleure expérience utilisateur.

C'est pourquoi des compagnies comme Intel investissent des millions dans le développement d'intelligence artificielle et le traitement de données pour créer de la valeur à partir de celles-ci.

Outre les capteurs d'assistance à la conduite avancée (Advanced Driver Assistance System, *ADAS*) dont le fonctionnement a été étudié à la Section précédente, les VA embarqueront des technologies sophistiquées : superordinateurs, des interfaces humain/machine comme de grands écrans 4K/8K ou bien l'affichage *Head-Up Displays*. Ces systèmes généreront eux aussi un grand nombre de données, comme représenté à la Figure 3.23. Tous ces systèmes nécessiteront des supports électroniques sophistiqués tels que circuits et câbles à haute vitesse.

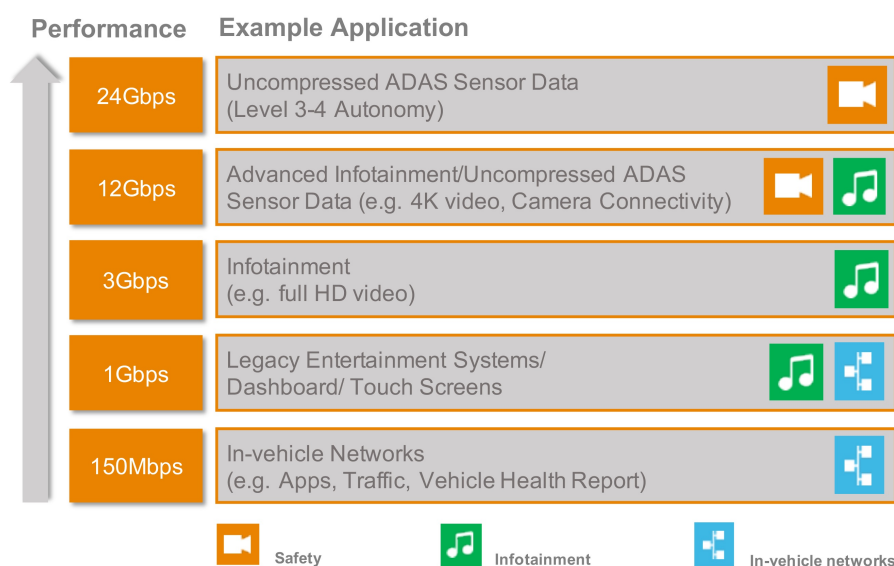


FIGURE 3.23 – Augmentation des échanges de données [42].

L'intérieur d'une VA peut être représenté comme une autoroute d'informations, où des flux de données transitent en parallèle. Le challenge des constructeurs automobiles sera d'augmenter continuellement la bande passante de ces échanges de données entre les composants internes de la voiture, et entre la voiture et son environnement. Des sociétés telles que *Aquantia* et *TE Connectivity* aident les constructeurs à atteindre ces objectifs en développant des solutions de connectivité capables d'atteindre des hauts débits de plusieurs gigabytes. Pour relier les composants internes à la voiture, une possibilité serait d'utiliser des systèmes sans fil, bien que ceux-ci peuvent entrer en interférence avec d'autres ondes radio, et ils sont également plus sujets aux menaces de sécurité. Selon la firme de semi-conducteurs *Aquantia*, la fibre optique aurait également pu être une bonne alternative, car elle offre des débits d'échanges de données très élevés ainsi que des câbles légers. Cependant, elle est très chère et fragile : humidité, vibration et poussières dans ses connecteurs peuvent mener à des pertes de signaux. Plusieurs tests ont été effectués, avec des résultats très mitigés, ce qui pousse les constructeurs à abandonner cette idée. *Aquantia* s'est alors récemment allié avec *Sumitomo Electric* et développent ensemble le *Multi-Gig Ethernet for copper*, qui supporterait un débit jusqu'à 100 Gb/s [92].

3.5 Effets de la multiplication des communications

Nous avons analysé la façon dont les VA interagissent entre elles et avec leur environnement, ainsi que les technologies impliquées et les échanges de données qui en résultent.

L'objectif de cette section est de mettre en évidence les possibles effets de la multiplication des champs électromagnétiques. En effet, l'arrivée de la 5G et de ses ondes à très hautes fréquences qui se rajouteront aux ondes actuelles peuvent avoir des répercussions néfastes sur l'humain et sur l'environnement. Si les plans de l'industrie pour la 5G se concrétisent, personne ne pourrait se soustraire aux dangers d'une exposition permanente à des niveaux de rayonnement qui sont nettement supérieurs à ceux d'aujourd'hui. Cela risquerait d'avoir des effets graves et irréversibles sur les êtres humains et de causer des dommages permanents à tous les écosystèmes terrestres [93].

3.5.1 Effets sur l'environnement

Bien qu'à ce jour peu de recherches scientifiques existent à ce sujet, les ondes millimétriques associées à la 5G impacteraient la faune et la flore. Des études montrent que ces radiations peuvent altérer la navigation des oiseaux et perturber les colonies d'abeilles [94, 95]. D'autres recherches pointent des effets sur les arbres et les plantes [96]. Des ondes aux fréquences similaires à celles de la 5G sont déjà utilisées pour tuer les insectes dans des réserves de grains [97, 98], étant donné qu'ils absorbent jusqu'à 100 fois plus de rayonnement à des ondes millimétriques qu'ils ne le font aux longueurs d'onde actuellement en usage. Sachant que les populations d'insectes volants ont décliné de 75 % à 80 % depuis 1989, le rayonnement de la 5G pourrait avoir des effets catastrophiques sur les populations d'insectes à travers le monde [99].

Plus spécifiquement, des chercheurs [99] ont simulé l'absorption des champs électromagnétiques par différents insectes en fonction de la fréquence d'émission, grâce à une technique non invasive de microtomographie aux rayons X. Cette méthode permet de reconstruire une image en trois dimensions de chaque échantillon étudié. Ils ont montré que la puissance absorbée augmente avec la fréquence, qui varie de 2 à 6 GHz dans cette simulation avec un champ électrique de 1 V/m.

Les dimensions des insectes étudiés sont reprises dans le Tableau 3.2 et les résultats de la recherche sur le graphe de la Figure 3.24.

Insecte	L (mm)	W (mm)	H (mm)	D (mm)	λ_{max} (mm)
Scarabée	8,01	4,5	4,29	10,14	5-24
Abeille Australienne	4,81	3,39	3,99	7,16	2,5-12,5
Abeille domestique	11	4,154	4,044	12,43	12,5-50
Criquet	54,99	18,49	17,55	60,61	25-100

L, W, H représentent respectivement la longueur, la largeur et la hauteur de l'insecte. D est la longueur de la diagonale de la brique de dimensions L x W x H. La dernière colonne répertorie la plage de longueur d'onde pour laquelle le maximum $P_{abs}(\lambda_{max})$ est situé.

TABLEAU 3.2 – Dimensions des modèles d'insectes étudiés [99].

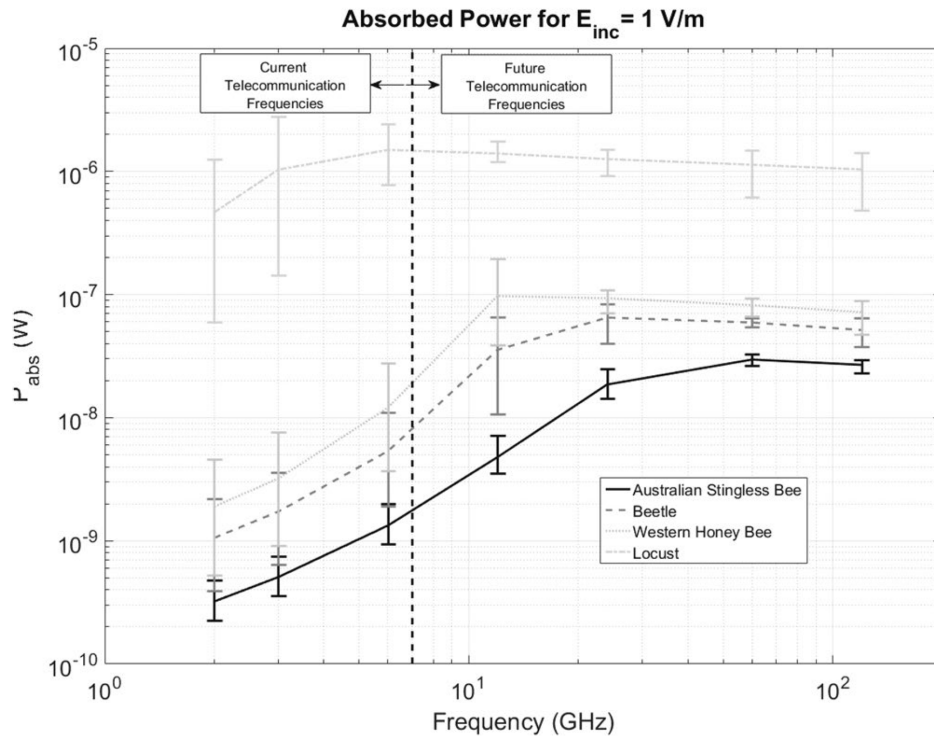


FIGURE 3.24 – Puissance absorbée en fonction de la fréquence par les insectes étudiés pour une intensité de champ incident de 1 V/m [99].

Comme observé à la Figure 3.24, la fréquence qui implique la puissance maximale absorbée dépend de la taille de l'insecte. En effet, la fréquence détermine la longueur des ondes émises, et les insectes ayant une taille similaire rentreront en résonance avec elles. Le criquet (*Locust*), qui est le plus grand insecte de cette étude, possède un maximum d'absorption à 6 GHz tandis que l'abeille australienne, le scarabée et l'abeille domestique ont un maximum à des fréquences au-dessus de 6 GHz.

Le Tableau 3.3 compare l'absorption moyenne de puissance dans le cas où le champ électrique de 1 V/m est réparti sur les fréquences de 2, 3 et 6 GHz ainsi que le cas où 10 % de ce champ est distribué sur des fréquences supérieures à 6 GHz.

Insecte	Abeille australienne	Scarabée	Abeille domestique	Criquet
P_{abs} [nW] avec champ électrique incident distribué sur les fréquences 2, 3 et 6 GHz	0,71	2,6	5,7	990
P_{abs} [nW] si 10 % du champ électrique incident est distribué sur des fréquences supérieures à 6 GHz	2,6	7,7	14	1000
Augmentation de la puissance absorbée	370 %	290 %	240 %	3 %

TABLEAU 3.3 – Augmentation de la puissance absorbée pour un décalage vers des fréquences plus élevées [99].

Cette étude confirme que l'absorption de puissance par les insectes est considérable pour les ondes millimétriques. D'autres recherches sont cependant nécessaires pour en étudier les potentiels dangers : il faudrait analyser les conséquences de l'échauffement dû à l'absorption d'énergie sur leur comportement et leur physiologie et étendre l'étude à une plus grande variété d'espèces.

3.5.2 Effets sur la santé

Des controverses existent en ce qui concerne les effets des télécommunications sur l'humain. En effet, il a été prouvé que l'absorption de champs électromagnétiques entraîne une élévation de la température des tissus [100]. Deux variables d'intérêt existent pour mesurer ces radiations : la densité de puissance, exprimée en Watt par mètre cube (W/m^3) et le débit d'absorption spécifique (DAS), exprimé en Watt par kilogramme (W/kg). Plus faible est l'indice DAS d'un appareil radioélectrique, moins celui-ci a le potentiel d'être dangereux pour la santé, car les tissus de l'utilisateur reçoivent moins d'énergie. Cet indice est alors utilisé pour vérifier la conformité d'un produit avant sa sortie.

Dans le cas de la 5G et des ondes millimétriques, l'absorption d'énergie dans une zone peu profonde provoque un réchauffement plus rapide, car elle pénètre plus facilement dans le corps. Comme observé à la Figure 3.25, la profondeur de pénétration diminue si la fréquence augmente.

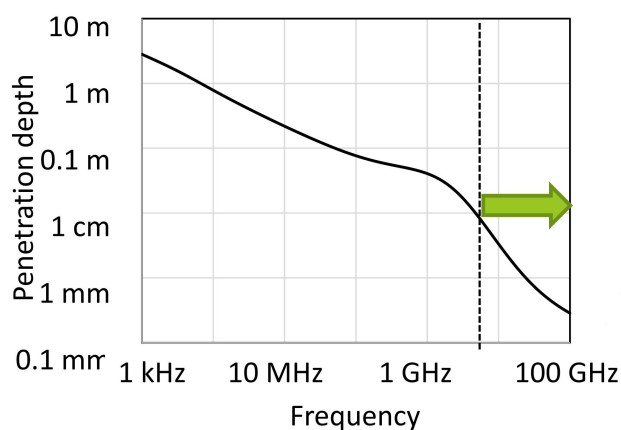


FIGURE 3.25 – Dépendance de la longueur de pénétration des ondes avec la fréquence [101].

Une étude menée par la vice-présidente de l'Association médicale du comté de Santa Clara en Californie, Dr Cindy Russell, rassemble une grande partie de la documentation scientifique sur les risques liés à la 5G [102]. Les différents effets cités sont : variabilité du rythme cardiaque, effets sur les bactéries, résistance aux antibiotiques, effets sur le système immunitaire, effets sur la chromatine (structure d'ADN), effets tératogènes (production de malformations), altération de l'expression des gènes et cataracte... Quelques-unes de ces recherches sont brièvement exposées.

Dans un article datant de 1998, Pakhomov [103] a réuni les effets biologiques des ondes millimétriques. Il a revu des douzaines d'études et cite des recherches démontrant de profonds effets sur tous les systèmes biologiques, incluant les cellules, les bactéries, les insectes, les animaux et les humains, avec pour chacun des effets variables. En raison de la pénétration peu profonde de ces ondes millimétriques, les yeux et la peau de l'humain sont au centre des préoccupations. De fait, une élévation de la température se produit plus rapidement, avec moins de dissipation. Cet effet superficiel peut être relativement important pour un organisme, car la stimulation des récepteurs de la peau peut affecter les informations nerveuses, causant ainsi une réponse du corps entier avec des effets physiologiques sur le rythme cardiaque et le système immunitaire.

Potekhina [104] montre que certaines fréquences de la bande 53-78 GHz changent la variation naturelle du rythme cardiaque chez les rats anesthésiés. Certaines fréquences ne produisaient aucun effet (61 ou 75 GHz), alors que d'autres (55 et 73 GHz) causaient une arythmie prononcée. Il n'y avait aucun changement de température de la peau ou du corps.

En 1994, Prost [105] étudie l'effet de l'irradiation des ondes millimétriques sur les yeux. Il note que diverses longueurs d'onde peuvent induire le développement de cataractes. Sa recherche démontre que l'exposition à de faibles puissances d'ondes millimétriques, de l'ordre de 10 mW/cm^2 , opacifie le cristallin chez les rats exposés, indicateur prédisposant aux cataractes.

Enfin, Hazaubit [106] a examiné en 2013 l'expression des gènes dans les keratinocytes (cellules de la peau, des ongles, des poils et des cheveux) en les exposant à 60 GHz. Il conclut que le nombre élevé de gènes modifiés révèle que la limite actuelle de l'ICNIRP (Commission internationale sur la radioprotection non ionisante) est probablement trop permissive pour empêcher les réponses biologiques.

Le SCHEER (*European Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks*) prend aussi très au sérieux les possibles effets de la 5G sur la santé et sur l'environnement [107] :

"5G networks will soon be rolled out for mobile phone and smart device users. How exposure to electromagnetic fields could affect humans remains a controversial area, and studies have not yielded clear evidence of the impact on mammals, birds or insects. The lack of clear evidence to inform the development of exposure guidelines to 5G technology leaves open the possibility of unintended biological consequences."

Des scientifiques du monde entier ont publié une déclaration (*5G Appeal*) adressée aux Nations Unies appelant à un moratoire sur la multiplication des *Smart Cells* 5G, invoquant des effets sur la santé humaine et sur la faune. Cet appel a été signé par 240 scientifiques, présents dans 42 pays, dont la Belgique [108] :

"We recommend a moratorium on the roll-out of the fifth generation, 5G, for telecommunication until potential hazards for human health and the environment have been fully investigated by scientists independent from industry... RF-EMF has been proven to be harmful for humans and the environment."

Dans le but d'encadrer le mieux possible le développement de la 5G, ces différents scientifiques ont établi une charte [108] :

- Protéger les enfants et les femmes enceintes des radiations électromagnétiques ;
- Réévaluer les normes de sécurité fondées sur le long terme aussi bien que celles à court terme portant sur les conséquences biologiques ;
- Encourager les fabricants à développer des technologies plus respectueuses de l'humain et de l'environnement ;
- Créer une agence scientifique multidisciplinaire indépendante chargée de développer des règles de sécurité appropriées, des tests ainsi que des études de précommercialisation, dans un environnement transparent permettant la participation citoyenne ;
- Informer les consommateurs des risques potentiels pour la santé liés à l'énergie électromagnétique et enseigner les stratégies de réduction des effets secondaires ;
- Informer les professionnels de la santé des effets biologiques de l'énergie électromagnétique et leur dispenser une formation sur le traitement des patients présentant une sensibilité électromagnétique ;
- Inciter les gouvernements à financer la formation et la recherche sur l'impact des champs électromagnétiques sur la santé et exiger la coopération de l'industrie avec les chercheurs ;

Pour finir, d'autres recherches scientifiques sur les effets des rayonnements électromagnétiques existent. Nous en exposons quelques-unes sans entrer dans les détails, en laissant le soin au lecteur de consulter les références associées :

- Effets sur la santé humaine : altération de l'expression génétique [109], altération du métabolisme [110], altération du développement des cellules souches [111], déficience cognitive [112], lésions de l'ADN [113], incidence sur le bien-être général [114], développement de cancers [115], difficultés d'apprentissage et pertes de mémoire [116], infertilité et altération de la qualité du sperme [117], fausse couche [118], dommage neurologique [119], obésité et diabète [120], stress oxydant [121] ;
- Effets sur les jeunes enfants : autisme [122], trouble d'hyperactivité avec déficit de l'attention (THADA) [123], asthme [124] ;
- Effets sur la faune et la flore : les fourmis [125], les oiseaux [126], les forêts [127], les grenouilles [128], les abeilles [129], les insectes [99], les mammifères [130], les souris [131], les végétaux [132] ;

Chapitre 4

Matériaux et énergie

Dans ce chapitre, l'analyse est portée sur les matériaux, aussi bien au niveau du châssis qu'au niveau du moteur et des batteries, ainsi que sur l'impact énergétique des VA.

Pour rappel, notre cas d'étude concerne les VA de niveau 5 (autonomie complète) propulsées par un moteur électrique. Cette situation étant encore loin d'une commercialisation à grande échelle, il est difficile d'estimer avec précision leurs impacts susmentionnés. Dès lors, nous divisons l'étude en deux parties.

Tout d'abord, nous commençons par nous intéresser aux conséquences qu'aurait un passage à une flotte automobile 100 % électrique, au niveau des matériaux et au niveau du réseau électrique.

Ensuite, nous analysons les impacts supplémentaires qu'apporteraient les aspects *autonomes* et *connectés*, qui sont principalement liés aux systèmes de communication (5G, RADAR, LiDAR, superordinateur, etc.) et leurs différentes implications, tels que décrits dans le chapitre précédent.

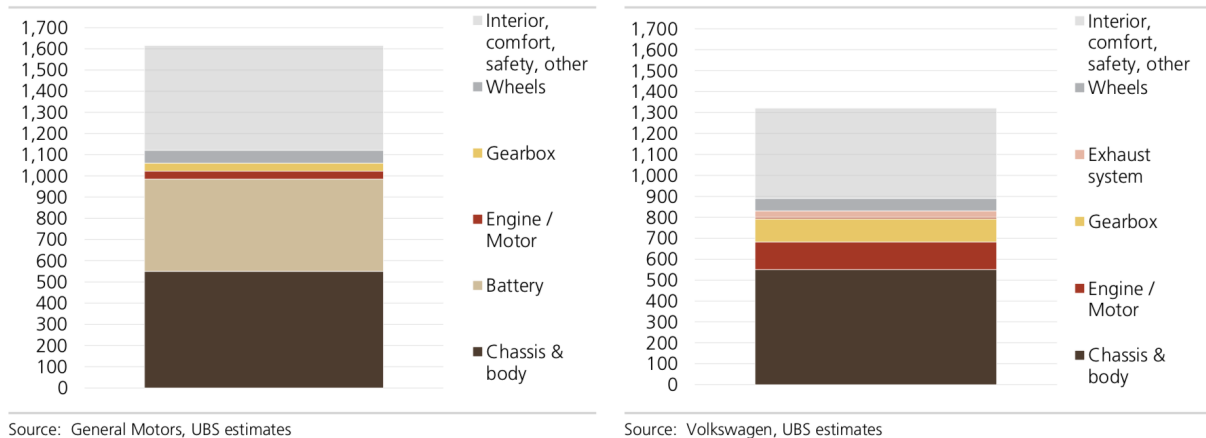
Enfin, une comparaison de la consommation d'électricité d'une VE et d'une VA sera établie.

4.1 Passage à un parc 100 % électrique

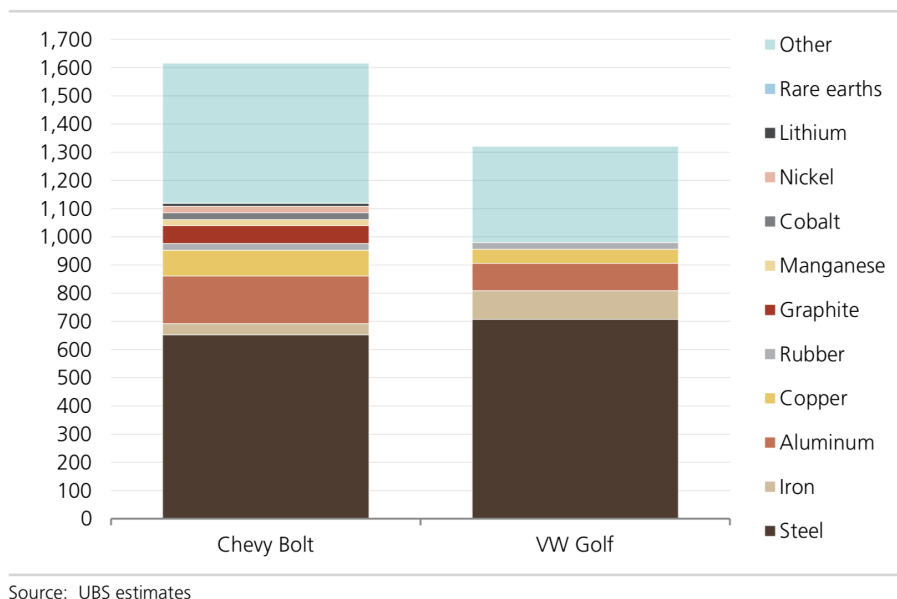
Tout au long de cette section, nous nous intéressons aux VE : les matériaux qui les composent, les technologies de batteries embarquées et leurs possibilités de recyclage, et enfin leur connexion au réseau électrique.

4.1.1 Impacts sur la demande des métaux : comparaison entre un véhicule thermique et un véhicule électrique

Pour commencer l'analyse sur les conséquences d'un passage à un parc entièrement électrique, les évolutions attendues en ce qui concerne la demande des métaux sont exposées. Pour ce faire, les résultats d'une étude de UBS (*Union Bank of Switzerland*) sortie en mai 2017 et qui compare deux voitures populaires sont repris. L'une est équipée d'un moteur électrique (Chevrolet Bolt) et l'autre d'un moteur à combustion interne (Volkswagen Golf) [133].



(a) Composants de la Bolt (à gauche) et de la Golf (à droite).



(b) Matériaux de la Bolt (à gauche) et de la Golf (à droite).

FIGURE 4.1 – Répartition de la masse (kg) [133].

L'étude indique que, comparée à la Golf, la VE contient 70 % d'aluminium en plus (principalement pour le châssis et la batterie), 80 % de cuivre en plus (pour les bobines du moteur, les différents câblages électriques et le pack de la batterie), 7 % d'acier en moins, 60 % de fer en moins, 100 % de métaux précieux en moins (en particulier du platine, utilisé dans les catalyseurs pour traiter les émissions des moteurs à combustion) et la même quantité de caoutchouc. Sa batterie contient 140 kg de matériaux divers (nickel, cobalt, lithium, manganèse, graphite, etc.) et il y a environ 1 kg de terres rares dans le moteur, en particulier du néodyme et du dysprosium, utilisées pour construire les aimants permanents. La masse totale de la Bolt est supérieure de 22 %, principalement à cause de la batterie, et est répartie entre les différents composants selon les Figures 4.1a et 4.1b.

Ainsi, un passage à une flotte de voitures 100 % électriques aurait un impact significatif sur les marchés de l'aluminium, du cuivre, des métaux précieux, des terres rares et des matériaux constituant la batterie, qui seront détaillés dans la sous-section 4.1.2 sur les matériaux critiques.

La Figure 4.2 représente comment les marchés des matériaux seraient influencés si 100 % des véhicules vendus dans le monde étaient des Chevrolet Bolt. Ceux du lithium, du cobalt, des terres rares et du graphite seraient les plus impactés du côté positif, les métaux du groupe Platine du côté négatif. De plus, un usage plus élevé de plastiques (à base de polymères ou de polyester) est attendu, notamment pour construire le capot supérieur du bloc-batterie.

L'analyse faite par UBS sur les batteries tient compte des technologies actuelles. Il est attendu que les générations futures utilisent significativement moins de cobalt et de manganèse, comme nous l'expliquerons dans la sous-section 4.1.3 sur les batteries.

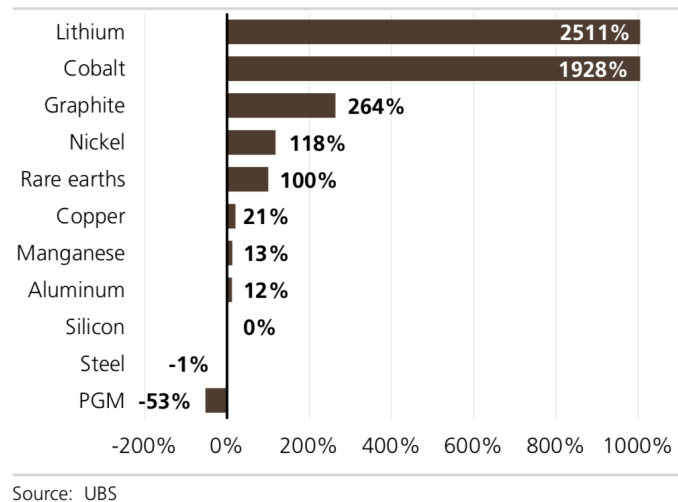


FIGURE 4.2 – Évolution de la demande en matériaux pour une flotte constituée entièrement de Bolt [133].

Enfin, toujours selon l'étude d'UBS, le moteur électrique est plus avantageux que le moteur à combustion interne : il y a moins de complexité mécanique et moins de pièces mobiles d'usure, le couple produit est plus élevé et linéaire, le temps de réponse est plus court, il n'y a pas d'émissions locales, les plages de régimes utilisables sont plus larges, et il n'y a pas de problèmes de démarrage à froid. De plus, les composants supplémentaires nécessaires pour remédier aux faiblesses du moteur à combustion telles qu'une boîte de vitesses complexe, un embrayage, un démarreur et un post-traitement des émissions disparaissent. Le groupe moteur de la Bolt est de ce fait beaucoup plus simple que celui de la Golf d'un point de vue mécanique, ce qui le rend également plus durable dans le temps.

En ce qui concerne son rendement, défini comme le travail qu'il produit par rapport à l'énergie électrique qu'il reçoit, il est généralement supérieur à 85 % (rendement maximal entre 92 et 95 %) [134]. En comparaison, le rendement thermique d'un moteur à combustion interne est d'environ 40 %, en fonction du type d'injection, du type de carburant utilisé, de la recirculation des gaz d'échappement, etc. et peut atteindre dans certains cas 44 %, comme c'est le cas pour le moteur Mazda Skyactiv-X [135].

Cependant, le calcul du rendement du moteur électrique ne tient pas compte de l'efficacité du contrôleur du moteur (qui convertit le signal DC en AC, rendement d'environ 95 %), du rendement chimique de la batterie (98 % pour les batteries lithium-ion), du rendement de transmission entre la centrale électrique jusqu'au point de chargement de la voiture (qui varie largement, bien qu'assez élevé), du rendement de production de la centrale électrique (qui dépend du type de centrale), etc.

4.1.2 Impacts sur la demande des matériaux critiques

Le passage à un parc automobile entièrement électrique entraînerait une augmentation de la demande en matières premières critiques. Elles sont définies par la Commission européenne (CE) comme étant celles qui présentent "*un risque particulièrement élevé de pénurie d'approvisionnement dans les dix prochaines années, et qui jouent un rôle particulièrement important dans la chaîne de valeur*" [136]. En somme, ces matières peuvent entraîner des impacts industriels ou économiques négatifs importants liés à un

approvisionnement difficile, sujet à des aléas.
Elles sont représentées dans le graphe de la Figure 4.3.

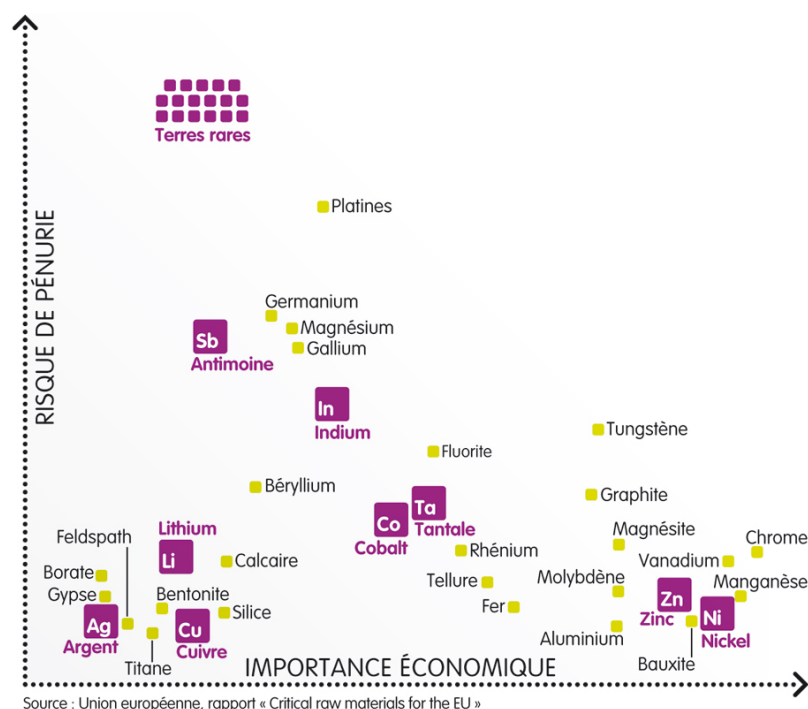


FIGURE 4.3 – Matières premières critiques définies par la CE (2017) [137].

Pour les VE, ces matières se retrouvent principalement dans la batterie lithium-ion (cobalt, graphite, lithium, etc.) et dans les aimants permanents du moteur (terres rares : néodyme, praséodyme et dysprosium). Le déploiement en masse des VE, et à terme, des VA, suscite alors de nombreuses interrogations concernant la disponibilité de ces métaux. Toutefois, les réserves actuelles indiquent que les principaux métaux critiques indispensables pour la construction des batteries ne risquent pas de limiter la production de ces voitures, mais que des contraintes d'approvisionnement à court terme pourraient avoir lieu si le marché croît trop rapidement.

Concernant le cobalt, qui provient en grande partie des minerais de nickel et de cuivre, les réserves des trois principaux pays producteurs (la République Démocratique du Congo [RDC], l'Australie et Cuba) sont estimées à 5 millions de tonnes [138], alors qu'aujourd'hui, un peu moins de 45 000 tonnes sont utilisées pour la production de batteries. Cependant, son extraction est extrêmement concentrée : en 2017, la RDC représente à elle seule près de 60 % de la production mondiale [139] et, selon l'UNICEF et Amnesty International, environ 40 000 enfants y sont impliqués et ne gagnent qu'un à deux dollars par jour [140]. La demande n'a cessé d'augmenter depuis l'arrivée des véhicules électriques (hausse annuelle de 3 à 4 % depuis 2010) ce qui accroît son prix et ce qui motive les constructeurs à en réduire la quantité dans les batteries. Il est dès lors essentiel de trouver une alternative qui assurera une diminution du coût et des contraintes liées à son extraction. Le recyclage des batteries pourrait constituer une solution **sur le long terme**, car étant donné la durée de vie assez longue des batteries Li-ion, les composants métalliques seront *bloqués* dans les véhicules pendant au moins une dizaine d'années [141].

Les réserves de graphite sont, quant à elles, de l'ordre de 250 millions de tonnes [142] alors que leur demande pour la fabrication de batteries atteindra les 250 000 tonnes d'ici 2020 [143]. Par ailleurs, il est possible de créer du graphite de façon synthétique, même si cette option est plus chère par rapport au graphite naturel (jusqu'à 50 % en plus). Cela présente l'avantage de pouvoir répondre rapidement aux besoins en cas de fortes fluctuations des prix du matériau naturel. De plus, cette source est plus diversifiée,

avec notamment une production de graphite synthétique de 130 000 tonnes par an aux États-Unis [144].

Les terres rares sont ainsi qualifiées car elles sont difficiles à exploiter. En effet, elles ne se trouvent pas dans des concentrations suffisamment élevées pour permettre une extraction rentable. Alors que la production moyenne annuelle s'élevait à 135 650 tonnes en 2014 avec plus de la moitié destinée à la construction d'aimants permanents, l'estimation des réserves mondiales est de plus de 80 millions de tonnes [145].

L'extraction du nickel, dont les principaux pays producteurs sont les Philippines, la Russie, le Canada et l'Australie, s'élevait à 2,5 tonnes en 2016 [146] alors que les réserves sont estimées à plus de 78 millions de tonnes [147]. Cependant, la construction des cathodes des batteries requiert du nickel de *classe I*, très pur en minerai (99,98 % contre 2 à 35 % pour le nickel de *Classe II*) afin de le transformer en sulfate de nickel par dissolution dans de l'acide sulfurique [144]. Le nickel de *classe I* ne représente que 40 % de la production totale et il est prévu que ce pourcentage n'augmente pas dans les années à venir, comme représenté à la Figure 4.4.

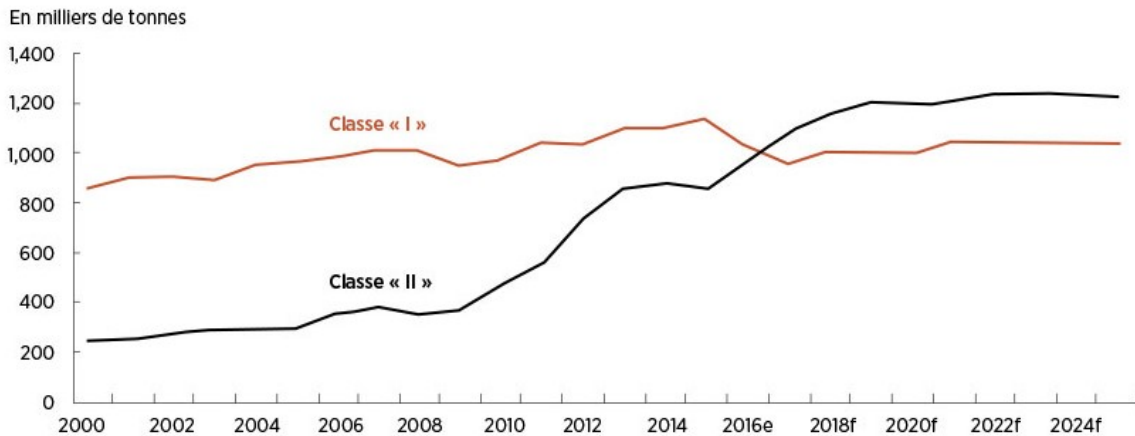


FIGURE 4.4 – Répartition de la production mondiale de nickel (prévisions) [144].

Enfin, la production de lithium s'élevait à 35 000 tonnes en 2016, alors qu'une étude américaine estime les ressources mondiales de ce matériau à environ 40 millions tonnes [148]. Selon des analystes de Bloomberg et de Deutsche Bank, même si le marché du lithium triplait, ces réserves pourraient durer environ 185 ans [149].

En revanche, pour atteindre une tonne de lithium, l'Amérique latine utilise 750 tonnes de saumure, matériau de base du lithium, et ajoute 24 mois de préparation. Ce processus utilise beaucoup d'eau et d'énergie. En effet, la production de 0,05 à 1 mg de lithium nécessite 1 litre d'eau salée ou d'eau minérale [150]. Les zones riches en lithium étant souvent arides, cela augmente le coût de l'exploitation minière. Les conditions sèches et salées peuvent, de plus, nuire à la santé humaine.

Ces chiffres suggèrent que la **disponibilité** de ces matériaux ne compromettrait pas le passage aux véhicules électriques. Leur qualification de matériaux *critiques* est plutôt liée aux risques et aux conditions de l'approvisionnement, étant donnée la situation géopolitique de certains de ces pays producteurs. Le cobalt est sans doute le métal le plus controversé. Avec une production et des réserves très concentrées géographiquement, dans une zone dont l'équilibre politique et le respect de normes sociales et environnementales sont régulièrement remis en doute, la stabilité des approvisionnements pourrait être difficile à assurer si l'extraction de ce matériau n'est pas diversifiée à l'avenir. De plus en plus de voix s'élèvent en RDC pour réclamer la renationalisation des ressources naturelles du pays, estimant ne pas être correctement rémunérées pour l'exploitation qui est faite par les sociétés privées [151]. À cela s'ajoute le fait que le cobalt est généralement extrait des minerais de nickel et de cuivre, ce qui rend le développement

de son extraction dépendant d'autres secteurs d'activité.

Autre exemple marquant, le graphite qui provient actuellement presque exclusivement de Chine, qui fournit également près de 80 % des terres rares pour la construction du moteur électrique [152]. Ce quasi-monopole chinois implique une certaine instabilité au niveau de l'offre et des prix, comme cela a été le cas en 2010 avec une hausse importante des prix à cause de l'imposition de restrictions à l'exportation de terres rares [153].

Les principaux pays producteurs du lithium, du graphite et du cobalt sont représentés à la Figure 4.5. Ces chiffres proviennent de la base de données de *Granta Design* (2018).

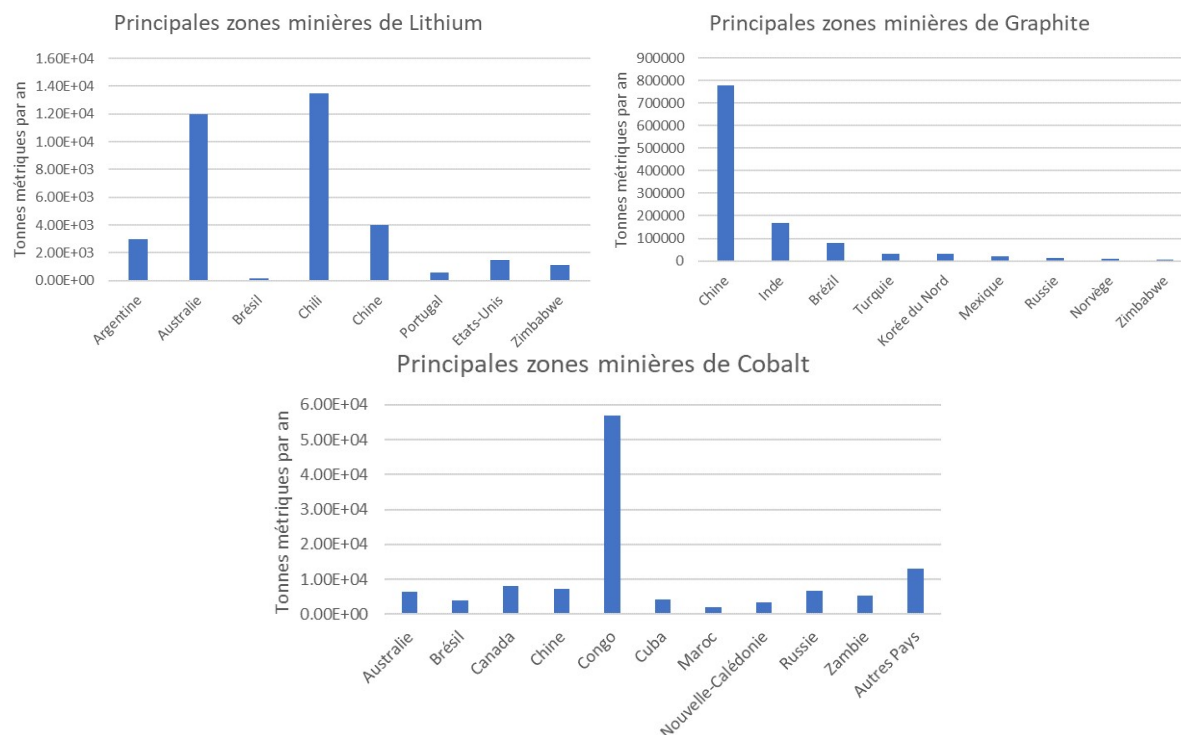


FIGURE 4.5 – Pays producteurs du lithium, graphite et cobalt [154].

Le manque de diversité des fournisseurs est une préoccupation pour l'Union européenne. Les accords commerciaux sont donc importants pour assurer la disponibilité des matériaux et pour éviter une forte dépendance des pays producteurs, comme c'est le cas aujourd'hui avec le pétrole.

Afin d'assurer un approvisionnement durable et d'éviter une dépendance technologique vis-à-vis de ses concurrents, l'Europe a créé en 2017 la *European Battery Alliance* [155]. L'objectif est de créer une chaîne de valeur de fabrication compétitive et durable des cellules de batterie. Plus spécifiquement, les objectifs de cette alliance sont les suivants [155].

- Sécuriser l'accès aux matières premières en provenance de pays riches en ressources situés en dehors de l'UE, faciliter l'accès aux sources européennes de matières premières ainsi que l'accès aux matières premières secondaires par le recyclage dans une économie circulaire des batteries ;
- Soutenir la fabrication à grande échelle de cellules de batterie européennes et une chaîne de valeur compétitive en Europe : rassembler les principaux acteurs du secteur et les autorités nationales et régionales ; travailler en partenariat avec les États membres et la Banque européenne d'investissement pour soutenir des projets de fabrication innovants présentant d'importantes dimensions transfrontalières et durables dans l'ensemble de la chaîne de valeur des batteries ;

- Renforcer le leadership industriel en renforçant l'aide de l'UE en matière de recherche et d'innovation aux technologies avancées (par exemple, au lithium-ion) et perturbatrices (par exemple, à l'état solide) dans le secteur des batteries. Cela devrait cibler le soutien à toutes les étapes de la chaîne de valeur (matériaux avancés, nouvelles chimies, procédés de fabrication, systèmes de gestion des batteries, recyclage, innovations du modèle commercial), être étroitement intégré à l'écosystème industriel et contribuer à accélérer le déploiement et l'industrialisation des innovations ;
- Développer et renforcer une main-d'œuvre hautement qualifiée dans tous les maillons de la chaîne de valeur des batteries afin de combler le déficit de compétences par des actions au niveau de l'UE et des États membres, offrant une formation adéquate, le recyclage et l'amélioration des compétences, et faire de l'Europe un site attractif pour les experts du monde entier en développement et production de batteries ;
- Soutenir la durabilité de l'industrie de fabrication de cellules de batterie de l'Union européenne avec l'empreinte environnementale la plus faible possible, par exemple en utilisant des énergies renouvelables dans le processus de production. Cet objectif devrait notamment être mis en œuvre en fixant des exigences pour une production de batteries sûre et durable.

D'autres matériaux critiques susceptibles d'être intégrés aux VA sont les terres rares. En effet, elles sont utilisées pour la construction des aimants permanents NdFeB des moteurs synchrones. Plus spécifiquement, il y a du néodyme (Nd) en grande quantité, du praséodyme (Pr), et du dysprosium (Dy) comme additif pour améliorer la coercivité à haute température.

Plusieurs raisons expliquent le choix du moteur synchrone à aimants permanents [156] :

- Le champ magnétique intense généré par les aimants NdFeB permet une conception du moteur légère et compacte ;
- Le rendement élevé, car aucun système d'alimentation externe n'est nécessaire pour induire un champ magnétique dans le rotor. Le champ magnétique est fourni par les aimants permanents, alors que d'autres concepts de moteur nécessitent de l'électricité pour le générer ;
- Le couple fourni est élevé et facilement contrôlable.

Cependant, outre les difficultés d'approvisionnement, il est estimé que la production d'une tonne de terres rares engendre 75 tonnes de déchets acides [157]. Pour éviter des désastres environnementaux tels que la pollution des lacs avec ces déchets, il est nécessaire d'adopter des alternatives à l'utilisation de ces matériaux dans les moteurs. Par exemple, pour remplacer les aimants permanents, Mercedes et Tesla font usage d'une machine asynchrone et Renault utilise une machine synchrone à excitation électrique externe. Ces deux technologies sont techniquement développées et ont de bonnes performances, mais ont une densité de puissance plus basse et une masse plus élevée que le moteur synchrone à aimants permanents.

D'autres alternatives sont encore au stade de la recherche, mais présentent un potentiel élevé pour la production en masse de moteurs électriques exempts de terres rares : remplacer les aimants NdFeB des moteurs synchrones par d'autres aimants à faible coût ; développer le moteur à réductance commutée et baisser son niveau sonore élevé dû aux très faibles entrefers ; développer les moteurs à flux transverses ; augmenter la vitesse de rotation des moteurs asynchrones, etc. [158]

L'innovation contribuera à réduire les quantités de métaux critiques utilisées dans les véhicules électriques et autonomes.

4.1.3 Technologies de batteries

De nos jours, l'une des raisons principales qui limite le taux de pénétration des véhicules électriques est liée au stockage d'énergie. En effet, il y a différents enjeux concernant les batteries au niveau de leur assemblage (extraction et utilisation des matériaux, impact carbone global, etc.), leur modulabilité pour le remplacement des cellules, leur reconditionnement et recyclage en fin de vie et par-dessus tout leur densité énergétique qui détermine l'autonomie du véhicule.

De plus, leur coût représente un pourcentage non négligeable du coût total du véhicule électrique : 33 % en 2019, estimé être réduit à 20 % en 2025 [159].

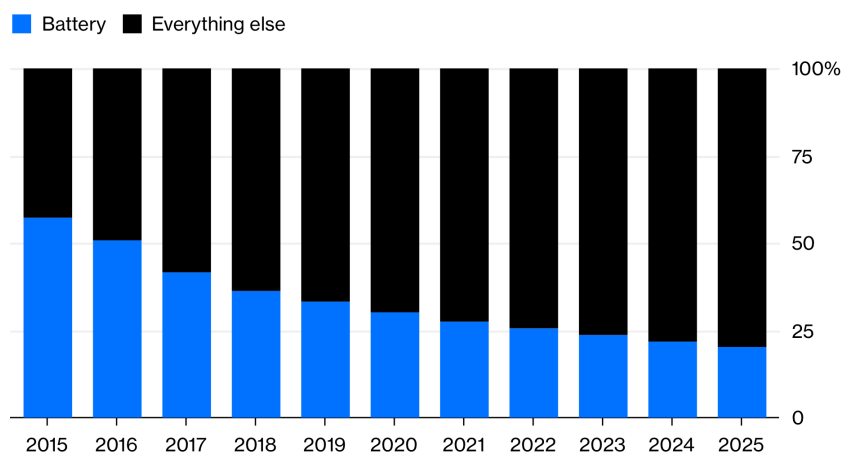


FIGURE 4.6 – Évolution attendue du prix des batteries Li-ion des voitures électriques [159].

Dans cette partie, les principales technologies de batteries utilisées dans les VE seront comparées. Ensuite, les techniques de recyclage des Li-ion seront exposées. Enfin, les batteries en cours de développement pour atteindre une densité d'énergie plus élevée seront étudiées.

4.1.3.1 Technologies actuelles

En premier lieu, les technologies de batteries utilisées dans l'industrie automobile sont présentées [160].

- **Plomb-acide** (Pb-Acid), technologie mature et bon marché. Cependant, elle possède une faible densité énergétique, une masse élevée et n'est pas écologique. Elle a été remplacée par des batteries à base de nickel, ayant une meilleure densité d'énergie ;
- **Nickel-Cadmium** (NiCd), qui possède une plus grande densité d'énergie et une plus longue durée de vie, mais qui utilise du Cadmium, un métal lourd aux effets néfastes sur l'environnement et sur la santé humaine et animale. De plus, cette batterie a un effet mémoire affectant la capacité de charge maximale et l'empêchant d'être une bonne solution pour les véhicules électriques ;
- **Nickel-Metal-Hydrate** (NiMH) similaire à la batterie NiCd mais sans effet mémoire. Son taux d'auto-décharge mensuel très élevé (jusqu'à 30 %) ainsi que son faible rendement de charge ont limité son utilisation dans l'automobile ;
- **Lithium-ion** (Li-ion) : bonne densité d'énergie, non toxique, peut supporter la charge rapide, mais possède un coût élevé, un potentiel de surchauffe et un nombre de cycles de vie limité. C'est la technologie utilisée par les principaux constructeurs de VE (Nissan, Mitsubishi, Tesla, Chevrolet, Renault, etc.)

- **Lithium-ion Polymer** offre une plus grande durée de vie que la technologie Li-ion, mais présente une instabilité fonctionnelle à la fois en cas de surcharge et en cas de décharge de la batterie inférieure à une certaine valeur ;
- **Sodium Nickel Chloride** (NaNiCl_2), connue sous le nom de *batterie Zebra*, utilise du sel de sodium comme électrolyte et a une température de fonctionnement extrêmement élevée (de 245 à 350 °C). Elle possède une grande densité énergétique, mais présente des inconvénients liés à sa sécurité de fonctionnement (gestion thermique) et à son stockage pendant de longues périodes.

Plus spécifiquement, les principales caractéristiques techniques des batteries les plus utilisées pour équiper les véhicules électriques sont reprises dans le Tableau 4.1.

Spécifications	Plomb-acide	NiCd	NiMH	Li-ion		
				Cobalt	Manganèse	Phosphate
Densité d'énergie spécifique (Wh/kg)	30-50	45-50	60-120	150-190	100-135	90-120
Cycles de vie (80% décharge)	200-300	1000	300-500	500-1000	500-1000	1000-2000
Temps de charge rapide (h)	8-16	1	2-4	2-4	<1	<1
Tolérance de surcharge	Haute	Modérée	Faible	Faible.		
Autodécharge/mois à T° ambiante (%)	5	20	30	<10		
Température de charge (°C)	-20 à 50	0 à 45		0 à 45		
Entretien nécessaire	3-6 mois	30-60 jours	60-90 jours	Non requis		
Exigences de sécurité	Thermiquement stable	Thermiquement stable, protection par fusible		Circuit de protection obligatoire		
En usage depuis	Fin des années 1800	1950	1990	1991	1996	1999
Coûts (USD/kWh)	120-150	300-350	150-200	150-1300		

TABEAU 4.1 – Comparaison technique des principales technologies actuelles [161, 162].

Les batteries qui possèdent une densité d'énergie élevée sont préférées, car elles octroient aux véhicules une plus grande autonomie. Selon la Figure 4.7, l'avantage revient à la batterie Li-ion.

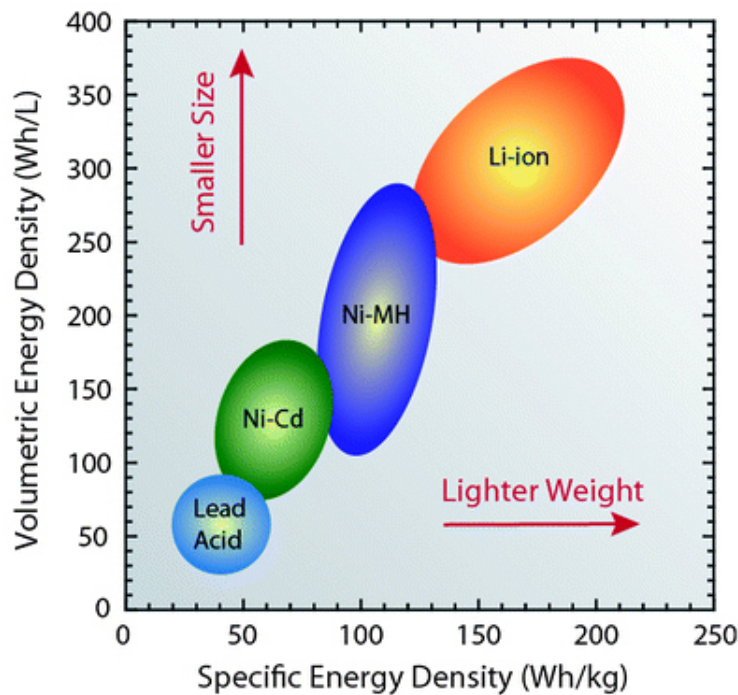


FIGURE 4.7 – La technologie Li-ion possède la plus grande densité d'énergie [163].

Pour analyser leur impact environnemental, nous nous basons sur une étude réalisée conjointement par la *Vrije Universiteit Brussel* (VUB) et l'*Université Libre de Bruxelles* (ULB), qui établit l'analyse du cycle de vie (LCA, schématisé à la Figure 4.8) de quatre types de batteries en utilisant le logiciel *SimaPro* [164].

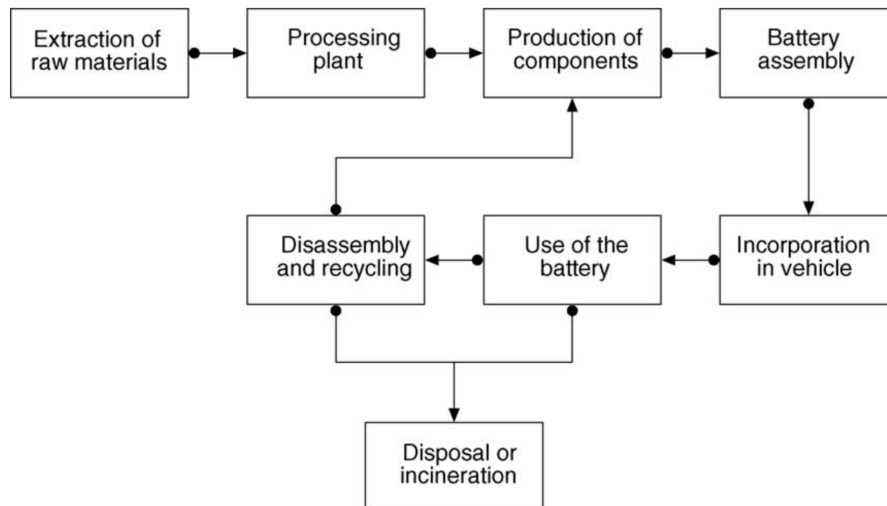


FIGURE 4.8 – Schéma du cycle de vie d'une batterie [164].

La première étape du cycle de vie représente l'extraction des matières premières. Ensuite viennent le traitement de ces matériaux et composants, l'assemblage et l'incorporation au véhicule, la phase d'utilisation de la batterie, le désassemblage et le recyclage et enfin l'élimination finale ou l'incinération. L'intérêt de cette analyse est donc d'évaluer l'empreinte carbone au travers de la consommation d'éner-

gie de ces différentes étapes, bien que cela dépende fortement de la façon dont l'électricité est produite. L'étude se base sur le mix énergétique européen actuel, mais l'empreinte carbone pourrait réduire si la part d'utilisation des modes de production renouvelables était plus importante.

En ce qui concerne l'impact environnemental du mode de production, celui de la batterie plomb-acide est le plus élevé, suivi par celui de la nickel-cadmium, la lithium-ion, la nickel-metal-hydrure et enfin la sodium nickel chloride. L'impact de cette phase est cependant compensé en grande partie par ce qui peut être récupéré grâce au recyclage. Ensuite, l'utilisation de la batterie implique des pertes d'énergie à la charge et à la décharge, et requiert de l'énergie additionnelle que le moteur électrique doit fournir pour transporter sa masse.

Enfin, en tenant compte des phases de production, d'utilisation et de recyclage, il s'avère que les batteries Li-ion et NaNiCl possèdent l'impact global le plus faible. Les résultats sont repris dans le Tableau 4.2.

	Production	Utilisation	Recyclage	Total
Pb-Acid	1091	221	-809	503
NiCd	861	303	-620	544
NiMH	945	323	-777	491
Li-ion	361	89	-172	278
NaNiCl	368	122	-256	234

TABLEAU 4.2 – Scores environnementaux (points éco-indicateurs de SimaPro) des étapes de la vie des batteries. Le score le plus élevé a l'impact le plus important [165].

Nous avons montré au travers des précédentes analyses que la batterie *lithium-ion* semble être le meilleur compromis, compte tenu de sa densité énergétique élevée, sa durée de vie, son absence de maintenance et son impact environnemental plus faible. Nous nous concentrons alors sur ce type de batterie et nous continuons notre analyse en étudiant les matériaux utilisés pour sa construction, ses possibilités de recyclage et enfin les recherches en cours pour son amélioration.

4.1.3.2 Matériaux utilisés pour la batterie Li-ion

En deuxième lieu, les matériaux utilisés pour la batterie Li-ion sont exposés.

Chaque cellule est composée de trois parties : l'anode (en graphite), l'électrolyte (sels de lithium dans un solvant organique) et la cathode pour laquelle les recherches et développements sont les plus nombreux.

Il existe deux principaux types de cathodes [144] :

- La NCA (Nickel Cobalt Aluminium), qui possède une densité énergétique de 150 à 190 Wh/kg et qui est composée d'environ 80 % de nickel. Cette cathode est utilisée par le constructeur automobile *Tesla* ;
- La NMC (Nickel Manganèse Cobalt), qui possède une densité énergétique de 100 à 135 Wh/kg, un haut niveau de stabilité et une longue durée de vie. Elle est utilisée par de nombreux constructeurs, comme *Nissan*, *Renault* et *General Motors*. Elle existe en trois déclinaisons principales, définies par le ratio entre les métaux qui la compose (en base molaire) : NMC-111, NMC-622 et NMC-811.

Le *Massachusetts Institute of Technology* a analysé la quantité de chaque métal contenue dans ces types de cathodes [166]. Les résultats sont repris dans le Tableau 4.3.

	Li	Co	Ni	Mn
NCA	0,112	0,143	0,759	0
NMC-111	0,139	0,394	0,392	0,367
NMC-622	0,126	0,214	0,641	0,200
NMC-811	0,111	0,094	0,750	0,088

TABLEAU 4.3 – Quantités des métaux présents dans les cathodes NCA et NMC (en kg/kWh) [166].

Selon le Tableau 4.3, la quantité de cobalt est plus faible pour la technologie NCA que pour la technologie NMC-111. La hausse de nickel dans la cathode NMC-811 permet d'améliorer la quantité d'énergie stockée, au détriment d'une stabilité moindre, et d'aussi diminuer la quantité de cobalt par rapport à la NMC-111 de 40 % à environ 1 %. Cela permet de répondre à sa problématique d'approvisionnement et d'éviter une forte influence du prix de ce matériau sur le prix de la batterie, comme illustré à la Figure 4.9.

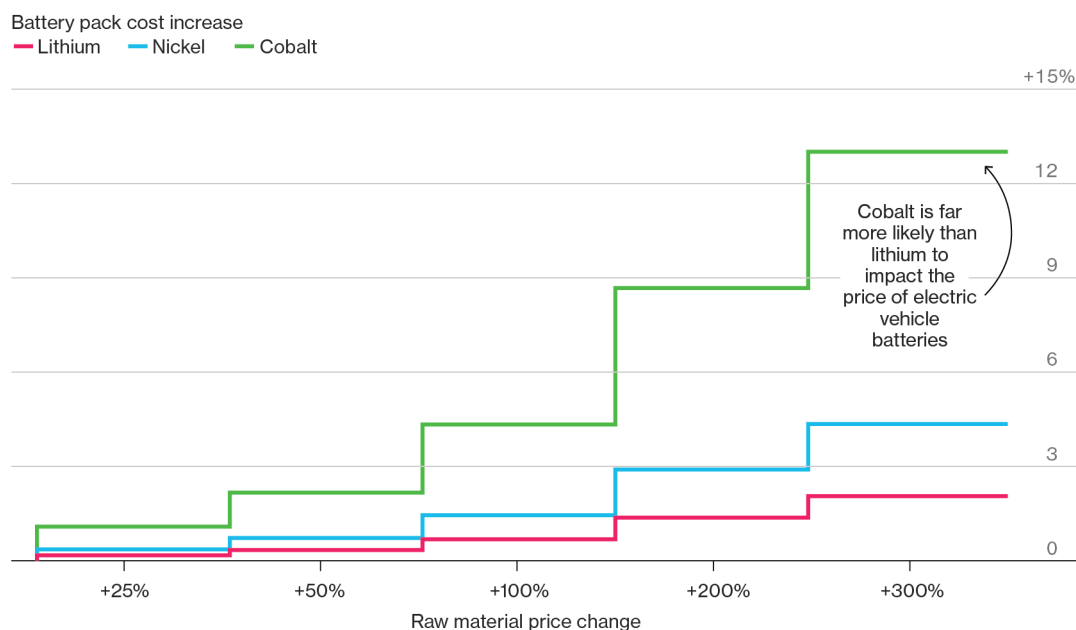


FIGURE 4.9 – Dépendance du coût de la batterie en fonction du prix de ses matériaux de base [149].

À titre d'illustration, la batterie Li-ion NMC utilisée dans la Chevrolet Bolt (modèle 2017) est considérée. Elle possède une capacité de 60 kWh avec une autonomie d'environ 380 km. Elle comprend 288 cellules, refroidies par des plaques en aluminium, le tout entouré par une protection en acier [133]. Sa masse de 140 kg est répartie selon la Figure 4.10. Nous remarquons que le lithium ne représente que 2 % de la masse totale.

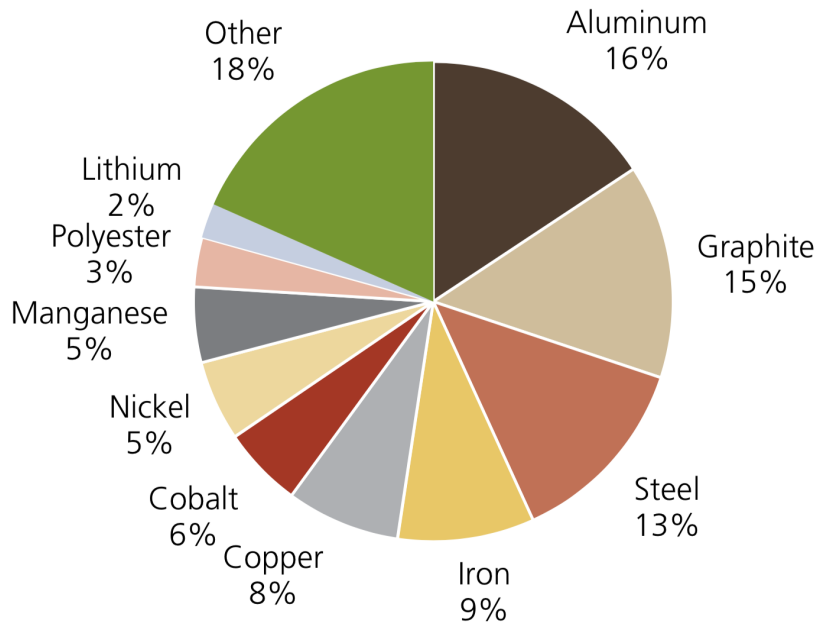


FIGURE 4.10 – Répartition de la masse de la batterie de la Bolt [133].

4.1.3.3 Recyclage de la batterie Li-ion

En troisième lieu, les solutions existantes pour la gestion de la fin de vie des batteries lithium-ion sont présentées.

Sachant que 4000 tonnes de ces batteries en fin de vie contiennent 1100 tonnes de métaux lourds et plus de 200 tonnes d'électrolytes toxiques, sans recyclage, elles constituent une menace pour l'environnement. En effet, si elles sont éliminées dans des décharges, cela peut entraîner l'infiltration de métaux lourds toxiques dans les masses d'eau souterraine. Si elles sont brûlées en tant que déchets solides, elles produisent une quantité considérable de gaz toxiques, tels que du fluorure d'hydrogène (HF) [167]. En outre, le recyclage permettrait de récupérer une partie non négligeable de la valeur économique des batteries usagées. De fait, comme détaillé précédemment, elles contiennent des métaux précieux dont les proportions sont généralement de 5 % à 20 % de cobalt, de 5 % à 10 % de nickel, de 5 % à 7 % de lithium, de 5 % à 10 % d'autres métaux (cuivre, aluminium, fer., etc.), de 15 % de composés organiques et de 7 % de plastique [168], bien que cette composition diffère selon les fabricants. Il faut toutefois s'assurer que le recyclage ne soit pas plus coûteux que la récolte par le biais de l'exploitation minière.

Les principaux objectifs du recyclage des batteries sont donc de réduire leurs impacts sur l'environnement et de valoriser leurs ressources (métaux précieux) en les maintenant dans la chaîne d'approvisionnement.

Différentes *routes* pour le traitement des batteries Li-ion usagées ont été établies [169]. Celles-ci sont représentées à la Figure 4.11. Les routes 1a et 1b constituent le recyclage (ou *extraction*), la route 2 représente la réparation et la route 3 la réutilisation.

Les deux méthodes de recyclage (1a et 1b) sont brièvement exposées, l'objectif n'étant pas de les développer en détail, mais d'informer le lecteur de leurs enjeux.

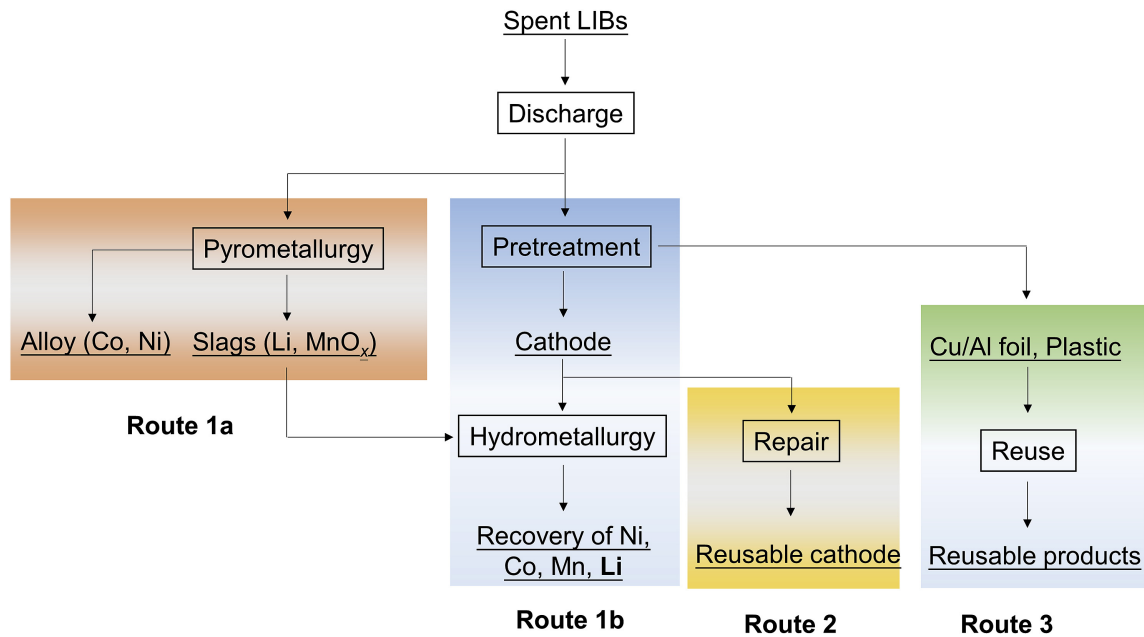


FIGURE 4.11 – Gestion de la fin de vie des batteries Li-ion [169].

Le processus de recyclage commence tout d'abord par la décharge de l'énergie résiduelle, afin d'éviter tout risque d'incendie ou d'explosion lors du traitement. Ensuite vient la phase de prétraitement, qui consiste en diverses opérations physiques telles que le démantèlement, le concassage, le tamisage, la séparation magnétique, le lavage, etc. Il reste alors les matériaux d'intérêt, qui subiront des traitements chimiques.

La première voie concerne les procédés pyrométallurgiques. Dans ce processus, la seule étape de prétraitement est un simple démantèlement des batteries en cellules individuelles. Celles-ci sont ensuite introduites dans un four à cuve avec trois zones de température [169] : la zone de préchauffage, la zone de pyrolyse des plastiques et la zone de fusion et de réduction. Dans la zone de préchauffage, les cellules sont chauffées à une température de 300 °C afin de libérer la vapeur d'électrolyte sans explosion. La zone de pyrolyse fonctionne autour de 700 °C et vise à incinérer les composants en plastique des cellules pour maintenir la température et réduire la consommation d'énergie de l'étape de fusion. Dans la dernière zone, les matériaux sont fondus et forment un alliage de cuivre, de cobalt, de nickel et de fer, ainsi que la formation de sous-produits (scories) contenant du lithium, de l'aluminium, du silicium, du calcium et une partie de fer. Ainsi, ce processus ne peut récupérer efficacement que le cuivre, le cobalt, le nickel et une partie du fer des batteries [170]. Notons que le rendement économique de ce processus dépend fortement du prix du cobalt, ainsi que de sa quantité dans les batteries.

Actuellement, ce processus est le plus utilisé pour le recyclage des batteries (par ERAMET, Umicore, Glencore, etc.) bien qu'il présente certains inconvénients tels que des investissements en équipements importants, la perte de matière, la consommation d'énergie élevée et le dégagement de gaz dangereux (dioxines, furanes [C_4H_4O], etc.).

Des processus de recyclage alternatifs avec un taux de récupération plus élevé, une consommation d'énergie inférieure et des risques environnementaux réduits sont nécessaires pour gérer un nombre considérable de batteries usagées à l'avenir.

Par conséquent, des procédés hydrométallurgiques ont été développés, pour lesquels la séparation des métaux est facilitée par la lixiviation (la précipitation et l'extraction de produits solubles par un solvant) des matériaux cathodiques dans une solution acide. Par rapport aux procédés pyrométallurgiques, la lixiviation permet d'obtenir une efficacité de récupération supérieure en raison de la solubilité élevée des matériaux de cathode dans l'acide. Notons que les taux de récupération diffèrent en fonction du solvant

utilisé. Par exemple, le H_2SO_4 permet de récupérer plus de 98 % du cuivre et du lithium et 97 % de cobalt [171]. Une méthode de biolixiviation respectueuse de l'environnement, où le solvant est composé d'acides organiques produits par le champignon *Aspergillus Niger*, permet une récupération à 100 % de cuivre, 100 % de lithium, 77 % de manganèse, 75 % d'aluminium, 64 % de cobalt et 54 % de nickel [172]. Ces procédés ont pour avantages d'avoir une faible consommation d'énergie et la possibilité de récupérer du lithium de haute pureté, aux dépens d'un traitement de longue durée.

Afin de comparer les impacts environnementaux de ces deux voies de recyclage, nous nous basons sur un LCA réalisé par des chercheurs australiens [173]. Les résultats indiquent que les impacts les plus importants des procédés pyrométallurgiques sont causés par l'incinération des plastiques et le besoin élevé en énergie pour ce processus. En ce qui concerne les procédés hydrométallurgiques, l'impact majeur est également dû à la production d'électricité utilisée, bien que globalement cette technique possède une empreinte carbone bien inférieure.

Cette étude souligne que pour réduire les impacts environnementaux du recyclage des batteries lithium-ion, il convient d'utiliser des processus utilisant des températures basses et capables de récupérer les plastiques. Les impacts peuvent être davantage réduits en minimisant la distance parcourue entre la collecte des batteries et l'endroit où les procédés du recyclage ont lieu.

4.1.3.4 Technologies en cours de développement

En quatrième et dernier lieu, les principales technologies de batteries au stade de recherche sont exposées.

Comme démontré, la batterie Li-ion est le meilleur compromis actuel pour les VE grâce à sa haute densité d'énergie et sa fiabilité. Cependant, des progrès sont encore à faire afin d'améliorer l'autonomie des voitures, la stabilité du cycle de charge et de décharge, la capacité de débit, la conductivité et le transport des ions, tout cela en minimisant le prix. De plus, les technologies futures ont tout intérêt à avoir un impact environnemental plus faible que celui de la batterie Li-ion, qui génère en moyenne entre 57 et 85 kg de CO_2 durant son cycle de vie [174] et qui est pourtant l'un des plus faibles des technologies actuelles.

La Figure 4.12 représente la chronologie des principales technologies de batteries. La suite de l'analyse se concentre sur celles au stade expérimental : la batterie lithium-soufre (Li-S) et les batteries air-métal (zinc-air et lithium-air), composées d'une anode en métal et d'une cathode à air.

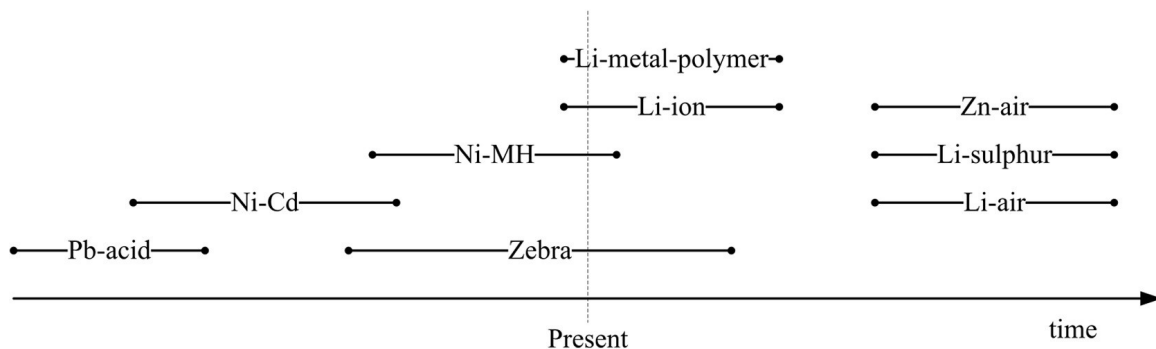


FIGURE 4.12 – Chronologie du développement des batteries [175].

Lithium-soufre

Le principe de fonctionnement est illustré à la Figure 4.13. Contrairement aux batteries Li-ion où le lithium reste sous forme ionique (Li^+), les batteries Li-S possèdent une électrode négative en lithium métallique. Au cours de la décharge, le lithium se dissout à la surface de l'électrode positive après rupture de liaisons chimiques S-S.

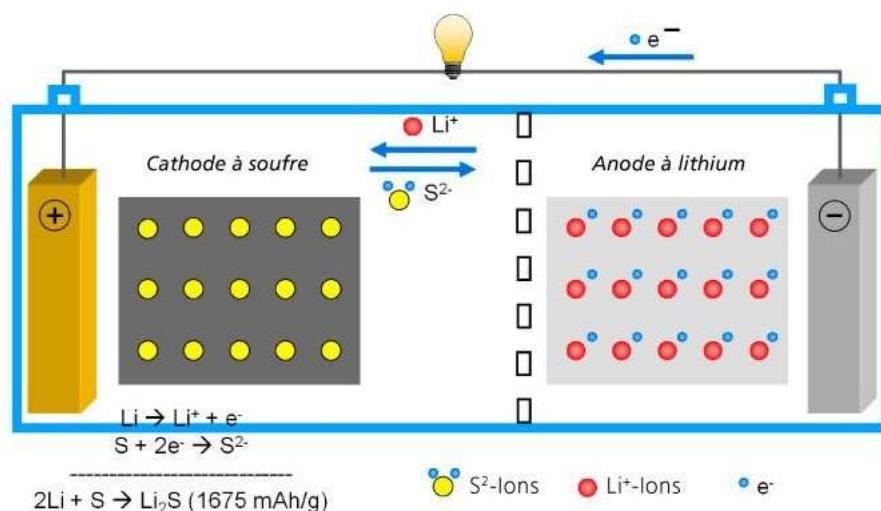


FIGURE 4.13 – Schéma de fonctionnement d'une batterie Li-S [176].

Grâce à la capacité spécifique du soufre de 1672 mAh/g, et grâce au fait que chaque atome de soufre peut se lier à deux ions de lithium (contre moins d'un ion qui réagit en moyenne pour les batteries Li-ion), la technologie Li-S offre une densité énergétique théorique d'environ 2600 Wh/kg [177]. Ce nombre diminue à 500 Wh/kg en prenant en compte la masse totale de la batterie, avec son boîtier. De plus, les ressources abondantes de soufre dans la nature rendent son coût relativement faible, et il est considéré comme étant moins nocif pour l'environnement que les métaux lourds des batteries Li-ion conventionnelles.

Cependant, les batteries Li-S ont été confrontées à des challenges techniques affectant leur durée de vie et leur sécurité. Ils concernent notamment une décroissance rapide de la capacité de stockage en raison de la dissolution des substances actives de soufre (formant des polysulfures) et une faible conductivité ionique [178]. Ces défis ont engendré des années de recherches supplémentaires, et ont été pour la plupart résolus.

En effet, la dissolution du soufre peut être évitée en le confinant dans des matériaux en couches minces tels que du graphène. Le composite graphène-soufre (GSC) ainsi produit et dopé à l'azote offre une capacité de 1440 mAh/g, avec un taux de décroissance de 0,028 % sur 2000 cycles [179].

De plus, sa conductivité est améliorée en ajoutant des additifs conducteurs tels que du carbone ou des nanotubes de carbone dans la matière active [180].

Ces avancées technologiques ont permis au Li-S d'être une excellente alternative au Li-ion pour les prochaines générations de batteries. L'Union européenne a par ailleurs lancé le projet ALISE (*Advanced Lithium Sulfur Battery*) pour promouvoir son développement dans les véhicules électriques. Des prototypes industriels ont déjà atteint une densité d'énergie de 200 Wh/kg, ce qui est presque le double des batteries Li-ion actuelles [181].

Au vu de sa commercialisation imminente (prévue dès 2020), il importe d'étudier l'impact environnemental de ce type de batteries. De fait, la technologie Li-S utilise une grande variété de substances chimiques toxiques pour la fabrication des électrodes, à savoir du fluorure d'hydrogène, de l'acide sulfurique, du chlorure d'hydrogène, etc. De plus, la fabrication des cellules de la batterie nécessite des procédés énergivores, tels que la synthèse du composite GSC qui requiert 140 à 300 kW/m³ [182].

Pour ce faire, nous nous basons sur une étude (*Life cycle assessment of lithium sulfur battery for electric vehicles*, voir [183]) qui analyse le cycle de vie de cette batterie comparée à un modèle de référence, la batterie li-ion NCM. Les caractéristiques de chacune pour l'analyse sont reprises dans le Tableau 4.4. Notons que, comme la technologie Li-S est encore au stade du développement, aucune voie de recyclage

n'a été considérée dans cette étude.

	Masse (kg)	Densité d'énergie (Wh/kg)	Capacité (kWh)	Masse du véhicule (kg)	Autonomie véhicule (km)
Li-S	279	220	61,3	1625	320
Li-ion NCM	531	120	63,8	2021	320

TABLEAU 4.4 – Comparaison des deux batteries utilisées pour l'expérience.

L'étude indique que la production de la batterie Li-S génère 44,8 gCO₂/km contre 54,9 gCO₂/km pour la Li-ion NCM (différence de 18,4 %). De plus, la phase d'utilisation de la batterie est responsable de l'émission de 112 gCO₂/km contre 117 gCO₂/km pour la Li-ion NCM. Sur cette base, la batterie Li-S génère 9 % d'émissions en moins que sa rivale, sans tenir compte de la phase de recyclage.

Enfin, il n'y a pas de métaux lourds (nickel, cobalt et manganèse) dans la batterie Li-S et elle nécessite une quantité de cuivre beaucoup moins importante (36,8 kg contre 84,8 kg pour la Li-ion NCM de même capacité).

Zinc-air

Dans les batteries air-métal, le matériau actif à la cathode est l'oxygène de l'air qui est abondant, gratuit et qui ne nécessite pas de boîtier lourd pour le garder à l'intérieur. Une conception simple de la cellule de la batterie est alors envisageable, ce qui diminue significativement les coûts et la masse totale. La densité d'énergie réelle est augmentée à 1300 Wh/kg pour le cas du zinc et jusqu'à 1700 Wh/kg pour le cas du lithium. De plus, cette technologie possède une capacité indépendante de la température et n'implique pas ou peu de problèmes écologiques.

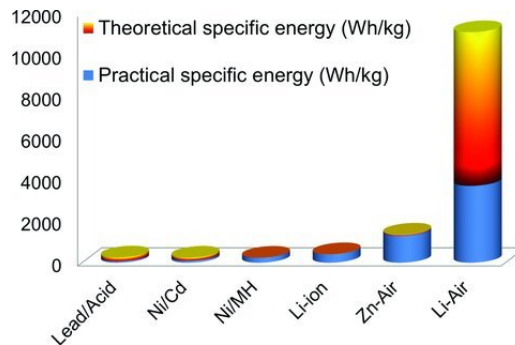


FIGURE 4.14 – Comparaison des densités énergétiques des batteries traditionnelles et air-métal [184].

Le cas où le zinc est utilisé comme métal est d'abord exposé.

Les cellules des batteries Zn-air se composent de trois parties, comme indiqué sur la Figure 4.15) : l'anode en zinc, une électrode à air qui sert de cathode (divisée en une couche de diffusion gazeuse et une couche active catalytique), et un séparateur. La solubilité de l'oxygène étant très faible à pression atmosphérique, il est nécessaire d'utiliser de l'oxygène en phase gazeuse et non en phase liquide.

Le principe de fonctionnement est le suivant : l'oxygène de l'atmosphère se diffuse dans l'électrode de carbone poreuse, par différence de pression entre l'extérieur et l'intérieur de la cellule. Puis, le catalyseur facilite la réduction de l'oxygène en ions hydroxyle dans l'électrolyte alcalin avec des électrons générés par l'oxydation du zinc métallique lors de la réaction anodique. Les ions hydroxydes générés migrent alors de la cathode à air vers l'anode en zinc pour compléter la réaction cellulaire [184].

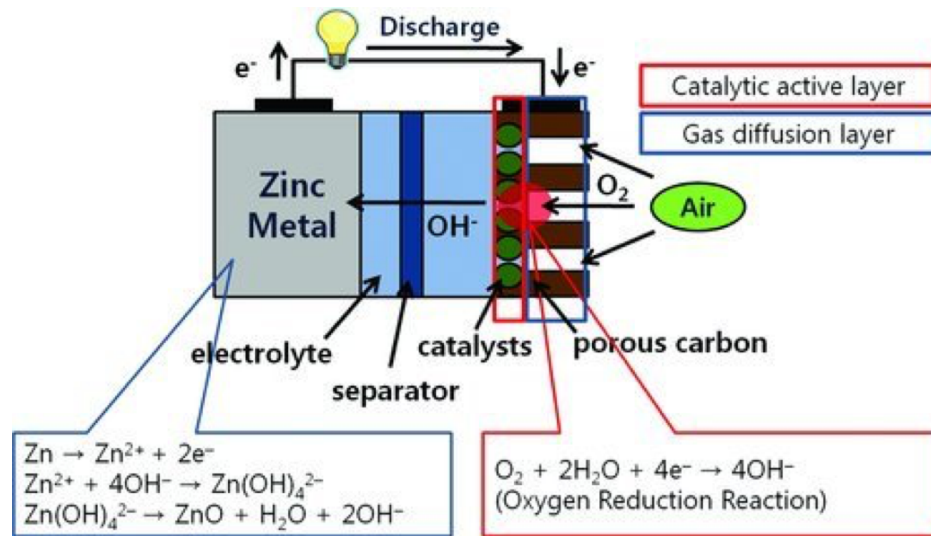


FIGURE 4.15 – Principe de fonctionnement de la cellule Zn-air [184].

La batterie Zn-air présente un certain nombre d'avantages par rapport à la technologie actuelle de référence. Le premier concerne son faible coût, moins d'un tiers de celui de la Li-ion, grâce à l'abondance et au bas prix du zinc. Le deuxième est lié à sa sûreté. Elle ne présente pas de risque de surchauffe ou d'explosion, contrairement à la Li-ion. Enfin, elle utilise des matières premières facilement accessibles et recyclables, ce qui garantit une application à long terme pour le marché de masse [185].

Cependant, plusieurs défis subsistent même après des décennies de recherches et impactent la densité de puissance et la durée de vie. Le zinc ayant un potentiel de réduction plus négatif que l'hydrogène, des réactions de dégagement de H_2 peuvent se produire spontanément sur la surface des particules de zinc dans un milieu aqueux, ce qui détériore l'efficacité et diminue la durée de vie de la batterie. Pour pallier cela, le revêtement, l'alliage et l'ajout d'additifs à l'électrolyte sont considérés [186].

De plus, une détérioration de la capacité de la cellule peut se produire lorsque la batterie fonctionne à l'air libre, car l'électrolyte alcalin peut réagir avec le CO_2 pour former des carbonates. Un système tampon de CO_2 peut être introduit pour résoudre ce problème [184].

Enfin, l'assèchement de l'électrolyte peut survenir avec le temps lors de l'entrée d'oxygène dans la cellule [185].

L'importance de maîtriser ces contraintes est capitale pour améliorer la durée de vie de ces batteries.

Lithium-air

Le troisième et dernier type de prototype de batterie que nous abordons est la technologie lithium-air, qui offre la plus haute densité d'énergie théorique connue à ce jour, d'environ 12 kWh/kg. En tenant compte de la masse totale de la batterie (boîtier, canaux d'air, substrat de lithium), alors que le lithium seul est très léger, la densité baisse à 1700 Wh/kg, ce qui est environ 10 fois supérieur à celle des Li-ion actuelles [187]. Cela octroierait à la VE une autonomie similaire à celle ayant un moteur thermique. De plus, une étude sur l'empreinte carbone de son cycle de vie [188] indique qu'à long terme, la batterie Li-air pourrait avoir 4 à 9 fois moins d'impacts environnementaux que les Li-ion. Les chercheurs estiment aussi qu'environ 10 à 30 % de ces impacts liés à la production pourraient être évités grâce à un recyclage plus efficace de ces batteries.

La batterie Li-air est composée d'une anode en lithium, d'une cathode à air et d'un électrolyte. Quatre configurations différentes sont possibles en fonction du type d'électrolyte, comme représenté à la Figure 4.16 : les sels de lithium peuvent être dissous dans un solvant non aqueux, dans un solvant aqueux, dans un solvant hybride (non aqueux/aqueux) ou bien l'électrolyte est à l'état solide.

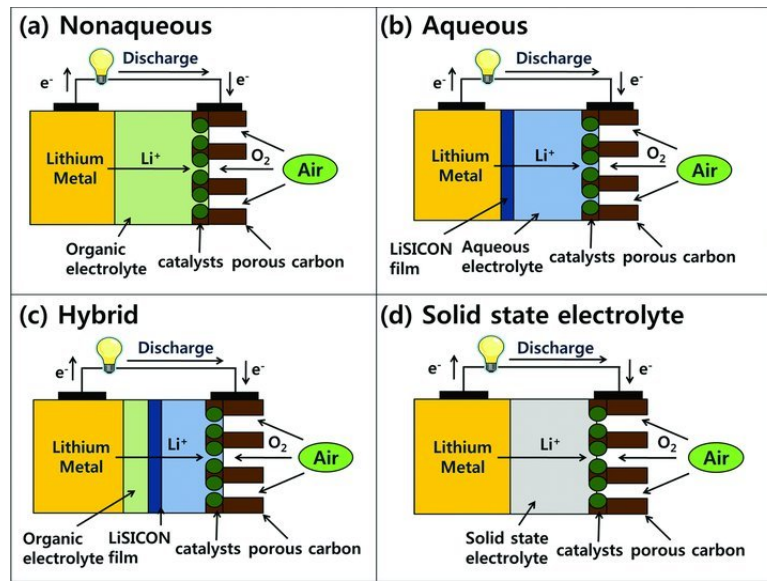


FIGURE 4.16 – Configurations de la batterie Li-air en fonction du type d'électrolyte [184].

Dans la première configuration, l'oxygène est réduit et forme de façon irréversible du Li_2O_2 solide dans la cathode poreuse. La capacité de ce système est donc principalement limitée par l'obstruction de la cathode par ce produit solide, ce qui peut entraîner une défaillance prématurée de la batterie. De plus, le carbone est l'un des matériaux le plus couramment utilisé pour la cathode bien qu'il soit décomposé par le Li_2O_2 pour former du carbonate de lithium, qui bloque également la cathode poreuse [189].

Cette contrainte de blocage est résolue dans la deuxième configuration, composée d'une anode en lithium et d'une électrode à air poreuse avec un électrolyte aqueux. Pour empêcher l'anode de réagir avec l'eau, une membrane conductrice à l'ion lithium solide est placée sur celle-ci.

La troisième configuration est un système hybride qui permet d'éviter le contact direct entre le lithium et la membrane d'électrolyte solide et d'augmenter la conductivité des ions lithium.

Les trois types de batteries lithium-air susmentionnées sont à base d'électrolytes liquides, ce qui peut entraîner des problèmes de fuite et de sécurité. Une quatrième configuration a alors été développée, et consiste en une batterie Li-air à l'état solide, sans électrolyte liquide comme le montre la Figure 4.16d [187].

L'état actuel de la recherche est toutefois loin d'une mise en œuvre à grande échelle. En effet, cette technologie doit surmonter de nombreux obstacles, liés à la stabilité de la tension, à la charge potentielle, à la stabilité de l'électrolyte et à de nombreux autres facteurs physico-chimiques. Ces derniers devraient idéalement inclure le développement de cellules complètes fonctionnant dans l'air ambiant [190]. De fait, contrairement aux batteries Zn-air qui sont stables face à l'humidité, les cellules des batteries Li-air doivent être assemblées dans une atmosphère inerte, ce qui complique les procédés de fabrication. De plus, la disponibilité limitée et le prix élevé du lithium (160 000 à 180 000 USD par tonne en mai 2017 [191]) pourraient limiter la production à grande échelle et l'utilisation généralisée des batteries Li-air, contrairement au zinc qui est une ressource abondante et bon marché [184].

Enfin, comme expliqué précédemment, l'apparition d'oxygène et d'autres produits secondaires complique considérablement les réactions à l'interface entre l'anode en lithium et l'électrolyte. Ces réactions non désirées consomment du lithium et se traduisent par la formation d'une couche épaisse à sa surface, ce qui augmente la résistance au transport des ions et finit par conduire à la dégradation des performances et même à la défaillance de la batterie. Par conséquent, la fabrication d'une membrane à la surface de la cathode est essentielle pour assurer sa protection [187].

Les recherches se focalisent donc à l'amélioration de cette technologie prometteuse, qui permettrait d'étendre considérablement les distances parcourues par les VE.

Le Tableau 4.5 reprend les principales caractéristiques des trois futures technologies de batteries, comparées à celles de la Li-ion.

	Li-ion	Li-S	Zn-air	Li-air
Densité d'énergie réelle (kWh/kg)	0,2	0,5	1,3	1,7
Durée de vie (Nbre de cycles)	1200	50-100	/	700
Avantages	Disponible ; Bonne capacité de recharge	Bientôt disponible ; coût ; matériaux	Coût ; matériaux ; sécurité	Densité d'énergie élevée ; faible impact carbone ;
Challenges	Coût ; densité d'énergie ; durée de vie ; matériaux utilisés ; sécurité	Durée de vie ; sécurité ;	Puissance limitée (100 W/kg) ; durée de vie ;	Nécessite lithium pur ; coût ; procédé de fabrication ; réactions à l'anode à maîtriser
Coût (USD/kWh)	150-1300	/	<100	/

TABEAU 4.5 – Comparaison de la batterie Li-ion avec les technologies futures.

4.1.4 Choix des matériaux pour la carrosserie

La masse et l'aérodynamisme d'un véhicule ont un impact direct sur sa consommation d'énergie et, par conséquent, sur son empreinte environnementale. L'optimisation de la masse fait l'objet de nombreuses études et recherches, en tâchant de trouver un bon équilibre entre consommation énergétique, stabilité et sécurité de la voiture et prix des matériaux, ce qui pousse les constructeurs automobiles à adapter en permanence la composition du châssis et du corps de leurs voitures. De nos jours, les matériaux les plus utilisés sont les métaux (alliages d'acier, aluminium ou autres alliages légers) et les polymères, parfois sous forme de polymères composites.

La Figure 4.17 affiche l'évolution attendue de la composition des matériaux des véhicules entre 2010 et 2040. La voiture du futur, supposée plus légère et plus performante, sera constituée d'une multitude d'aciers et d'alliages différents.

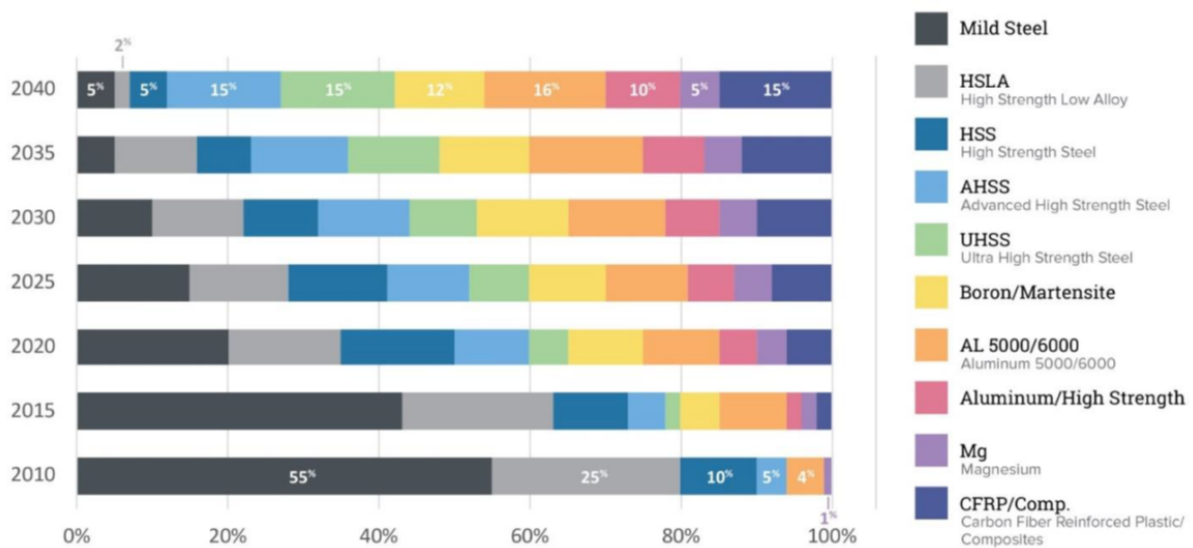


FIGURE 4.17 – Évolution attendue de la composition de la carrosserie des voitures [192].

Dans cette partie, nous passons en revue les principales contraintes qui déterminent le choix des matériaux pour la carrosserie de la voiture. Plus particulièrement, nous nous intéressons aux critères de sécurité, de masse, du coût, de l'énergie grise, du recyclage et du cycle de vie en nous aidant du logiciel *CES EduPack* (GRANTA Design) [154] pour comparer les matériaux.

Sécurité Les matériaux qui composent la carrosserie de la voiture doivent être capables d'absorber au maximum l'énergie dégagée lors d'une collision pour éviter qu'elle ne se transmette aux passagers à l'intérieur de l'habitacle. La ténacité est alors un paramètre important pour l'étude des matériaux automobiles, car elle permet de mesurer l'énergie absorbée par le matériau avant sa fracture. Cela correspond à la surface sous la courbe de la Figure 4.18.

L'industrie automobile s'intéresse alors aux matériaux *ductiles* pour constituer la carrosserie.

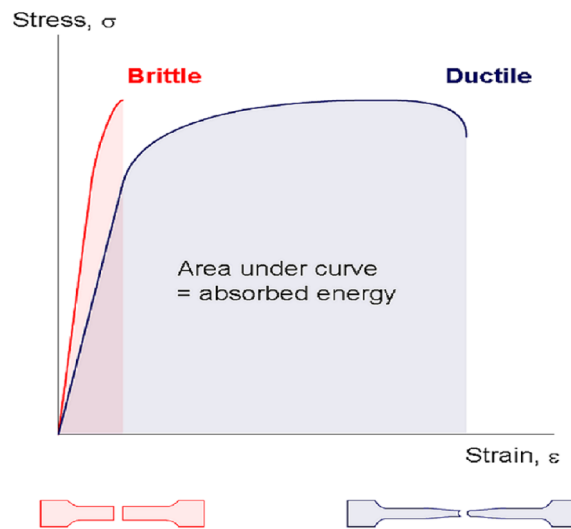


FIGURE 4.18 – La ténacité (l’aire sous la courbe) représente l’énergie absorbée [193].

La Figure 4.19 compare la ténacité en fonction de la masse volumique des plastiques, composites, métaux et alliages utilisés dans le monde automobile. Elle illustre que les matériaux composites en fibres de carbone ou de verre offrent une ténacité au moins égale à la plupart des métaux tout en ayant une masse volumique nettement inférieure, ce qui permet aux constructeurs d’alléger leurs véhicules tout en offrant des performances et une sécurité similaire.

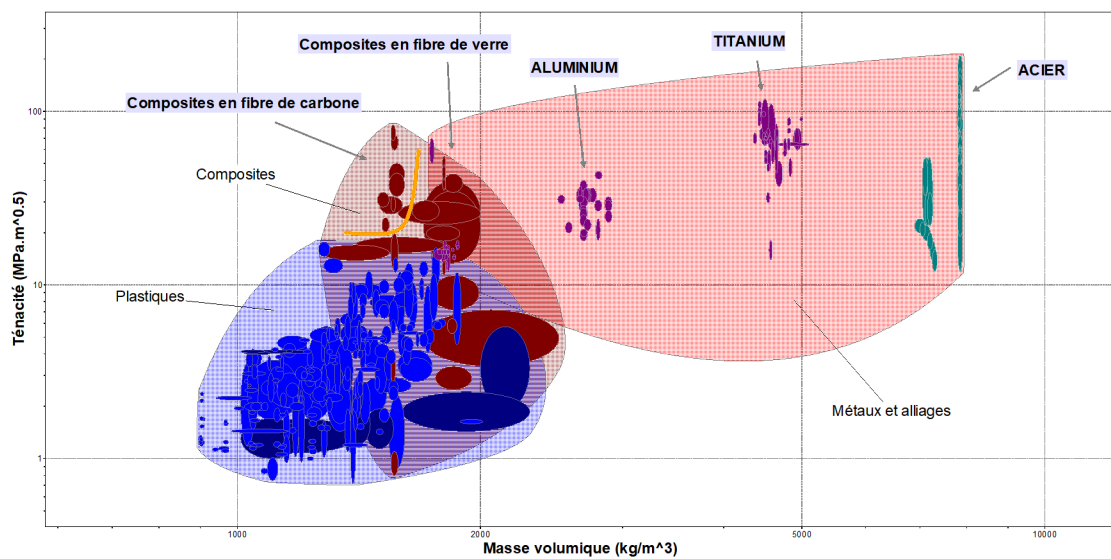
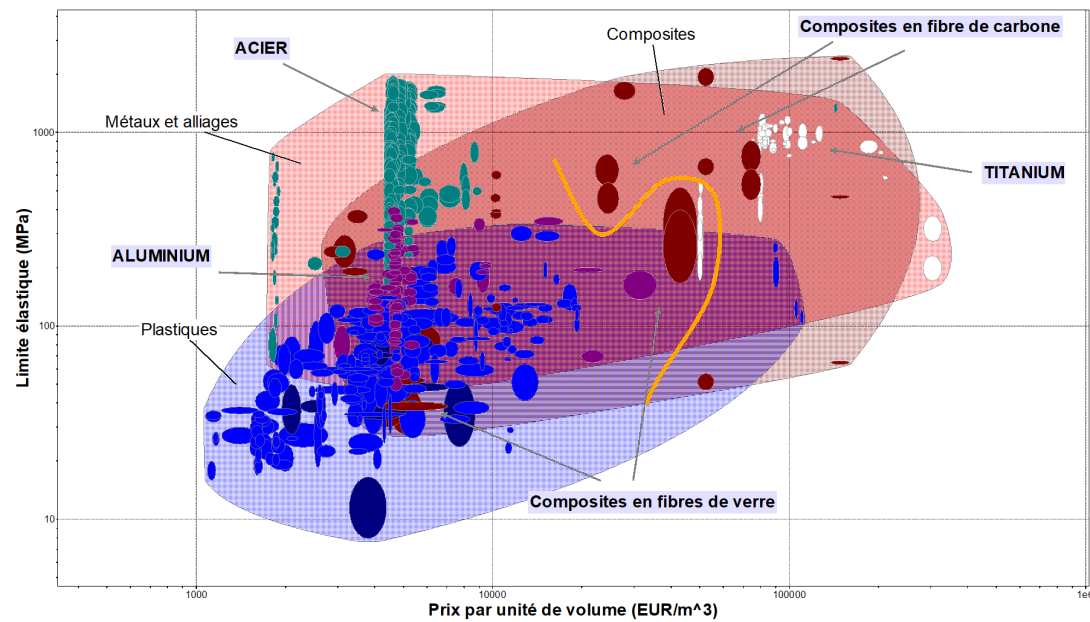


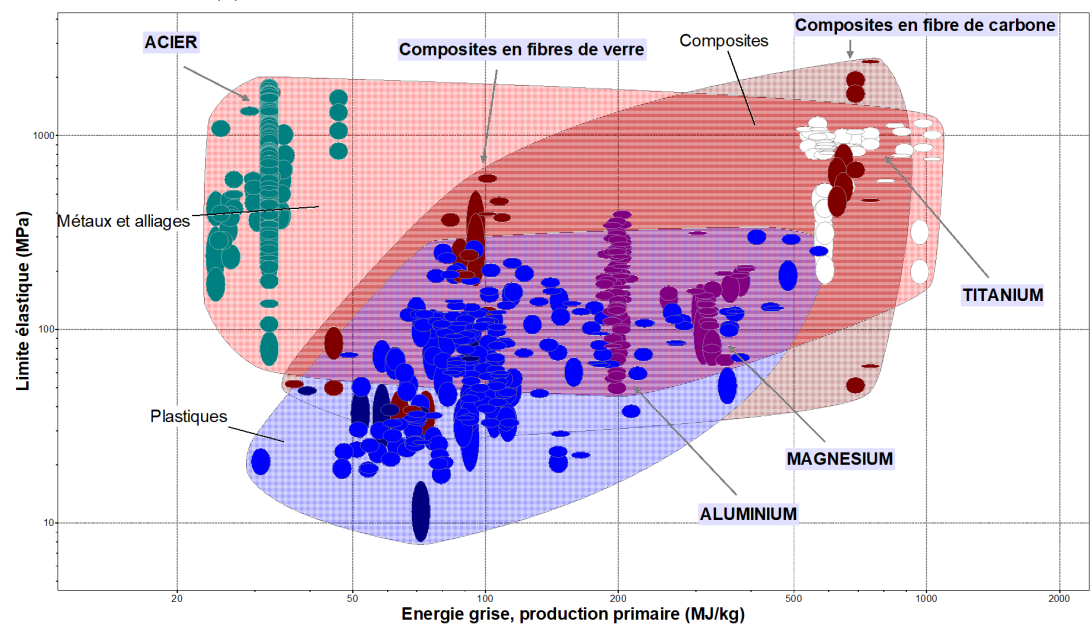
FIGURE 4.19 – Comparaison de la ténacité des matériaux utilisés en automobile en fonction de leur masse volumique [154].

Coût et énergie grise Les développements récents des aciers AHHS (*Advanced High Strength Steel*) et des composites apparaissent comme des alternatives intéressantes au fer et à l’acier traditionnel pour la diminution de la masse des matériaux. Cela explique leur utilisation de plus en plus importante (voir la Figure 4.17). En ce qui concerne le coût rapporté au volume, l’aluminium et l’acier possèdent approximativement le même, les AHSS sont légèrement plus chers et les composites ont un prix beaucoup plus

élevé, comme observé à la Figure 4.20a. La limite d'élasticité est utilisée ici comme paramètre de comparaison. Plus elle est élevée, plus la carrosserie peut supporter des contraintes importantes sans subir des déformations irréversibles.



(a) Limite d'élasticité en fonction du prix par unité de volume.

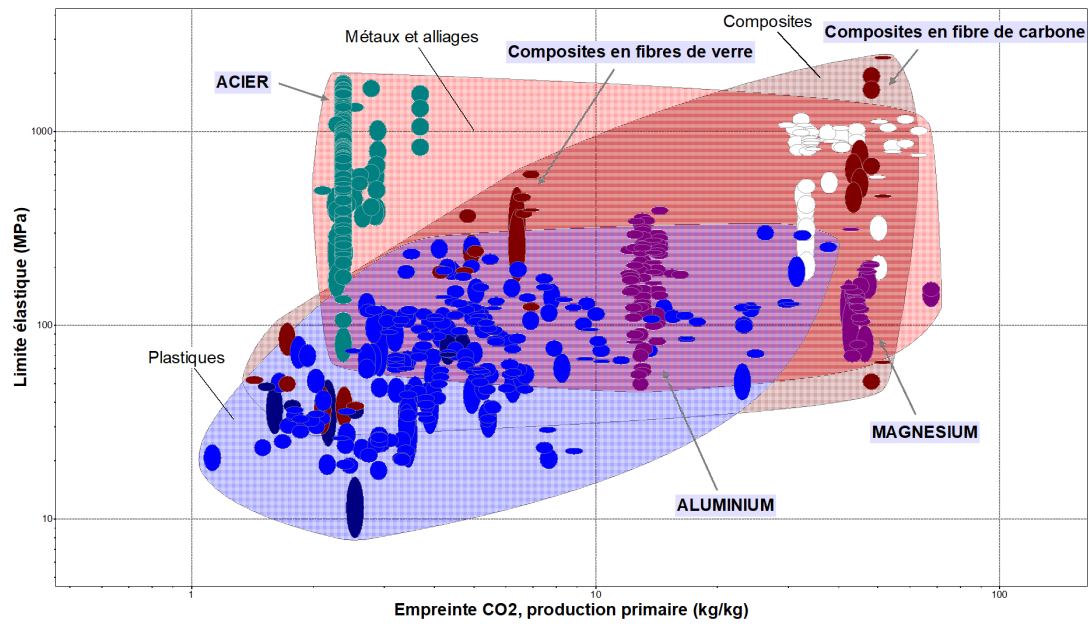


(b) Limite d'élasticité en fonction de l'énergie grise pour la production primaire.

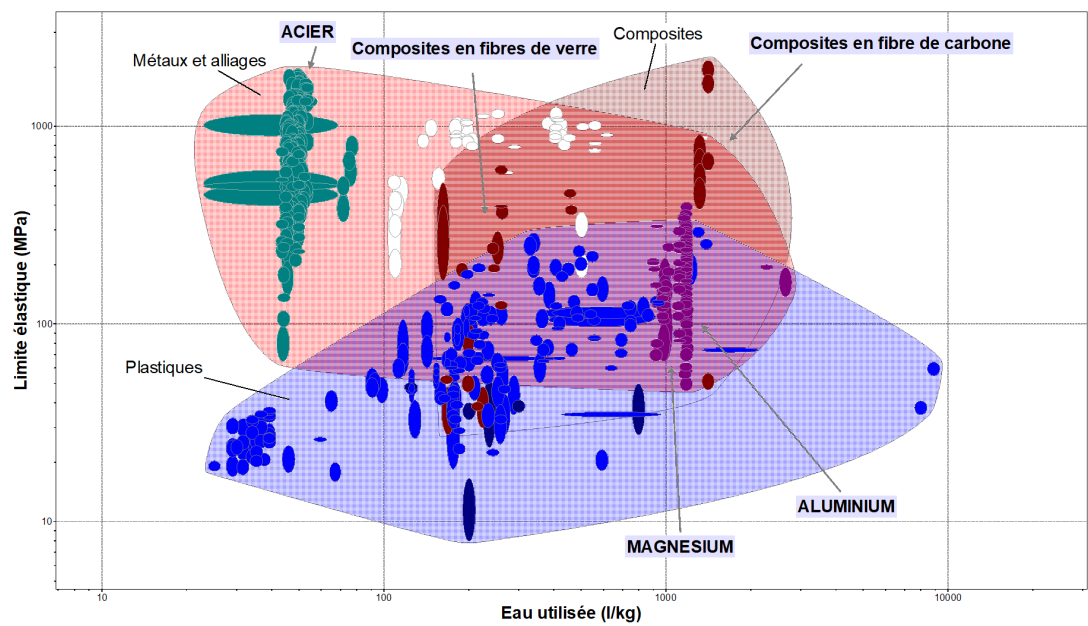
FIGURE 4.20 – Graphes *GRANTA* [154].

Il est cependant important de garder à l'esprit que ces matériaux, certes plus légers, ont souvent tendance à consommer plus d'énergie comparés aux aciers conventionnels lorsque leur cycle de vie est pris en compte. Ainsi, le prix élevé de la fibre de carbone à la Figure 4.20a est notamment dû au coût lié à l'énergie de production importante, comme représenté à la Figure 4.20b. Un autre exemple est celui du matériau *Epoxy/HS Carbon Fibre*, qui consomme 700 MJ/kg alors qu'un acier de même limite d'élasticité

ne consomme que 32 MJ/kg. De même pour l'aluminium, dont l'énergie de production est plus élevée que celle de l'acier. L'énergie grise élevée de la fibre de carbone et de l'aluminium implique un dégagement de CO_2 important, comme le montre la Figure 4.21a. La production de ces derniers consomme également plus d'eau qu'un acier, comme l'illustre la Figure 4.21b.



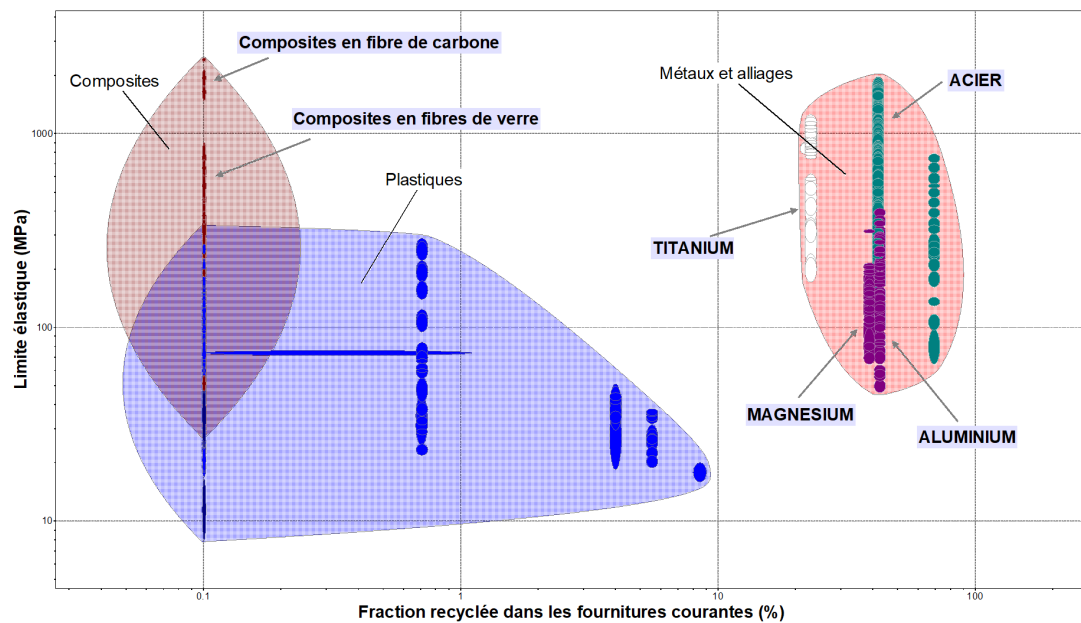
(a) Limite d'élasticité en fonction de l'empreinte CO_2 pour la production primaire.



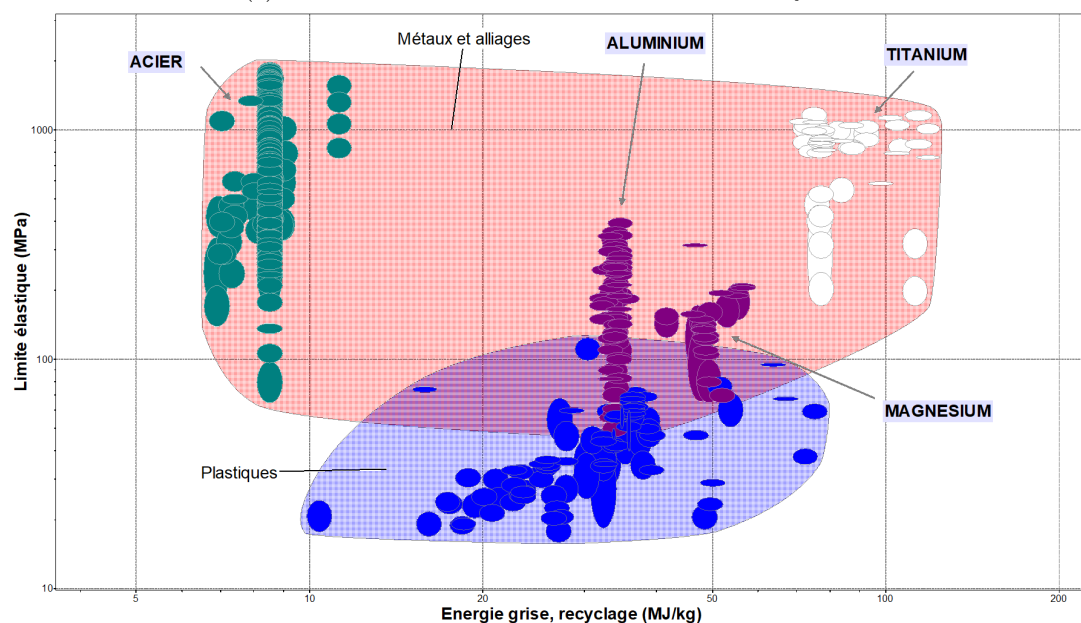
(b) Limite d'élasticité en fonction de l'eau utilisée pour la production primaire.

FIGURE 4.21 – Graphes *GRANTA* [154].

Recyclage et cycle de vie En ce qui concerne la fin de vie, la fibre de carbone est fortement désavantagée, car elle n'est pas recyclable contrairement à l'acier et à l'aluminium comme l'indique la Figure 4.22a. De nouveau, l'acier offre l'avantage de nécessiter moins d'énergie pour le recyclage que l'aluminium selon la Figure 4.22b.



(a) Limite d'élasticité en fonction de la fraction recyclée.



(b) Limite d'élasticité en fonction de l'énergie grise pour le recyclage.

FIGURE 4.22 – Graphes GRANTA [154].

En ce qui concerne la longévité, les composites ont pour avantage de ne pas se corroder ni de se dégrader comme les métaux. Ils permettent également de créer de plus grandes structures *une pièce* (*unibody*), sans joints, ce qui rend l'ensemble plus solide. Cependant, malgré l'avantage massif des

matériaux composites, il est fort probable que les voitures continuent à être composées en grande partie d'acier grâce à son coût et à son impact environnemental plus faible comme détaillé précédemment.

Aciers AHSS Les nouveaux types d'aciers AHSS sont déclinés en trois générations. Chacune a été créée en modifiant les éléments de l'alliage, combiné avec un traitement thermomécanique particulier pour fournir des microstructures et des propriétés différentes [194].

- **La première génération AHSS** offre une meilleure résistance et une elongation plus faible que les aciers traditionnels. Cette génération comprend les aciers Dual Phase (DP), Ferritic-Bainitic (FB), Complex Phase (CP), Martensitic (MS), Transformation-Induced Plasticity (TRIP) et les Hot-Formed (HF) ;
- **La seconde génération AHSS** utilise un nombre élevé d'éléments d'alliage, ce qui permet de réduire significativement la masse des pièces automobiles. Cette génération est cependant peu adoptée dans l'industrie à cause de son coût et des difficultés à l'assembler à d'autres matériaux ;
- **La troisième génération AHSS** représente une opportunité pour obtenir la résistance et la ductilité des aciers AHSS de la deuxième génération sans le coût et les problèmes d'assemblage qui leurs sont associés. Elle est de plus en plus utilisée dans l'industrie automobile, notamment pour constituer les longerons avant et arrière et la cage de sécurité (montant A, rail de toit, montant B et portes), qui doivent être façonnés avec précision en formes complexes afin de maintenir la rigidité du véhicule, de résister aux forces de chargement élevées et d'absorber l'énergie en cas d'accident. Ces différentes parties de la voiture sont représentées à la Figure 4.23.

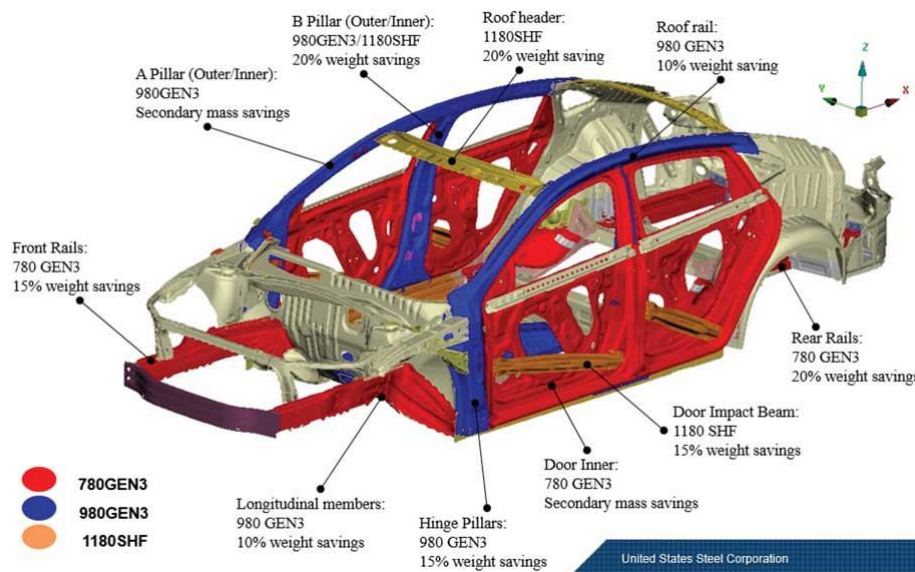
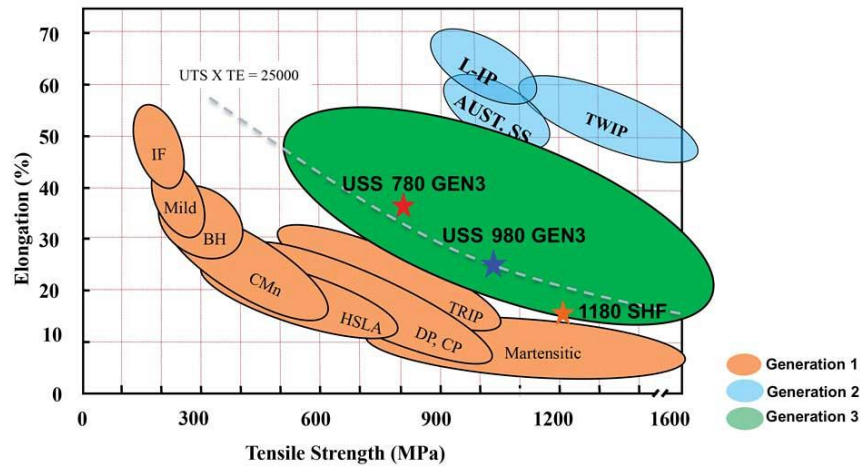
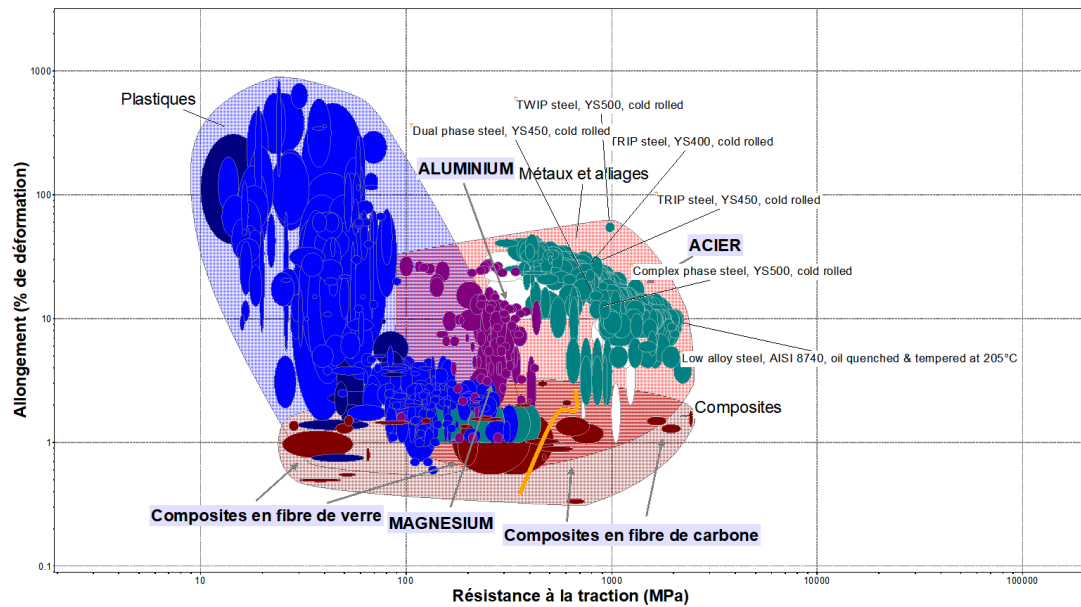


FIGURE 4.23 – Utilisation des aciers AHSS de troisième génération pour former les composants structurels de la voiture [195].

La Figure 4.24a illustre l'elongation en fonction de la traction pour chaque type de AHSS, et pour tous les matériaux présentés dans cette section à la Figure 4.24b.



(a) Élongation en fonction de la traction pour les trois classes de AHSS [195].



(b) Élongation en fonction de la traction pour les matériaux considérés dans cette section [154].

FIGURE 4.24

Pour finir, le Tableau 4.6 résume les applications, les avantages et les désavantages des principaux matériaux retenus.

Matériaux	Application	Avantages	Désavantages actuels
AHSS	Carrosserie, châssis, groupe motopropulseur, pare-chocs, parties du moteur	Bonne ténacité, absorption de l'énergie de choc, bonne formabilité, recyclage peu gourmand en énergie, énorme évolution ces dernières années	Masse élevée comparée aux autres matériaux automobiles, complexité d'estampage due à la haute résistance, faible résistance à la corrosion
Aluminium	Bloc moteur, panneaux de carrosserie, groupe motopropulseur	Léger, recyclable	Intolérance à la chaleur, impact carbone du cycle de vie plus grand que pour l'acier
Magnésium	Portes intérieures, noyau de roues	Le plus léger des métaux automobiles	Basses températures de fusion, faible résistance à la corrosion et au fluage, coût élevé
Composites et plastiques	Plancher, toit, capot, habitacle, carrosserie	Bon rapport masse/résistance, bonne rigidité, pas de corrosion	Prix élevé, pas/peu recyclable, processus de production gourmand en énergie et eau, absence de technologie de production de masse

TABLEAU 4.6 – Résumé des matériaux automobiles avec leurs applications actuelles, leurs avantages et leurs inconvénients [196].

4.1.5 Impacts sur le réseau électrique

Étant donnée l'hypothèse à long terme d'un parc automobile autonome 100 % électrique, il importe de s'intéresser aux effets qu'aura l'approvisionnement en énergie sur le réseau électrique.

Dans un premier temps, nous passerons en revue les conséquences de la recharge des VE sur la qualité de l'énergie. Dans un second temps, nous expliquerons les opportunités qu'apportent ces véhicules pour le développement de *Smart Grids*, grâce à la technologie Vehicle-to-Grid qui aide à stabiliser le réseau.

La qualité de l'énergie (*Power Quality*) représente la capacité du réseau de distribution à fournir une électricité stable et sans perturbation, qui respecte certaines tolérances de tension et de fréquence. Chaque véhicule électrique qui se connecte au réseau représente une charge non linéaire, principalement à cause des convertisseurs de l'électronique de puissance utilisée par le chargeur. Cette non-linéarité risque d'introduire un certain nombre de perturbations, notamment une surcharge des équipements (transformateurs, lignes de transmission), des abaissements de tension et des harmoniques.

Les harmoniques sont d'abord définies. Ce sont des composantes sinusoïdales du signal de tension ou de courant, caractérisées par leur *rang* qui est égal au quotient de leur fréquence par la fréquence fondamentale du signal considéré. Pour quantifier les perturbations harmoniques introduites par une charge non linéaire sur le réseau, le taux de distorsion harmonique (*Total Harmonic Distortion*, THD) est calculé comme le rapport des valeurs efficaces entre la fréquence fondamentale et les autres composantes [197].

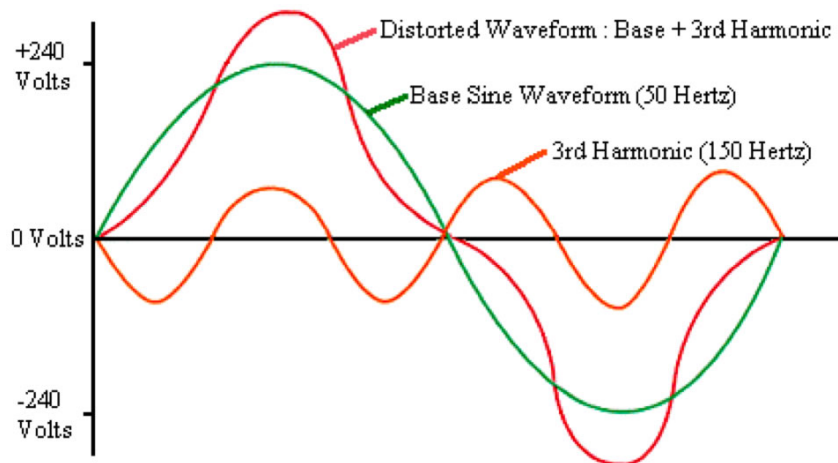


FIGURE 4.25 – Représentation du signal de base et de l'harmonique de rang 3 [197].

Il a été montré qu'en fonction du taux de pénétration des VE ainsi que de la coordination de leur recharge, le THD de tension augmente jusqu'à 45 % [198]. Ce résultat est nettement supérieur aux limites prescrites par les normes de l'IEEE, qui préconisent un THD maximal (jusqu'à la quarantième harmonique) de 8 % pour le réseau basse-tension [199].

Les principales conséquences des harmoniques sont l'échauffement des équipements du réseau (transformateurs, câbles, etc.) et des condensateurs raccordés à la même alimentation que les dispositifs générateurs d'harmoniques. De plus, des papillotements des systèmes d'éclairage peuvent apparaître ainsi que des vibrations dans les machines tournantes (car induction de couples mécaniques pulsatoires dus aux champs harmoniques) [200].

Ces effets altèrent les équipements reliés au réseau et il est donc indispensable de les limiter.

Ensuite, le profil de la tension est représenté à la Figure 4.26 en *per unit* (p.u., correspond à la normalisation des valeurs de tension par rapport aux tensions de références) en fonction de la distance entre le point de connexion au réseau et la sous-station. Deux cas sont considérés : un taux de pénétration

des véhicules électriques de 30 %, pour lequel le profil de la tension reste dans les valeurs tolérées ($1 \text{ p.u} \pm 10 \%$, donc entre 0,95 et 1,05 p.u), et un taux de 80 % qui introduit une charge importante ce qui affecte fortement les performances du réseau [201].

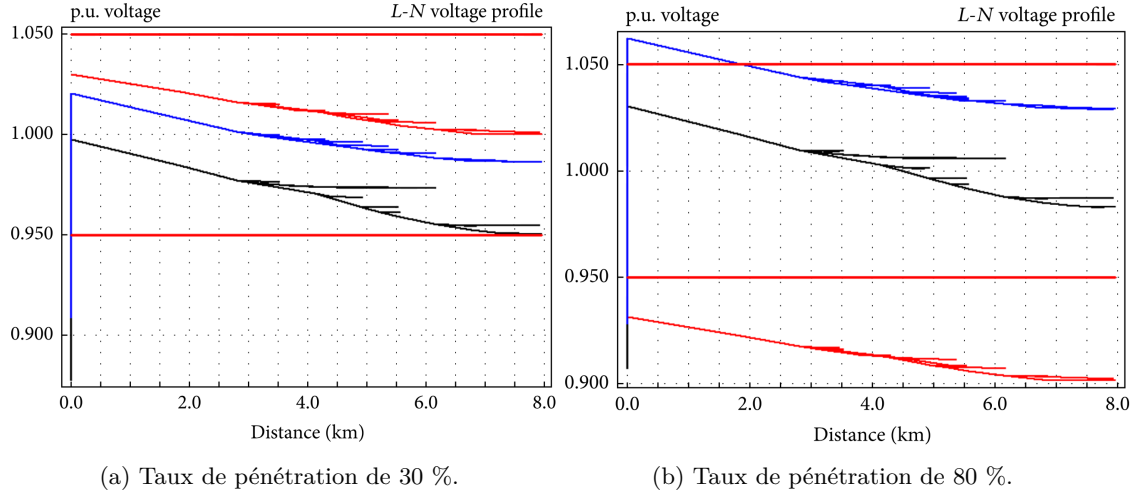


FIGURE 4.26 – Profil de la tension en $p.u$ [201].

De façon similaire, le profil des pertes de puissance du réseau réparties sur une journée est représenté pour différents taux de pénétration. Les pertes dans le système sont principalement dues à l'effet des distorsions harmoniques du courant et de la tension [201].

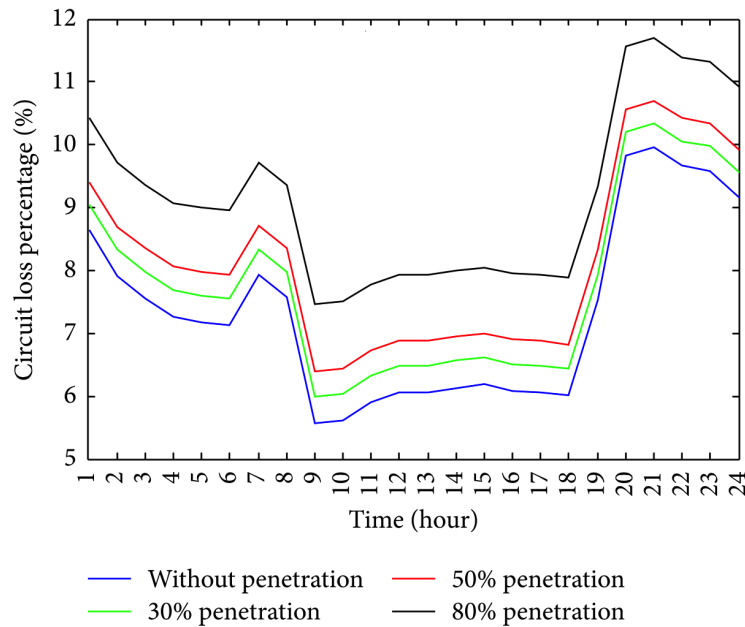


FIGURE 4.27 – Pourcentage des pertes de puissance pour différents taux de pénétration [201].

Selon la Figure 4.27, les pertes augmentent avec le taux de pénétration, de 8,6 % s'il n'y a pas de VE à 10,2 % si le taux de pénétration est de 80 %.

Les précédentes observations indiquent que la hausse du taux de pénétration des VE est un réel défi pour la stabilité de l’approvisionnement en électricité. Ces différents effets sont de plus accentués si la charge des véhicules électriques n’est pas coordonnée : des pics de tension importants peuvent se produire aux heures de pointe, ce qui déséquilibre et surcharge davantage le réseau.

Il convient alors de penser à un système *intelligent*, qui contrôle et coordonne la manière dont chaque véhicule s’approvisionne en électricité sur le réseau. L’idée du *Smart Grid* est envisagée : cette technologie consiste à gérer de façon optimale les échanges d’énergie avec les consommateurs en utilisant des systèmes de communication intégrés aux différents dispositifs électriques. Ainsi, des capteurs et des compteurs intelligents sont installés sur l’ensemble du réseau pour collecter et traiter des données en temps réel afin d’optimiser le fonctionnement général des composants interconnectés. L’une des principales caractéristiques de ce type de réseau est que les consommateurs peuvent participer activement à son exploitation. Ils peuvent accéder aux informations en temps réel sur l’utilisation et les tarifs de l’électricité grâce à l’infrastructure de comptage avancée, dans le but d’équilibrer autant que possible l’offre et la demande. Par exemple, les propriétaires de VE et les fournisseurs d’énergie pourraient signer un accord selon lequel le chargement des véhicules serait suspendu un certain temps pendant les périodes de pointe, moyennant une compensation sur la facture d’électricité du client. [202].

En outre, le réseau intelligent utilise des unités de production distribuées (contrairement à la situation actuelle, où la production est centralisée), ce qui améliore la fiabilité et l’approvisionnement. Même en cas de problème, un réseau intelligent à réparation automatique prendra des mesures correctrices immédiates pour se rétablir de toute perturbation, par exemple en isolant une ligne défectueuse [203].

Le Tableau 4.7 établit une comparaison entre le réseau actuel et le réseau intelligent.

	Réseau actuel	<i>Smart Grid</i>
Topologie	Radiale : génération d'électricité centralisée, distribution par lignes de transport ;	Décentralisée : différents moyens pour la génération et la distribution
Communication	À sens unique ;	Bi-directionnelle, en temps réel
Réaction en cas de défaut	Manuelle	Réaction automatique ; minimisation des effets et prévention rapide contre la détérioration
Contrôle du flux de puissance	Limité	Entièrement automatisé
Participation des consommateurs	Aucune	Contribution élevée, équilibre offre/demande
Mesure des flux d'énergie	Électromécanique	Digitale, en temps réel
Fiabilité	Sujet aux pannes et défauts	Protection proactive et prévention des pannes ; Principale préoccupation : qualité de l'alimentation

TABLEAU 4.7 – Comparaison entre le réseau actuel et le *Smart Grid* [203, 204].

De plus, grâce aux *Smart Grids*, l'échange bidirectionnel d'énergie entre la voiture et le réseau (Vehicle-to-Grid, V2G) peut être considéré. Cela modifierait considérablement la gestion et l'équilibrage du réseau électrique, et faciliterait l'intégration des énergies renouvelables intermittentes. En effet, les VE deviendraient une ressource pour le réseau et lui offriraient un support, notamment des services auxiliaires qui assurent la fiabilité et la stabilité de l'électricité fournie [205]. Ces avantages sont repris ci-dessous.

- **Filtrage des harmoniques** : les harmoniques générées par les charges non linéaires connectées au réseau peuvent être atténuées par filtrage actif grâce aux convertisseurs intégrés aux chargeurs des VE, en utilisant ceux-ci comme impédance variable pour chacune des fréquences des harmoniques [206] ;
- **Réserve de puissance** : le V2G fournit une capacité de stockage d'électricité à travers les batteries des véhicules connectés au réseau, ce qui permet d'assurer la récupération en cas de défaillance en compensant les éventuelles pannes de production ainsi que les pics de demande [207] ;
- **Nivellement de la charge par régulation de puissance active** : la batterie de la voiture fournit de la puissance active (P) au réseau durant les heures de pointe pour compenser les surcharges dues aux demandes industrielles/domestiques, et se recharge pendant les heures creuses [205] ;
- **Correction du facteur de puissance par régulation de puissance réactive** : comme décrit précédemment, la connexion simultanée d'un grand nombre de véhicules électriques est un défi pour la stabilité de la tension. La méthode conventionnelle de régulation de la tension et de la correction du facteur de puissance consiste à installer un compensateur réactif statique afin de fournir une assistance en puissance réactive au réseau électrique. Grâce à la technologie V2G, cette compensation sera assurée par les VE qui fourniront de la puissance réactive par un contrôle approprié du convertisseur intégré au chargeur [208] ;
- **Support pour le déploiement des modes de production renouvelables** : l'apport de flexibilité des VE au réseau peut être une solution aux problèmes d'intermittence des énergies renouvelables. En effet, les VE se rechargeront lorsque la production est en excès, et se déchargeront sur le réseau lorsque celle-ci n'est pas suffisante pour assurer la demande. Il est alors possible d'intégrer davantage de sources renouvelables dans le réseau afin de parvenir à un système d'énergie électrique plus durable et distribué [209].

La technologie V2G sera davantage exploitée et d'autant plus optimale pour les VA en utilisation partagée, car elles ne sont pas contraintes à rester à un endroit fixe, par exemple chez le particulier. Pour répondre à la demande, celles-ci peuvent alors se déplacer à tout moment et sans intervention externe vers des stations de charge spécifiques, ce qui permettrait une connexion directe au réseau haute tension en des points désignés sans surcharger le réseau basse tension [210].

Outre le V2G, le *Smart Grid* comprend deux autres types de communications : le *Vehicule-to-Home* (V2H) et le *Vehicule-to-Vehicle* (V2V) [175]. Dans un réseau domotique, le V2H permettrait de stocker le surplus d'énergie produite par l'unité photovoltaïque résidentielle et le décharger lorsque la génération d'énergie renouvelable locale est faible. Enfin, le V2V permettrait de transférer de l'énergie entre les véhicules si cela s'avère nécessaire.

Ces trois modes de fonctionnement ainsi que l'intégration des moyens de production renouvelables distribués sont schématisés à la Figure 4.28.

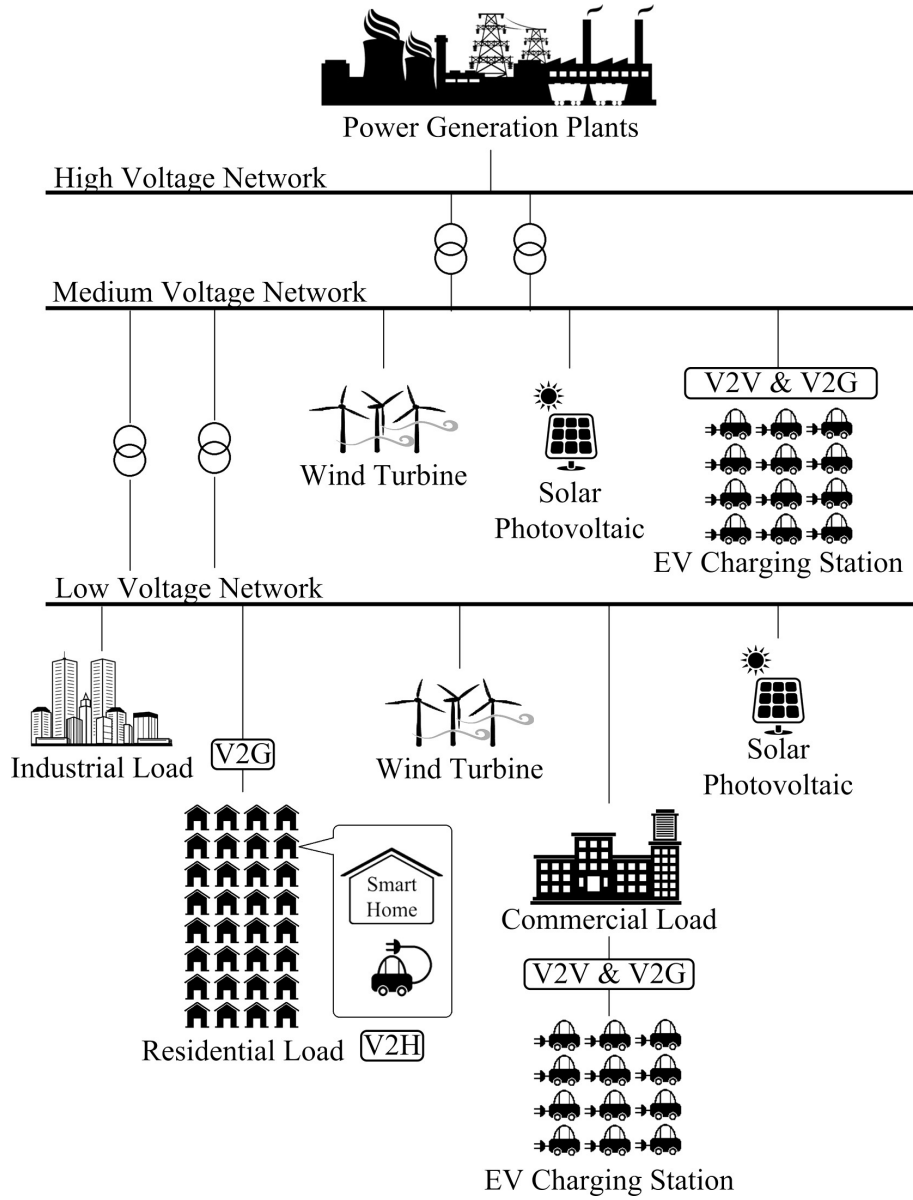


FIGURE 4.28 – Technologies V2H, V2V et V2G avec une production décentralisée basée sur les énergies renouvelables [175].

4.2 Passage à un parc électrique autonome

Dans la section précédente, l'intérêt était porté sur la VE. Nous avons analysé les principaux matériaux qui la composent, comparé les technologies de batteries et enfin développé les enjeux de leur connexion au réseau électrique.

Il reste à étudier les principaux changements qu'apporteraient les côtés *connectés* et *autonomes*.

Par exemple, les capteurs étudiés au Chapitre 3 entraînent de nouvelles demandes en matériaux, comme résumé dans le Tableau 4.8. Ces résultats indiquent que le LiDAR et l'ordinateur contiennent des terres rares et que la hausse de la demande en cuivre sera inévitable pour fabriquer les nombreux câblages entre tous les composants. De façon générale, les différents capteurs sont constitués d'électronique et de plastique, et leur structure est faite en aluminium et en plastique.

	Caméra	Sonar	Radar	LiDAR	GPS	Ordinateur	Câblage	Structure
Fer	/	/	/	7 %	/	2 %	/	/
Aluminium	/	/	/	61 %	/	70 %	/	49 %
Cuivre	/	/	/	6 %	/	6 %	100 %	/
Verre	9 %	/	/	5 %	/	/	/	/
Plastique	45 %	50 %	30 %	7 %	45 %	4 %	/	51 %
Terres rares	/	/	/	6 %	/	2 %	/	/
Électronique	46 %	50 %	70 %	5 %	55 %	16 %	/	/

TABLEAU 4.8 – Analyse de la composition des systèmes d'automatisation [39].

La section est divisée en trois parties. La première illustre l'adaptation des matériaux de la structure portante de la voiture pour répondre aux nouvelles contraintes de la conduite autonome. La deuxième établit les conséquences de la VA de niveau 5 et partagée sur la consommation d'énergie. La troisième chiffre cette consommation pour une VE actuelle rendue autonome.

4.2.1 Adaptation de la structure portante de la voiture

La conduite autonome partagée entraîne de nouvelles contraintes pour le choix des matériaux. L'étude de cette partie concerne le choix des matériaux de la structure *portante* de la voiture.

Tout d'abord, un cahier des charges est établi et reprend les hypothèses, l'objectif et les contraintes liées. Les hypothèses sont les suivantes.

- La VA est utilisée en mobilité partagée, dans une optique d'économie du service, et est en fonctionnement (sur les routes) à 60 % du temps ;
- Grâce à son moteur électrique performant, sa conduite optimale et ses entretiens automatisés, il est supposé qu'elle parcourt au minimum 1 million de km tout au long de sa vie ;
- **Minimisation du nombre d'accidents** : à terme, quand les VA de niveau 5 seront bien implémentées et que l'infrastructure routière sera parfaitement adaptée à la conduite autonome, il est attendu que le nombre annuel d'accidents de la route sera minime et tendra vers zéro ;

- Masse totale du véhicule à vide : la masse des composants du système autonome ainsi que la masse de la batterie et des équipements intérieurs pour l'expérience utilisateur auront tendance à augmenter la masse totale des VA par rapport aux VE actuelles. En contrepartie, en supprimant certains équipements de sécurité grâce à l'hypothèse de la minimisation du nombre d'accidents, un gain de 112 kg en moyenne est envisageable (suppression des airbags, du système ABS, etc.) [211].

Le choix des matériaux se fait sur base de plusieurs critères de durabilité, notamment le taux de recyclabilité, le coût, la résistance à la corrosion (étant donné que ces voitures resteront la plupart du temps à l'extérieur) et la ténacité, tout en minimisant la masse totale afin d'optimiser la consommation énergétique.

L'optimisation sous contraintes est alors appliquée. Les formules utilisées ainsi que la démarche pour la sélection des matériaux proviennent du livre *Materials selection in mechanical design* de Michael F. Ashby [212].

Les représentations schématiques de la structure portante ainsi que de sa coupe transversale sont faites à la Figure 4.29.

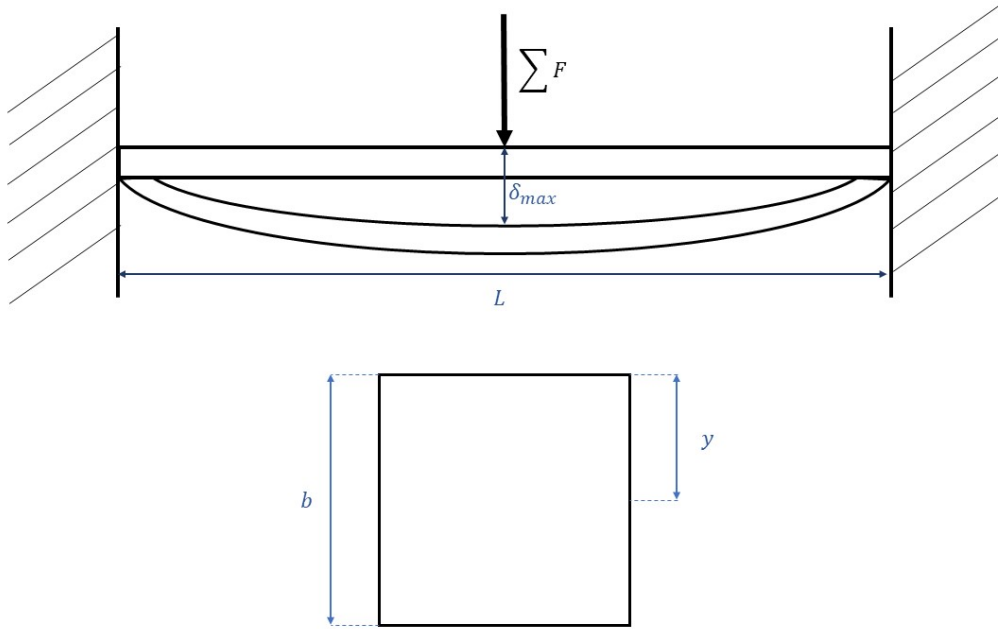


FIGURE 4.29 – Représentation de la structure portante et de sa coupe transversale.

Objectif : l'objectif principal est de minimiser la consommation d'énergie de l'utilisation de la voiture. Il faut donc pour cela minimiser la masse totale de la structure m , exprimée par l'équation 4.1.

$$m = \rho \cdot A \cdot L = \rho \cdot b^2 \cdot L \quad (4.1)$$

où ρ est la masse volumique (kg/m^3), A est la surface de la coupe transversale qui est égale à b^2 (m^2), et L est la longueur de la structure (m).

Contraintes : deux contraintes pour la structure portante du châssis sont considérées et modélisées :

- Une flexion maximale δ_{max} est imposée (voir la Figure 4.29) ;
- Une limite d'élasticité σ_y (indice y pour *yield*) est imposée, pour que la structure résiste aux efforts imposés par le poids des composants de la voiture et le poids des passagers sans se déformer plastiquement.

Les deux contraintes sont ensuite exprimées mathématiquement.

La flexion δ d'une poutre de section carrée est donnée par l'équation 4.2.

$$\delta = \frac{12F \cdot L^3}{C_1 \cdot E \cdot b^4} \quad (4.2)$$

où F (N) est la résultante des forces verticales agissant sur la structure (poids de la voiture et du chargement), C_1 est un coefficient qui dépend de la manière dont les charges sont réparties sur la poutre, et E (Pa) est le module de Young.

À partir de l'équation 4.2, la première contrainte m_1 est exprimée en isolant le terme b^2 et en le réinjectant dans l'équation de la masse à minimiser (Eq 4.1), en veillant à distinguer les paramètres qui varient avec les matériaux. L'équation 4.3 est alors obtenue.

$$m_1 = \sqrt{\frac{12F \cdot L^3}{C_1 \cdot \delta}} \cdot L \cdot \frac{\rho}{\sqrt{E}} \quad (4.3)$$

Le premier indice de performance I_1 correspond alors à la partie de m_1 qui varie avec les matériaux.

$$I_1 = \frac{\rho}{\sqrt{E}} \quad (4.4)$$

La deuxième contrainte est déterminée en partant de la définition de la limite d'élasticité σ_y .

$$\sigma_y = \frac{M \cdot y}{I} \quad (4.5)$$

où M (Nm) est le moment de force ($M = F \cdot L$), I (m^4) est le moment quadratique de la structure ($I = \frac{b^4}{12}$ pour une structure de section carrée) et y (m) est la distance représentée sur la Figure 4.29.

L'équation 4.5 est alors réécrite :

$$\sigma_y = \frac{12F \cdot L}{b^4} \cdot \frac{b}{2} \quad (4.6)$$

À nouveau, en isolant le terme b^2 de cette dernière et en le réinjectant dans l'équation de la masse (Eq 4.1), la deuxième contrainte m_2 est déterminée.

$$m_2 = L \cdot (6L \cdot F)^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{\rho}{\sigma_y^{\frac{2}{3}}} \quad (4.7)$$

Le second indice de performance I_2 correspond à la partie de m_2 qui dépend des matériaux.

$$I_2 = \frac{\rho}{\sigma_y^{\frac{2}{3}}} \quad (4.8)$$

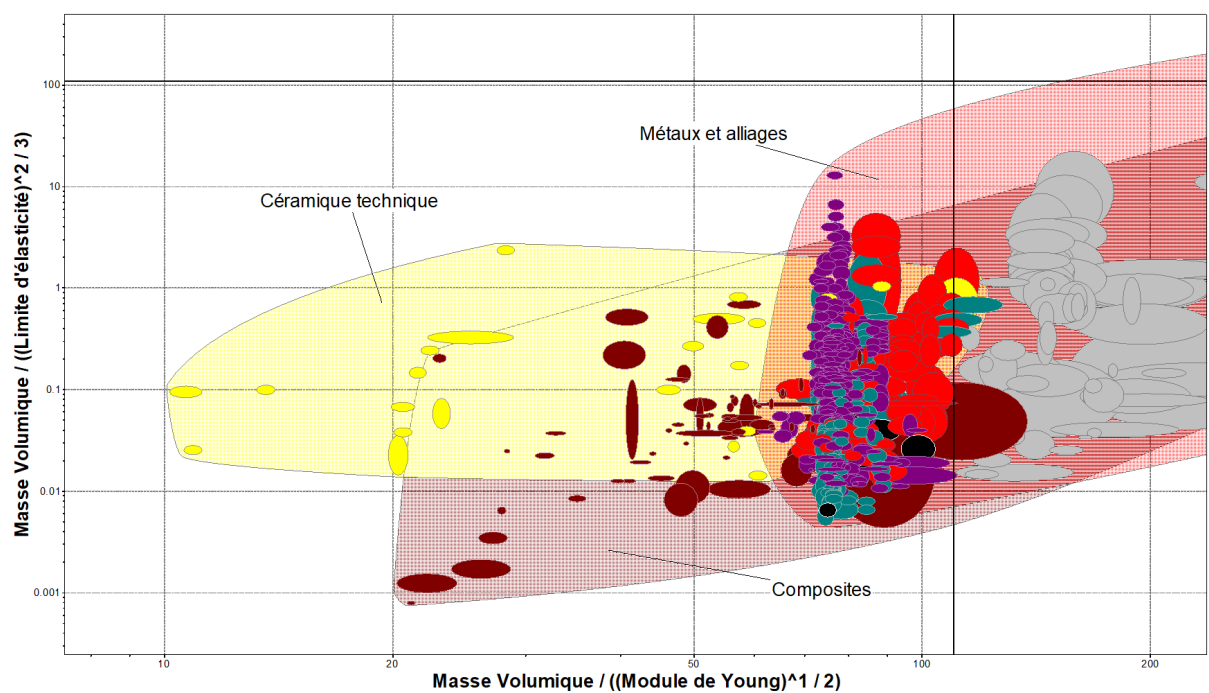


FIGURE 4.30 – Représentation des matériaux selon nos deux indices de performance. Ceux qui minimisent la masse tout en respectant nos deux contraintes sont le plus en bas à gauche [154].

L'usage du logiciel *CES EduPack* (GRANTA Design) permet de représenter les matériaux qui répondent à ces critères. Comme l'objectif est de minimiser la masse totale du véhicule, il faut minimiser les indices de performance I_1 et I_2 déterminés précédemment. Pour visualiser la sélection multicritère, les différents matériaux qui répondent aux contraintes sont représentés sur un graphe dont l'abscisse est l'indice I_1 et l'ordonnée l'indice I_2 , qui doivent être minimisés. Les matériaux les plus adaptés se retrouvent alors dans le coin inférieur gauche de la Figure 4.30. Il en ressort qu'à ce stade, le choix se porte entre les composites et les céramiques techniques.

Il faut cependant prendre en considération d'autres paramètres et contraintes pour que le choix final respecte le cahier des charges établi au début de cette partie. Des limites sont alors imposées à certains paramètres du logiciel *CES EduPack* et sont reprises dans le Tableau 4.9.

La première concerne la ténacité : une limite inférieure de 10 kJ/m^2 est imposée pour garantir une certaine absorption de l'énergie en cas de choc.

La deuxième est liée au prix maximum par unité de volume du matériau. Bien que ce paramètre ne doive pas être le plus contraignant, étant donné l'hypothèse d'une mobilité comme un service (le passager paye un abonnement à un service de mobilité, pas le prix total de la voiture), il est gardé sous un certain seuil. Ces deux premières limites font disparaître la plupart des céramiques et des composites, souvent très chers ou bien ayant une ténacité trop faible.

La troisième représente la résistance à la corrosion. Les matériaux avec une résistance abordable ou excellente sont retenus.

La quatrième limite est celle de l'énergie nécessaire à la production primaire, gardée sous le seuil de 500 MJ/kg .

Enfin, il est imposé que les matériaux soient recyclables selon les méthodes actuelles et connues du logiciel *CES EduPack*.

Ténacité	Minimum 10 kJ/m ²
Prix par unité de volume	Maximum 10 000 EUR/m ³
Résistance à la corrosion	Acceptable/Excellente
Énergie grise, production primaire	Maximum 500 MJ/kg
Recyclable	Oui

TABLEAU 4.9 – Limites imposées pour affiner le choix des matériaux.

La Figure 4.31 représente les matériaux restants après l'application des limites. Les principaux sont les alliages d'aluminium et d'acier.

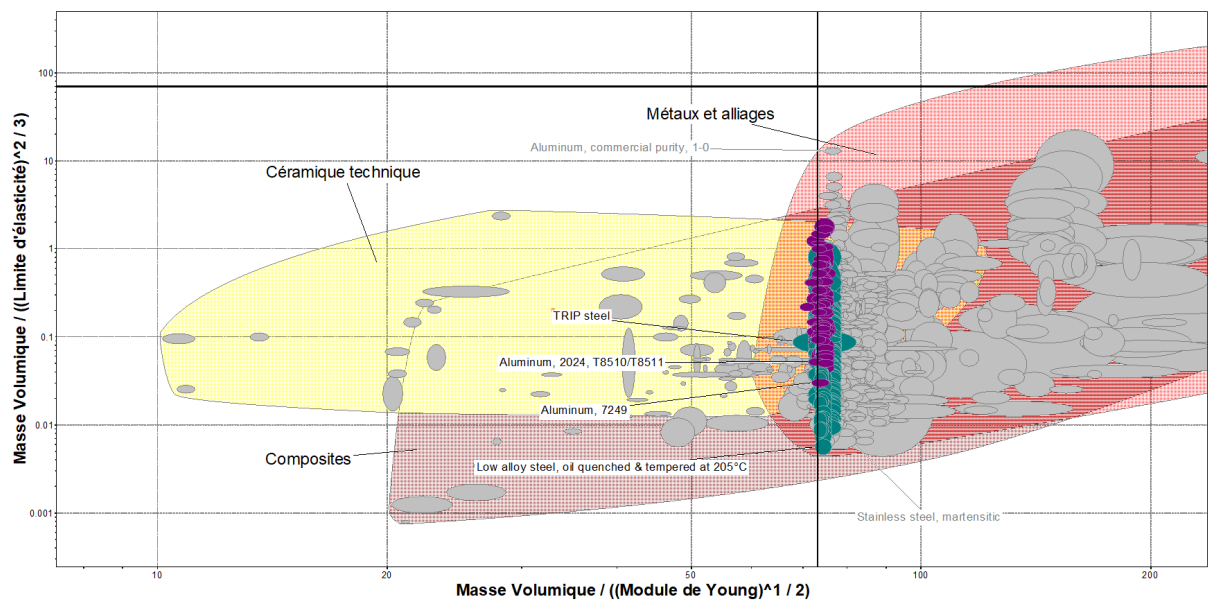


FIGURE 4.31 – Choix de matériaux en utilisant les deux indices de performance et des limites pour différents paramètres [154].

Sur base de ces résultats et du cahier des charges, quatre matériaux envisageables pour la structure portante de la VA sont sélectionnés. Ceux-ci sont le *TRIP steel*, l'*Aluminium, 2024, T8510/T8511*, l'*Aluminium 7249* et le *Low Alloy Steel, oil quenched*.

Le choix final s'effectuera en fonction de la comparaison établie dans le Tableau 4.10.

Il est estimé que le matériau qui offre le meilleur compromis est le *Low Alloy Steel, oil & quenched*. En effet, celui-ci optimise les deux indices de performance I_1 et I_2 , il possède une énergie à la production primaire plus faible et un prix plus avantageux que les autres possibilités. Enfin, il a une limite d'élasticité plus élevée, ce qui rend la structure plus solide et plus résistante en cas de forte charge.

	Masse volumique (kg/m^3)	Limite d'élasticité (MPa)	Prix ($€/m^3$)	Énergie production primaire (MJ/kg)
TRIP steel	7850	600	8000	30
Aluminium, 2024, T8510/T8511	2760	400	5000	200
Aluminium 7249	2650	410	4500	200
Low Alloy Steel, oil quenched	7800	2000	4600	32

TABLEAU 4.10 – Comparaison des matériaux répondant au cahier des charges.

4.2.2 Variations de la consommation d'énergie

Une question qui va de pair avec le développement d'un parc automobile autonome est de savoir comment la consommation totale d'énergie varierait par rapport à une VE actuelle non-autonome.

D'une part, l'automatisation des véhicules présente des opportunités pour réduire la consommation des déplacements en octroyant des opérations plus efficaces et en facilitant la mobilité partagée qui diminue le nombre de voitures en circulation. D'autres paramètres interviennent, comme le taux d'occupation amélioré (*right-sizing*) et la masse du véhicule (choix des matériaux, optimisation de la masse de la batterie grâce aux nouvelles technologies, etc.).

D'autre part, les systèmes permettant l'autonomie (capteurs, systèmes de communication, systèmes de stockage des données, etc.) ainsi que les conséquences de cette nouvelle forme de mobilité sur les consommateurs peuvent alourdir le bilan énergétique.

Dans cette partie, ces différents facteurs sont développés à partir d'analyses de la littérature scientifique [213, 214, 215]. Nous distinguerons les impacts directs des VA sur la consommation des effets de la conduite autonome partagée sur le comportement des utilisateurs.

4.2.2.1 Effets de la conduite autonome sur la consommation d'énergie

Diminution de la congestion et choix d'itinéraire optimal Il a été montré que la congestion routière est responsable d'une augmentation de la consommation d'énergie de la voiture. Une recherche a estimé la proportion annuelle de carburant gaspillée aux États-Unis à cause de la congestion depuis 1984 : elle a augmenté régulièrement, passant de 0,5 % en 1984 à 1,8 % en 2005, et devrait atteindre 2,6 % d'ici 2020 [216].

Grâce aux VA, à leur choix d'itinéraire intelligent en fonction du trafic et à leur diminution du nombre d'accidents, les routes seraient décongestionnées et cela permettrait un gain d'énergie de 5 à 20 % [215, 217]. Par exemple, elles peuvent trouver le chemin qui satisfait certains objectifs, comme minimiser le nombre d'intersections, répondre aux besoins de plusieurs passagers et disperser les voitures sur le réseau routier pour éviter une circulation dense.

Écoconduite et cycles de conduite plus lisses La conduite autonome permettrait des cycles de conduite plus lisses en évitant les accélérations et les freinages brusques, grâce à la connaissance en amont des conditions de la route (courbure, pente, intersections, etc.) et du trafic (communications V2V et V2I). Ainsi, l'*écoconduite* diminuerait la consommation d'énergie de 10 à 20 % [218].

Contrôle d'intersection automatisé En zone urbaine, les arrêts et les démarrages répétitifs aux feux de signalisation ont un coût énergétique non négligeable et peuvent être une source d'inconfort pour les passagers. Ils peuvent être évités grâce au *Signal Phase and Timing* (SPaT), qui fait référence aux communications associées aux intersections routières dans une structure V2I. Elles sont envoyées aux véhicules autonomes en approche pour que ceux-ci ajustent automatiquement leur vitesse de manière à traverser l'intersection sans devoir s'arrêter et redémarrer. Des simulations [219, 220] ont montré que des véhicules autonomes faisant usage de ces communications possèdent un gain d'énergie jusqu'à 25 % selon les conditions des essais. Il est également envisageable de regrouper les voitures pour que celles-ci traversent les intersections en peloton, ce qui permettrait un gain d'énergie jusqu'à 20 % [221, 222].

Sur le long terme, ces communications seront généralisées et remplaceront les feux de signalisation, ce qui octroiera à nouveau un changement de la consommation d'énergie de ces infrastructures.

Conduite en peloton La conduite en peloton (*platooning*) rendue possible par les communications V2V consiste à coordonner les voitures en une file qui avance à vitesse constante. L'écart entre les véhicules est minime, ce qui permet d'augmenter la capacité des routes et d'améliorer l'aérodynamisme de l'ensemble. Le *platooning* entraîne des économies d'énergie considérables en améliorant le flux de trafic, le cycle de conduite et en diminuant les forces de traînée. Plusieurs simulations ont été réalisées et montrent un gain d'énergie de 5 à 15 %, en fonction de la vitesse de croisière et les variations de celle-ci,

de l'espacement entre les véhicules, de l'aérodynamique de base des voitures et de la taille du peloton [223, 224]. Les véhicules au milieu du peloton en profiteront davantage, tandis que ceux en tête et en bout de file auront un gain minime.

Taux d'occupation des véhicules Selon les chiffres d'une étude américaine réalisée en 2017, les trajets en voiture avec une ou deux personnes à bord représentent respectivement 58 et 25 % de l'ensemble des kilomètres parcourus aux États-Unis. Elle estime également l'occupation moyenne des voitures en circulation (de type citadine) à 1,67 place, bien que la majorité de celles-ci en dispose 4 [225].

Grâce à un service de mobilité autonome partagée, l'occupation de chaque véhicule sera optimisée en fonction des besoins des utilisateurs (*right-sizing*) : une voiture monoplace de faible consommation pour un passager souhaitant voyager seul, une voiture compacte biplace (de type *Smart*) pour deux personnes, une de taille moyenne pour un groupe de 3 ou 4 passagers, et un minivan pour les plus grands groupes. Une recherche sur les effets du *right-sizing* pour les robotaxis a été menée et estime une économie d'énergie entre 21 et 45 % [213].

Conduite à vide Bien que la conduite autonome présente de nombreux atouts pour l'efficacité énergétique des transports, elle possède aussi ses défauts. En particulier, des situations où des voitures roulent à vide pourraient se produire, à la recherche de passagers ou pour rejoindre un point de connexion V2G. L'algorithme d'optimisation des déplacements minimisera ces trajets, qui représenteraient tout de même une perte d'énergie de 6 à 14 % [226].

Augmentation des limitations de vitesse Avec l'arrivée de la conduite autonome, des adaptations des limitations de vitesse pourraient être envisagées. En effet, les temps de réaction plus courts et les communications entre les véhicules (V2V) pour l'anticipation d'événements permettraient de rehausser ces limites, tout en assurant la sécurité des passagers. Cependant, comme les pertes d'énergie liées aux forces de frottement augmentent avec le carré de la vitesse, cela aurait un impact sur la consommation totale. En première approximation, si la vitesse maximale sur autoroute passe de 130 km/h à 160 km/h, l'augmentation de la consommation d'énergie d'une citadine serait de 30 % [227].

Infrastructures liées à la communication Les infrastructures qui supporteront les communications V2V et V2I sont également à prendre en considération dans le bilan d'énergie de la VA, en particulier les réseaux de télécommunication et les centres de stockage de données.

Comme détaillé dans le Chapitre 3, il est prévu que la voiture envoie environ 25 Gb/h de données sur le *cloud*, dans des data centres, en utilisant le réseau cellulaire. Sachant que l'énergie nécessaire pour stocker 1 gigabyte dans un centre de données est en moyenne de 5,12 kWh [228], il faut compter une puissance d'environ 128 kW par voiture pour alimenter ces infrastructures de stockage et leur refroidissement. Ce résultat est à nuancer, à mesure que les données ne seraient pas stockées éternellement et que l'efficacité énergétique des data centres est en constante amélioration [229].

À cela s'ajoute l'énergie nécessaire aux télécommunications. Le constructeur Nokia [230] a estimé la quantité de données que peut traiter une station 5G avec une énergie de 1 kWh. La Figure 4.32 illustre l'avantage énergétique qu'offre la 5G par rapport à la génération précédente, grâce à sa bande passante plus large, ses antennes moins énergivores et les modes de veille de ses stations de base.

Selon les prévisions pour 2025, la macrocellule 5G pourrait traiter 45 Gb de données avec 1 kWh d'énergie. Si la voiture transmet 25 Gb/h, la puissance de la macrocellule nécessaire par voiture doit être de 0,556 kW.

Ces résultats ne constituent qu'une première estimation et ne tiennent compte que des échanges de données générées par les capteurs de la voiture. À cela s'ajoutent les données générées par les infrastructures routières (état du trafic, contrôle d'intersections, etc.) ainsi que les données liées aux systèmes multimédias (streaming de musique ou de films).

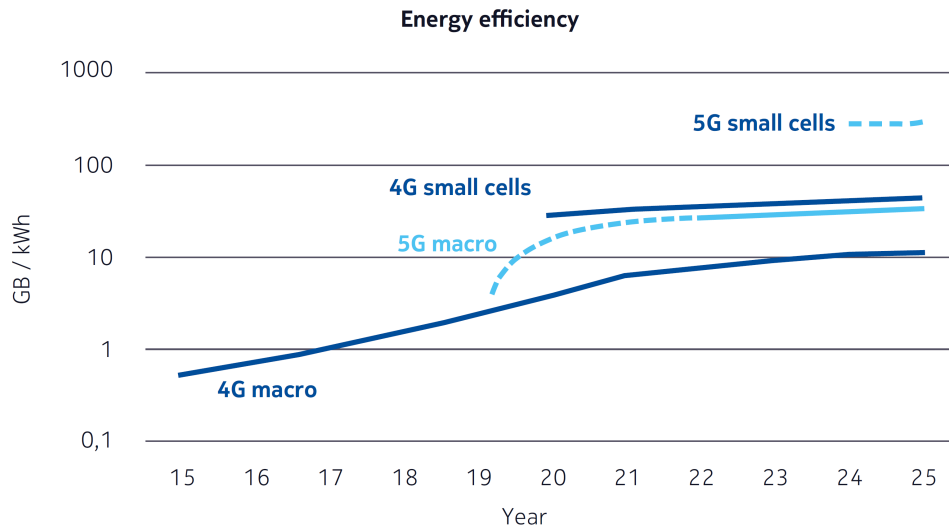


FIGURE 4.32 – Données transmises par kWh d'énergie pour la 4G et la 5G [230].

Équipements internes liés à l'autonomie Les équipements internes à la voiture qui supportent la partie autonome (capteurs, superordinateur, DSRC, etc.) vont impacter négativement la consommation d'énergie pour trois raisons.

Premièrement, ces composants sont alimentés par l'électricité stockée dans la batterie de la voiture. Le Tableau 4.11 reprend leur masse, leur puissance consommée en utilisation et leur énergie nécessaire à la production. Ces informations proviennent du constructeur Waymo [39], qui utilise pour son système d'automatisation 9 caméras, 4 radars, un LiDAR primaire (Large), 4 LiDAR secondaires (Small), une puce *Global Positioning System* (GPS)/*Inertial Navigation System* (INS), un système *Dedicated Short Range Communication* (DSRC, plus énergivore qu'une puce 5G) et 2 ordinateurs. La masse totale de ces composants avec leur structure portante est de 55,4 kg et ils consomment 321 W de puissance.

Caractéristique	Caméra	RADAR	L LiDAR	S LiDAR	GPS/INS	DSRC	CPU
Masse (kg)	0,055	0,285	12,250	0,830	0,640	2,654	5,075
Usage (W)	2,1	4	60	8	2	6	96
Production (MJ)	50	410	2330	280	370	1510	1230

TABLEAU 4.11 – Caractéristiques des capteurs utilisés par le constructeur Waymo.

Deuxièmement, ces systèmes augmentent la masse du véhicule de 55,4 kg, ce qui augmente également sensiblement la consommation d'énergie.

Troisièmement, les composants montés en surface à l'extérieur de la voiture peuvent altérer son aérodynamisme. En effet, il est nécessaire de penser à un design qui minimise les bords tranchants et la surface frontale projetée, qui sont source de turbulences autour du véhicule à hautes vitesses et qui impliquent une augmentation de la consommation pour maintenir ses performances. Il n'y a pas d'étude qui chiffre cet effet, mais un parallèle peut être fait avec les barres de toit qui entraînent une surconsommation d'environ 15 % [231] en supposant un partage ville/autoroute de 55 % / 45 % pour l'estimation des vitesses. Il est à prévoir que, sur le long terme, ces composants seront mieux intégrés à la voiture et n'auront pas ou peu d'impact sur l'aérodynamisme.

4.2.2.2 Influence du comportement des utilisateurs sur la consommation d'énergie

Les conséquences directes de la conduite autonome partagée sur la consommation d'énergie de la voiture ont été exposées. Il reste à étudier les effets qu'aurait cette nouvelle forme de mobilité sur le comportement des utilisateurs, qui influenceraient *in fine* la consommation d'énergie [213].

Baisse des prix et mobilité plus accessible En supposant une mobilité autonome partagée et utilisée comme un service, les coûts au kilomètre des déplacements pourraient diminuer significativement par rapport à ceux d'un véhicule privé actuel, comme évoqué à la Section 2.6. Pour rappel, le prix d'un trajet en robotaxi pourrait être de 0,4 €/km comparé au coût actuel d'un véhicule privé (ICE) de 0,6 €/km. Cet avantage économique, combiné à l'augmentation de la productivité des passagers pendant les déplacements, pourrait augmenter le nombre, la fréquence et la durée des trajets.

En plus d'une augmentation probable du nombre de trajets effectués par les conducteurs actuels, de nouveaux groupes d'utilisateurs pourraient émerger. Les personnes âgées, les jeunes, les personnes sans permis et les personnes à mobilité réduite profiteraient de cette mobilité plus accessible, plus pratique et moins chère que les services de covoiturages actuels.

Selon une étude [213], cet effet rebond d'une utilisation plus intense des voitures augmenterait leur consommation d'énergie de 5 à 60 %, en fonction de la diminution attendue des coûts de la mobilité, du taux de pénétration des VA et de leur taux d'utilisation. La même étude estime que l'arrivée de nouveaux groupes d'utilisateurs se traduirait par une consommation d'énergie augmentée de 2 à 10 %.

4.2.2.3 Tableau récapitulatif

Pour finir, le Tableau 4.12 reprend les principales variations attendues concernant la consommation d'énergie des VA pendant leur utilisation par rapport à la situation actuelle. Les gains d'énergie correspondent à une variation négative.

Facteur	Variations de la consommation d'énergie par VA
Diminution de la congestion	-5 à -20 %
Écoconduite	-10 à -20 %
Contrôle d'intersection automatisé	Jusqu'à -20 %
Conduite en peloton	-5 à -15 %
Taux d'occupation des véhicules	-21 à -45 %
Conduite à vide	+6 à +14 %
Augmentation de la vitesse limite sur autoroute à 160 km/h	+30 %
Transmission et stockage de données	Puissance de 130 W
Équipements internes liés à l'autonomie	Puissance de 320 W pour les composants ; + 15,6 % pour pertes par frottements (trainée)
Baisse des prix du transport	+5 à +60 %
Nouveaux groupes d'utilisateurs	+2 à +10 %

TABLEAU 4.12 – Conséquences de la conduite autonome et partagée sur la consommation d'énergie.

4.2.3 Cas d'étude : évolution de la consommation d'une VE rendue autonome

Dans cette partie, une estimation chiffrée de la consommation d'énergie d'une VA est établie sur base d'un modèle de VE existant.

Pour rappel, le cas d'étude (Section 2.7) concerne une situation à très long terme en Belgique, où le parc automobile comprend environ 600 000 voitures entièrement électriques, autonomes et utilisées principalement en mobilité partagée. Chaque VA est en moyenne en circulation à 60 % du temps, les 40 % restants étant destinés à la recharge, au support du réseau électrique en V2G, aux éventuels entretiens/réparations, à la demande en mobilité réduite pendant les heures creuses, etc. De plus, une VA partagée remplacerait 10 véhicules privés actuels. Alors, sachant qu'une voiture belge parcourt en moyenne 15 000 km par an, la VA en parcourrait en théorie 10 fois plus, ce qui revient à plus ou moins 410 km par jour.

Tout d'abord, un modèle de VE actuellement sur le marché et possédant des caractéristiques similaires au cas d'étude est sélectionné. Idéalement, celle-ci devrait avoir une autonomie relativement élevée pour assurer un taux d'utilisation de 60 %, une carrosserie composée d'un mélange d'acier et d'aluminium, un moteur exempt de terres rares et une batterie minimisant l'utilisation de cobalt. Ensuite, la VE est rendue autonome de niveau 5 en y intégrant les différents composants repris dans le Tableau 4.11 à savoir 1 LiDAR primaire, 4 secondaires, une puce GPS/INS, un système DSRC et deux ordinateurs, de façon analogue au système autonome du constructeur Waymo. Sa batterie est remplacée par une Li-air, qui fournit la densité d'énergie la plus élevée (voir pour rappel le Tableau 4.5), en supposant qu'à long terme cette technologie est parfaitement opérationnelle. Enfin, la VE rendue autonome est inscrite dans un schéma de mobilité partagée, avec ses conséquences sur la consommation d'énergie telles que décrites dans la sous-section 4.2.2.

La Tesla Model 3 Long Range RWD (modèle 2017) semble adéquate pour une première estimation [232]. Sa consommation électrique à l'utilisation est de 153 Wh/km pour une autonomie réelle de 485 km en moyenne. Elle embarque une technologie de batterie Li-ion NCA avec une masse de 478 kg et une densité d'énergie de 0,157 kWh/kg. Elle est propulsée par un moteur électrique à réluctance commutée, sans aimant permanent, et sa masse totale à vide est de 1730 kg.

Pour déterminer la consommation d'énergie au kilomètre de la VA, nous nous basons sur celle de son homologue non autonome de 153 Wh/km et nous l'adaptions selon le Tableau 4.12. Pour estimer l'énergie consommée par les systèmes de communication, leur puissance totale de 321 W est multipliée par 24h et par le taux d'utilisation de la voiture (0,6) et divisée par le nombre de kilomètres quotidien (410 km), ce qui revient à 11,274 Wh/km.

Le Tableau 4.13 reprend les variations de la consommation d'énergie de la Tesla Model 3 rendue entièrement autonome et partagée.

Dans le meilleur cas, qui maximise les effets décrits dans chaque paragraphe de la sous-section 4.2.2, le gain d'énergie par rapport au modèle actuel est de 82,67 Wh/km. En revanche, pour le cas le moins favorable qui accentue les effets négatifs induits par la mobilité autonome partagée, l'augmentation de la consommation est de 116,23 Wh/km.

Ainsi, selon les hypothèses et le choix de dimensionnement, la consommation d'électricité de cette VA est comprise entre 70,334 et 269,234 Wh/km dans sa phase d'utilisation ; la consommation moyenne est alors de 169,784 Wh/km. Ces résultats ne tiennent pas compte de l'énergie nécessaire pour sa fabrication et pour son traitement en fin de vie.

À l'échelle d'un pays comme la Belgique, qui posséderait à terme environ 600 000 VA, la consommation d'électricité moyenne de tout ce parc est estimée à 101,87 MWh/km. Le réseau électrique devrait alors fournir annuellement 16,98 TWh, en prenant en compte un rendement de charge de 90 % similaire à celui de la Tesla Model 3. Le parc autonome consommerait à lui seul plus de 20 % de la production totale d'énergie de ce pays, estimée à 80,29 TWh en 2017 [233]. Pour assurer la demande en électricité de ce parc autonome, il faudrait lui dédier une centrale nucléaire (production annuelle de Tihange : 18 TWh), ou près de 3 fois la totalité du parc éolien belge de 2018 (production annuelle de 6,418 TWh).

Le calcul de la consommation d'énergie a été fait en considérant que la masse de la batterie intégrée

à la VA est égale à celle de la Tesla (278 kg), ce qui n'est pas le cas étant donné l'utilisation d'une technologie différente. Ainsi, pour comparer la masse de la batterie Li-air par rapport à la Li-ion NCA dans ce cas de figure, une autonomie égale pour les deux voitures (485 km) est imposée et est multipliée par la consommation trouvée ci-dessus. La capacité de stockage est alors comprise entre 34,11 et 130,58 kWh. En divisant ces résultats par la densité d'énergie réelle de la Li-air (1,70 kWh/kg), la masse de la batterie est déterminée entre 20,07 et 76,81 kg, ce qui ne représente que 4 à 16 % de celle de la Tesla. La masse totale du véhicule passe donc de 1730 à 1355 kg en moyenne, en tenant compte des systèmes de communication (voir Tableau 4.11). La diminution de la masse à vide de la voiture entraîne à nouveau une diminution de la consommation d'énergie, qu'il faudrait prendre en compte dans une deuxième approximation.

La comparaison des caractéristiques de la Tesla Model 3 actuelle et du même véhicule rendu entièrement autonome et inscrit dans une mobilité partagée est reprise dans le Tableau 4.14.

Nous avons fourni une première approximation de la consommation d'énergie d'une VA qui répond à notre cas d'étude et à nos hypothèses. Nous avons déterminé que celle-ci est comprise entre 45 et 175 % de celle d'une VE aux caractéristiques similaires, non autonome et en utilisation individuelle. Une étude plus approfondie permettrait dans un premier temps d'inclure la consommation des systèmes de divertissement à bord ainsi que l'effet de la diminution de la masse de la batterie, et dans un deuxième temps de comparer différents scénarios : l'utilisation combinée de la voiture et d'autres moyens de transport (vélo, train, avion, etc.), l'utilisation individuelle de la voiture, etc. Il serait également intéressant de considérer le cycle de vie complet de la VA ainsi que les matériaux et l'énergie nécessaires à la construction des bornes de rechargement, des antennes relais pour la 5G, des data centres pour le stockage des données, des usines robotisées qui assumeront la construction de ces voitures, etc. De plus amples recherches sur l'infrastructure autour de la VA devront être réalisées pour juger de façon plus précise son impact énergétique global avant sa commercialisation à grande échelle.

Facteur	Variation de la consommation d'énergie (en Wh/km)
	Consommation de référence : 153 Wh/km
Diminution de la congestion	-7,65 à -30,6
Écoconduite	-15,3 à -30,6
Contrôle d'intersection automatisé	Jusqu'à -30,6
Conduite en peloton	-7,65 à -22,95
Taux d'occupation des véhicules	-32,13 à -68,85
Conduite à vide	+9,18 à +21,42
Augmentation de la vitesse limite sur autoroute à 160 km/h	+45,9
Équipements internes liés à l'autonomie	+ 11,274 et +23,87 pour la trainée
Baisse des prix du transport	+7,65 à +91,8
Nouveaux groupes d'utilisateurs	+3,06 à +15,3
Estimation consommation totale	Minimale : 70 Wh/km Maximale : 270 Wh/km

TABEAU 4.13 – Variation de la consommation d'énergie d'une Tesla Model 3 rendue autonome selon nos hypothèses.

	VE (Tesla Model 3)	VA
Consommation électrique (Wh/km)	153	70,334 à 269,234
Autonomie (km)	485	485
Type de batterie	Li-ion NCA	Li-air
Capacité batterie (kWh)	75	34,11 à 130,58
Densité d'énergie réelle (kWh/kg)	0,157	1,70
Masse batterie (kg)	478	20,07 à 76,81
Masse totale véhicule à vide (kg)	1730	1327,47 à 1384,21

TABLEAU 4.14 – Comparaison entre la Tesla Model 3 actuelle et le même modèle rendu complètement autonome et inscrit dans un schéma de mobilité partagée.

Chapitre 5

Synthèse

Nos recherches et analyses précédentes sont résumées dans un tableau, conformément à la méthodologie de Michael F. ASHBY de la Figure 1. Il reprend notre interprétation des impacts des VA sur les trois piliers du développement durable expliqués ci-dessous [234] : le social, l'écologie et l'économie.

- **La dimension sociale** représente l'impact sur la population. Son but est de satisfaire les besoins humains et de répondre à un objectif d'équité sociale, en favorisant la participation de tous les groupes sociaux sur les questions de santé, de logement, de consommation, d'éducation, d'emploi, de culture, etc.
- **La dimension environnementale** s'assure de préserver, d'améliorer et de valoriser l'environnement et les ressources naturelles sur le long terme, en maintenant les grands équilibres écologiques, en réduisant les risques et en prévenant les impacts environnementaux ;
- **La dimension économique** est le pilier de la prospérité. Il représente le développement de la croissance et de l'efficacité économique, à travers des modes de production et de consommation durables.

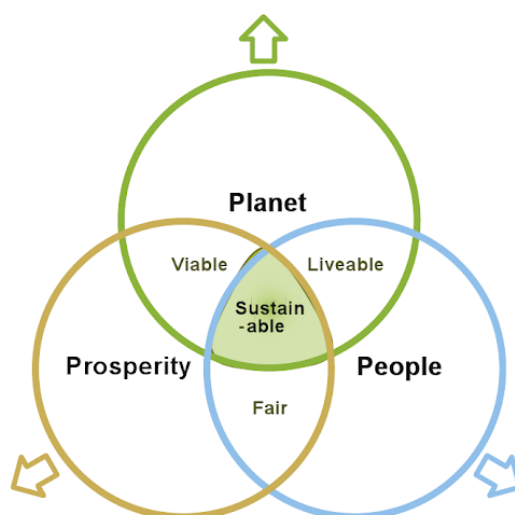


FIGURE 5.1 – Les trois piliers du développement durable [1].

TABEAU 5.1 – Synthèse des impacts sur les trois piliers du développement durable

	Dimension sociale	Dimension environnementale	Dimension économique
Matériaux	(-) Pays extracteurs des matériaux : mauvaises conditions de travail et exploitation des enfants ;	(+) Moins de voiture produite $\Rightarrow$ diminution de la demande en matériaux ; (+) Possibilité de choisir des matériaux structurants robustes et recyclables ; (-) Augmentation de l'instrumentation électronique $\Rightarrow$ plus de ressources minérales nécessaires ;	(+) Diminution de la dépendance aux pays producteurs des matières premières grâce à la <i>European Battery Alliance</i> et grâce aux alternatives aux terres rares dans les moteurs ; (+) Moteur électrique plus durable : tient facilement ± 1 million de km ; (+) Entretien automatique des véhicules $\Rightarrow$ plus durables dans le temps ; (-) Nécessite de créer des infrastructures de recyclage pour les matériaux ;
Énergie	(+) Forte baisse de la dépendance des pays producteurs de pétrole ; (+) Réseau électrique plus stable grâce au V2G ;	(+) Potentiel d'augmentation des énergies renouvelables grâce au V2G ; (+/-) Diminution/augmentation de la consommation d'énergie au kilomètre ; (-) Énergie grise importante : alimentation des data centres, cycle de vie des voitures et des batteries, etc.	(+) Création d'emplois dans le secteur énergétique ; (-) Nécessite des moyens de production d'électricité supplémentaires ; (-) Nécessite investissements dans des points de recharge ;
Environnement	(+) Meilleur aménagement du territoire ; (+) Centres-villes plus <i>propres</i> car décongestionnés et meilleure qualité de l'air ; (+) Taxis urbains autonomes : plus compacts ; (+) Covoiturage facilité ; (-) Effets de la multiplication des champs électromagnétiques sur l'humain ;	(+) Moteur électrique : empreinte carbone plus faible à l'utilisation ; (-) Effets de la multiplication des champs électromagnétiques sur l'environnement ; (-) Empreinte carbone élevée pour extraction des matériaux ; (-) Augmentation de l'étalement urbain ;	(+) La technologie V2G appuiera le développement des énergies renouvelables à faible impact carbone ; (+) Diminution des coûts liés à la congestion routière ;

	Dimension sociale	Dimension environnementale	Dimension économique
Législation	(+/-) Glissement de la responsabilité vers les fournisseurs (constructeurs, développeurs de logiciel, etc.) ; (-) Besoin de lois sur la protection des données personnelles ;	(+) Législation sur le recyclage pour inciter l'économie circulaire ;	(-) Coûts additionnels pour les lois sur la fin de vie des composants ;
Économie	(+/-) Création/suppression d'emplois dans secteurs routiers ; (+) Économie de service, et non de produit ⇒ réparation des coûts ; (+) Réduction coût total par km ;	(+) Économie circulaire favorisée ;	(-) Nécessite des subsides importants pour le déploiement et l'entretien des infrastructures et de la flotte autonome ; (-) Nécessite des investissements importants dans de nouvelles centrales de production d'électricité ;
Société	(+) Mobilité accessible à tous ; (+) Décongestion, gain de temps sur les routes ; (+) Productivité accrue ; (+) Déplacements multimodaux facilités ; (-) Anxiété et scepticisme d'être transporté par un robot, risque de piratage ; (-) Effet rebond : augmentation du nombre et de la fréquence des déplacements ; (-) Stockage et utilisation des données personnelles : atteinte à la vie privée ;	(+) Constitue une alternative aux déplacements court-courriers en avion ;	(+) Crée de l'emploi dans le high-tech ; (+) Stimule l'économie locale ; (+) Sécurité accrue : diminution des coûts liés aux accidents de la route ;
Synthèse	(+) Décongestion du trafic, centres-villes plus propres ; (+) Mobilité plus accessible, coût diminué ; (+/-) Économie du service, mobilité partagée ; (-) Déshumanisation des transports ;	(+) En faveur du développement des énergies renouvelables (-) Énergie grise : alimentation data centres, infrastructures, production et recyclage des voitures,...	(+) Stimule l'économie, crée de l'emploi (-) Investissements importants nécessaires pour les infrastructures, le recyclage,...

Réflexion et conclusion

Estimer et étudier la durabilité d'un produit ou d'un service relève d'une complexité certaine, comme l'a démontré notre travail. Les interprétations des résultats peuvent être multiples et il n'est donc pas possible de présenter une réponse unique et évidente aux questions de développement durable. Cependant, nous avons abordé le problème par l'analyse de couches de Ashby (Figure 1) qui définit un cadre pour fournir une réponse documentée, identifier les différentes hypothèses potentiellement opposées les unes aux autres et établir le meilleur compromis.

Ainsi, nous avons commencé par définir le contexte de l'étude en nous concentrant sur les VA électriques de niveau 5, et en supposant une situation à long terme où celles-ci constitueraient l'ensemble du parc automobile. Nous avons ensuite mis en évidence les nombreux acteurs impliqués, en soulignant le fait que certains métiers auront sûrement tendance à disparaître pour laisser place à de nouveaux, plus adaptés.

De plus, nous avons effectué une recherche de faits sur six secteurs et nous avons approfondi les systèmes de communication, les matériaux utilisés et l'impact énergétique.

Enfin, nous avons résumé les principaux effets sur les trois piliers du développement durable dans le Tableau 5.1.

La dernière étape de la méthode d'Ashby est celle de la réflexion. Sur base des résultats de nos recherches et du tableau de synthèse du Chapitre 5, nous en construisons une autour de la question formulée en introduction : *comment la VA utilisée en mobilité partagée peut-elle constituer une alternative durable à la mobilité d'aujourd'hui ?*

D'un côté, la VA et ses avancées technologiques sur le plan des batteries et des matériaux peuvent constituer une solution durable une fois bien implémentées pour en tirer tous les bénéfices. Nous l'expliquons en mettant en lumière les trois intersections des piliers du développement durable, représentées à la Figure 5.1.

Premièrement, le caractère **équitable** se distingue par les points suivants : le déploiement du concept de *MaaS* ainsi que la répartition et la diminution des coûts de la voiture grâce à la mobilité autonome partagée permettent un meilleur accès au transport. De plus, l'économie locale est stimulée par la création d'emplois dans les secteurs énergétiques et techniques, par l'augmentation de la productivité des voyageurs, par la décongestion du trafic et par la réduction du nombre d'accidents. Enfin, les nouvelles technologies de batterie (Li-air, Zn-air, Li-S) et les moteurs électriques sans terres rares diminuent l'utilisation de matériaux critiques mais aussi les contraintes géopolitiques et sociales associées. La transition vers une mobilité électrique réduit également la dépendance aux pays extracteurs de pétrole.

Deuxièmement, le caractère **vivable** est marqué par les aspects électriques et partagés. Ils permettent une décongestion et une meilleure qualité de l'air, ce qui rend les centres-villes plus agréables. De plus, les nouvelles technologies de batteries diminuent l'utilisation des matériaux critiques tout en offrant une plus grande autonomie. Enfin, l'impact carbone de ces voitures est également relativement bas, et sera d'autant plus faible que l'énergie nécessaire à leur cycle de vie est produite par des sources renouvelables. À ce propos, la VA permet une meilleure gestion de ces énergies en jouant le rôle de réserve d'électricité.

Troisièmement, le caractère **viable** est accentué par les nouvelles technologies de batterie et de mo-

teur électrique, dont les matériaux sont moins coûteux et moins nocifs pour l'environnement en termes d'extraction et de recyclage. D'autres exemples de la viabilité de la VA sont les communications V2G et l'utilisation des énergies renouvelables, la diminution des coûts liés à la congestion ainsi que l'économie circulaire du recyclage.

D'un autre côté, la VA entraîne des effets négatifs et des problématiques à plus hautes contraintes qui nuancent son aspect durable. Notamment l'augmentation de la demande en matériaux pour les systèmes autonomes, le besoin d'une infrastructure fiable et bien développée pour l'autonomie et pour la recharge électrique, et une consommation d'énergie à la hausse. Il faut en effet tenir compte du cycle de vie de chaque composant de la voiture (capteurs, ordinateurs, systèmes multimédias, etc.), de l'énergie nécessaire aux échanges de données (réseaux d'antennes, centres de stockage, etc.) ainsi que de celle utilisée pour construire, entretenir et alimenter toutes les infrastructures routières qui y sont liées. De plus, certains effets rebonds comme le fait que la mobilité sera plus accessible et que le prix du transport sera moins élevé risquent d'augmenter la fréquence et le nombre de déplacements. Cela pourrait se traduire par une hausse de la consommation et des échanges de données. Enfin, les possibles effets néfastes de la multiplication des radiations électromagnétiques et des ondes millimétriques sont aussi à considérer. En effet, ceux-ci pourraient avoir des conséquences sur la faune terrestre et sur l'être humain.

La VA électrique partagée peut alors apporter à terme une solution durable à la mobilité actuelle pour autant que son développement respecte un certain nombre de recommandations.

Tout d'abord, l'industrie automobile a tout intérêt à diminuer l'utilisation de matériaux critiques. Pensons aux solutions existantes comme les moteurs électriques sans terres rares, les batteries NMC-811 qui utilisent moins de cobalt ou les batteries au stade de recherche, plus écologiques et plus performantes. Les acteurs politiques devraient être sensibilisés à ces aspects et promouvoir l'économie circulaire en investissant dans des infrastructures de recyclage efficaces et respectueuses de l'environnement, comme l'hydrométallurgie par biolixiviation. Cela réduirait la dépendance aux pays producteurs de matières premières, améliorerait l'aspect viable de la voiture et répondrait à la demande de plus en plus importante en matériaux pour les capteurs, les batteries et le moteur. Aussi, le développement des *Smart Grids* devrait se faire en parallèle avec celui des VA pour profiter des avantages qu'offre le V2G. Cela favoriserait le déploiement des énergies renouvelables en comblant leur caractère intermittent néfaste pour le réseau. L'idéal serait alors d'alimenter toute la chaîne de production et l'utilisation des VA avec ces énergies.

Se pose également la question du choix de la 5G comme standard pour les communications V2V et V2I. Étant donné ses enjeux sur la santé et sur l'environnement, est-ce vraiment indispensable ? Il serait souhaitable de privilégier un autre système, comme les communications DSRC couplées avec le réseau 4G existant. Il importe également de s'assurer de la fiabilité et de l'efficacité du système autonome tout en évitant la multiplication des capteurs à bord de la voiture, par exemple en considérant la combinaison RADAR+Caméra qui remplit les mêmes fonctions qu'un LiDAR, pour un coût moins élevé et sans utilisation de terres rares.

Pour finir, les acteurs concernés doivent penser à une transition efficace du marché de l'emploi entre les métiers en voie de disparition et ceux en voie de création.

C'est pour ces raisons que nous espérons, grâce à cette étude, sensibiliser un large public pour qu'un maximum de personnes prennent conscience de tous les défis qu'engendre la conduite autonome.

D'une part, nous désirons atteindre les potentiels futurs utilisateurs pour qu'ils réalisent la face cachée de cette voiture.

D'autre part, nous souhaitons aussi que les industriels et les développeurs considèrent les points que nous avons mis en lumière et approfondissent nos recherches. En effet, il serait intéressant de faire une analyse similaire en considérant un autre type de motorisation (hybride, CNG, hydrogène...). Il serait aussi judicieux d'établir le cycle de vie de la VA, en intégrant les systèmes de communication et les différents capteurs. Une étude plus approfondie du choix et du recyclage des matériaux pour chaque partie de la voiture permettrait d'avoir une meilleure estimation de leur impact environnemental et de leur coût. Enfin, une analyse des risques cybernétiques et du cryptage des données est essentielle pour la sécurité des passagers.

Nous terminerons par mettre en valeur l'importance de la méthode *de couches* de Michael F. Ashby, car elle permet d'analyser la durabilité de manière simplifiée et progressive. Nous avons vu que des outils existent pour aider à construire cette analyse, tels que le programme *SimaPro* pour établir le LCA d'un produit ou encore la base de données de *GRANTA Design* pour le choix des matériaux en mécanique. Nous encourageons le corps académique dans les domaines techniques et scientifiques à initier les étudiants et les chercheurs à cette méthode, et à promouvoir l'étude de durabilité pendant la phase de recherche pour la conception d'un produit.

Nous sommes convaincus que c'est en développant l'esprit critique des futurs acteurs et créateurs du monde de demain que nous arriverons à répondre aux enjeux d'une transition énergétique durable.

Bibliographie

- [1] Michael F. ASHBY. *Materials and Sustainable Development*. Elsevier Science, 28 jan. 2015. 328 p. ISBN : 978-0-08-100176-9.
- [2] Binod VAIDYA et Hussein T. MOUFTAH. « Connected Autonomous Electric Vehicles as Enablers for Low-Carbon Future ». In : *Energy Efficiency in Smart Grids* (20 mar. 2019). DOI : 10.5772/intechopen.84287. URL : <https://www.intechopen.com/online-first/connected-autonomous-electric-vehicles-as-enablers-for-low-carbon-future> (visité le 10/06/2019).
- [3] IHS MARKIT. *Autonomous vehicle sales forecast to reach 21 mil. globally in 2035, according to IHS Automotive*. 7 juin 2016. URL : <https://ihsmarkit.com/country-industry-forecasting.html?ID=10659115737> (visité le 10/06/2019).
- [4] *ERTRAC - Connected Automated Driving Roadmap*. Connected Automated Driving Europe. URL : <https://connectedautomateddriving.eu/publication/ertrac-connected-automated-driving-roadmap/> (visité le 10/06/2019).
- [5] Apoorv GARG. *Stakeholder Analysis of Autonomous (self-driving) Vehicles*. 23 jan. 2017. URL : <https://www.linkedin.com/pulse/stakeholder-analysis-autonomous-self-driving-vehicles-apoorv-garg/> (visité le 10/06/2019).
- [6] Scott CORWIN et Derek M. PANKRATZ. *Future of mobility overview | Deloitte Insights*. URL : <https://www2.deloitte.com/insights/us/en/focus/future-of-mobility/overview.html> (visité le 10/06/2019).
- [7] Deloitte CANADA. *Implications of Connected and Autonomous Vehicles in Ontario*. URL : <https://www2.deloitte.com/ca/en/pages/consulting/articles/connectedvehiculesontario.html> (visité le 10/06/2019).
- [8] Stanislas DE BRUYNE et Julien HENDRIX. *Analyses de cycle de vie de différentes motorisations de véhicules particuliers*. 2018.
- [9] Jungwoo SHIN, Won-Sik HWANG et Hyundo CHOI. « Can hydrogen fuel vehicles be a sustainable alternative on vehicle market? : Comparison of electric and hydrogen fuel cell vehicles ». In : *Technological Forecasting and Social Change* 143 (1^{er} juin 2019), p. 239–248. ISSN : 0040-1625. DOI : 10.1016/j.techfore.2019.02.001. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162518307510> (visité le 10/06/2019).
- [10] Miranda A. SCHREURS et Sibyl D. STEUWER. « Autonomous Driving—Political, Legal, Social, and Sustainability Dimensions ». In : *Autonomous Driving : Technical, Legal and Social Aspects*. Sous la dir. de Markus MAURER et al. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2016, p. 149–171. ISBN : 978-3-662-48847-8. DOI : 10.1007/978-3-662-48847-8_8. URL : https://doi.org/10.1007/978-3-662-48847-8_8 (visité le 10/06/2019).
- [11] Alex KEMP. *Autonomous Cars Will Change Global Supply Chains*. QAD Blog. 1^{er} nov. 2016. URL : <https://blog.qad.com/2016/11/autonomous-cars-change-supply-chains/> (visité le 10/06/2019).
- [12] Bernard DEBOYSER. *Véhicules électriques et terres rares : un florilège de fake news*. Automobile Propre. 14 fév. 2018. URL : <https://www.automobile-propre.com/vehicules-electriques-terres-rares-florilege-fake-news/> (visité le 10/06/2019).

- [13] L'Usine NOUVELLE. « Renault teste le reconditionnement domestique des batteries de ses véhicules électriques - L'Usine Auto ». In : (6 juin 2017). URL : <https://www.usinenouvelle.com/article/renault-teste-le-reconditionnement-domestique-des-batteries-de-ses-vehicules-electriques.N549238> (visité le 10/06/2019).
- [14] Lisbeth DAHLÖF, Mia ROMARE et Mats-Ola LARSSON. *New report highlights climate footprint of electric car battery production - IVL Svenska Miljöinstitutet*. 21 juin 2017. URL : <https://www.ivl.se/english/startpage/top-menu/pressroom/press-releases/press-releases---arkiv/2017-06-21-new-report-highlights-climate-footprint-of-electric-car-battery-production.html> (visité le 10/06/2019).
- [15] Mikhail CHESTER, Arpad HORVATH et Samer MADANAT. « Parking infrastructure : energy, emissions, and automobile life-cycle environmental accounting ». In : *Environmental Research Letters* 5.3 (juil. 2010), p. 034001. ISSN : 1748-9326. DOI : 10.1088/1748-9326/5/3/034001. URL : <https://doi.org/10.1088/1748-9326/5/3/034001> (visité le 10/06/2019).
- [16] Hubert IGLIŃSKI et Maciej BABIAK. « Analysis of the Potential of Autonomous Vehicles in Reducing the Emissions of Greenhouse Gases in Road Transport ». In : *Procedia Engineering*. 12th international scientific conference of young scientists on sustainable, modern and safe transport 192 (1^{er} jan. 2017), p. 353-358. ISSN : 1877-7058. DOI : 10.1016/j.proeng.2017.06.061. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817326073> (visité le 10/06/2019).
- [17] Todd LITMAN. « Autonomous Vehicle Implementation Predictions : Implications for Transport Planning ». In : Transportation Research Board 94th Annual Meeting Transportation Research Board. 2015. URL : <https://trid.trb.org/view.aspx?id=1338043> (visité le 10/06/2019).
- [18] SILICON VALLEY DEEP LEARNING GROUP. *Perception for Autonomous Driving Forrest landola*. URL : <https://www.youtube.com/watch?v=C8mjyPBrGBA> (visité le 10/06/2019).
- [19] SAMY AATTACHE. *Comment le car sharing peut modifier radicalement l'industrie automobile*. Belgium. 28 nov. 2018. URL : <https://www.aldautomotive.be/about-us/blog/ArticleID/3201/Comment-le-car-sharing-peut-modifier-radicalement-l%E2%80%99industrie-automobile> (visité le 10/06/2019).
- [20] Roman ZAKHARENKO. « Self-driving cars will change cities ». In : *Regional Science and Urban Economics* 61 (1^{er} nov. 2016), p. 26-37. ISSN : 0166-0462. DOI : 10.1016/j.regsciurbeco.2016.09.003. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016604621630182X> (visité le 10/06/2019).
- [21] A. AL-DULAIMI et X. LIN. « Vehicular Networking : Protecting Vehicles from Imminent Cyber Threats ». In : *IEEE Communications Standards Magazine* 2.4 (déc. 2018), p. 72-72. ISSN : 2471-2825. DOI : 10.1109/MCOMSTD.2018.8636839.
- [22] Ron KRAL. *Governing Cybersecurity : Cybersecurity Committees on the Rise*. Corporate Compliance Insights. 11 juin 2018. URL : <https://www.corporatecomplianceinsights.com/governing-cybersecurity-cybersecurity-committees-rise/> (visité le 10/06/2019).
- [23] Arthur PIED. *Voiture autonome : en 2018, les Français restent sceptiques*. Assurland.com. 21 mar. 2018. URL : https://www.assurland.com/assurance-blog/assurance-auto-actualite/les-francais-se-montrent-sceptiques-au-sujet-de-la-voiture-autonome_130864.html (visité le 10/06/2019).
- [24] Steve LOHR. « A Lesson of Tesla Crashes? Computer Vision Can't Do It All Yet ». In : *The New York Times* (20 jan. 2018). ISSN : 0362-4331. URL : <https://www.nytimes.com/2016/09/20/science/computer-vision-tesla-driverless-cars.html> (visité le 10/06/2019).
- [25] Aon Risk SOLUTIONS. *Quand la voiture devient autonome*. Avr. 2015. URL : <https://www.aon.com/belgium/fr/voiture-autonome/docs/whitepaper.pdf> (visité le 10/06/2019).
- [26] Philippe COLLE. « L'assurance fin prête pour l'arrivée des voitures autonomes ». In : *L'Echo* (31 oct. 2018). URL : <https://www.lecho.be/opinions/carte-blanche/1-assurance-fin-prete-pour-l-arrivee-des-voitures-autonomes/10064633.html> (visité le 10/06/2019).

- [27] Viktoras Kabir VEITAS et Simon DELAERE. « In-vehicle data recording, storage and access management in autonomous vehicles ». In : *arXiv :1806.03243 [cs]* (28 mai 2018). arXiv : 1806.03243. URL : <http://arxiv.org/abs/1806.03243> (visité le 10/06/2019).
- [28] European COMMISSION. *Black boxes/ in-vehicle data recorders*. Mobility and transport - European Commission. 17 oct. 2016. URL : https://ec.europa.eu/transport/road_safety/specialist/knowledge/esave/esafety_measures_known_safety_effects/black_boxes_in_vehicle_data_recorders_en (visité le 10/06/2019).
- [29] R. HUSSAIN, J. LEE et S. ZEADALLY. « Autonomous Cars : Social and Economic Implications ». In : *IT Professional* 20.6 (nov. 2018), p. 70–77. ISSN : 1520-9202. DOI : 10.1109/MITP.2018.2876922.
- [30] L'abécédaire de INSTITUTIONS. *Le coût de l'insécurité routière représente 2,2% du PIB*. L'Abécédaire des Institutions. 18 août 2017. URL : <https://www.labecedaire.fr/2017/08/18/cout-de-linsecurite-routiere-represente-22-pib/> (visité le 10/06/2019).
- [31] Philippe ANTOINE. « Les embouteillages nous coûtent plus de 4 milliards : des pistes de solution connues ». In : *RTBF Info* (5 nov. 2018). URL : https://www.rtbf.be/info/economie/detail_les-embouteillages-nous-coutent-plus-de-4-milliards-des-pistes-de-solution-connues?id=10056521 (visité le 10/06/2019).
- [32] MORGAN STANLEY. *Self-Driving the New Auto Industry Paradigm*. Nov. 2013. URL : <https://orfe.princeton.edu/~alaink/SmartDrivingCars/PDFs/Nov2013MORGAN-STANLEY-BLUE-PAPER-AUTONOMOUS-CARS%ef%bc%9a-SELF-DRIVING-THE-NEW-AUTO-INDUSTRY-PARADIGM.pdf> (visité le 10/06/2019).
- [33] Ana T. MORENO et al. *Shared Autonomous Vehicles Effect on Vehicle-Km Traveled and Average Trip Duration*. Journal of Advanced Transportation. 2018. URL : <https://www.hindawi.com/journals/jat/2018/8969353/> (visité le 10/06/2019).
- [34] David LESNE et al. *Q-Series - How disruptive will a mass adoption of robotaxis be ?* UBS. URL : <https://neo.ubs.com/shared/dlgAiLhfW3FA/> (visité le 10/06/2019).
- [35] LU MIAOJIA et al. « Multiagent Spatial Simulation of Autonomous Taxis for Urban Commute : Travel Economics and Environmental Impacts ». In : *Journal of Urban Planning and Development* 144.4 (1^{er} déc. 2018), p. 04018033. DOI : 10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000469. URL : <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29UP.1943-5444.0000469> (visité le 10/06/2019).
- [36] Patrick M. BÖSCH et al. « Cost-based analysis of autonomous mobility services ». In : *Transport Policy* 64 (1^{er} mai 2018), p. 76–91. ISSN : 0967-070X. DOI : 10.1016/j.tranpol.2017.09.005. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967070X17300811> (visité le 10/06/2019).
- [37] Aditya JAIN. *Cost of a Self-Driving Car's Components Automotive Electronics*. Automotive Electronics. 15 nov. 2018. URL : <https://www.automotiveelectronics.com/cost-of-components-of-a-self-driving-car/> (visité le 10/06/2019).
- [38] Chander DHAWAN. *Autonomous Vehicles Plus : A Critical Analysis of Challenges Delaying AV Nirvana*. FriesenPress, 19 fév. 2019. 268 p. ISBN : 978-1-5255-3983-1.
- [39] James H. GAWRON et al. « Life Cycle Assessment of Connected and Automated Vehicles : Sensing and Computing Subsystem and Vehicle Level Effects ». In : *Environmental Science & Technology* 52.5 (6 mar. 2018), p. 3249–3256. ISSN : 0013-936X. DOI : 10.1021/acs.est.7b04576. URL : <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04576> (visité le 10/06/2019).
- [40] Daniel J. FAGNANT, Kara M. KOCKELMAN et Prateek BANSAL. *Operations of a Shared Autonomous Vehicle Fleet for the Austin, Texas Market*.
- [41] Rich MILLER. *Autonomous Cars Could Drive a Deluge of Data Center Demand*. Data Center Frontier. 24 mai 2017. URL : <https://datacenterfrontier.com/autonomous-cars-could-drive-a-deluge-of-data-center-demand/> (visité le 10/06/2019).

- [42] T. E. CONNECTIVITY. *6 Key Connectivity Requirements of Autonomous Driving*. IEEE Spectrum : Technology, Engineering, and Science News. 10 avr. 2018. URL : <https://spectrum.ieee.org/transportation/advanced-cars/6-key-connectivity-requirements-of-autonomous-driving> (visité le 10/06/2019).
- [43] Edward M. ROCHE, Benjamin H. DICKENS-JR. et Walker TOWNES. « La prochaine génération de téléphonie mobile (5G) et ses implications (Infrastructure, Réglementation) ». In : *Netcom. Réseaux, communication et territoires* 32 (16 déc. 2018), p. 139–162. ISSN : 0987-6014. DOI : 10.4000/netcom.2869. URL : <http://journals.openedition.org/netcom/2869> (visité le 10/06/2019).
- [44] ITU-R. *IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond*. URL : https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-I!!PDF-E.pdf (visité le 10/06/2019).
- [45] HUAWEI. *5G Spectrum Public Policy Position*. URL : http://www-file.huawei.com/-/media/CORPORATE/PDF/public-policy/public_policy_position_5g_spectrum.pdf (visité le 10/06/2019).
- [46] ITU-R. *Calculation of free-space attenuation*. URL : https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.525-3-201611-I!!PDF-E.pdf (visité le 10/06/2019).
- [47] Nagaraj PAVITHRA. *Impact of atmospheric impairments on mmWave based outdoor communication*. URL : <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1806/1806.05176.pdf> (visité le 10/06/2019).
- [48] ITU-R. *Specific attenuation model for rain for use in prediction methods*. URL : https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.838-3-200503-I!!PDF-E.pdf (visité le 10/06/2019).
- [49] ITU-R. *Attenuation due to clouds and fog*. URL : https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.840-7-201712-I!!PDF-E.pdf (visité le 10/06/2019).
- [50] ITU-R. *Affaiblissement dû aux gaz de l’atmosphère*. URL : https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-11-201609-I!!PDF-F.pdf (visité le 10/06/2019).
- [51] Amy NORDRUM et Kristen CLARK. *Everything You Need to Know About 5G*. IEEE Spectrum : Technology, Engineering, and Science News. 27 jan. 2017. URL : <https://spectrum.ieee.org/video/telecom/wireless/everything-you-need-to-know-about-5g> (visité le 10/06/2019).
- [52] RAJIV. *What are small cells in 5G technology*. RF Page. 5 sept. 2018. URL : <https://www.rfpage.com/what-are-small-cells-in-5g-technology/> (visité le 10/06/2019).
- [53] H. SONG, X. FANG et L. YAN. « Handover Scheme for 5G C/U Plane Split Heterogeneous Network in High-Speed Railway ». In : *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 63.9 (nov. 2014), p. 4633–4646. ISSN : 0018-9545. DOI : 10.1109/TVT.2014.2315231.
- [54] Binqi YANG et al. « Compact Tapered Slot Antenna Array for 5G Millimeter-Wave Massive MIMO Systems ». In : *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 65 (2017), p. 6721–6727. DOI : 10.1109/TAP.2017.2700891.
- [55] Michael WANG. *The Role of Massive MIMO in 5G*. Michael Wang. 23 oct. 2018. URL : <https://medium.com/@miccowang/the-role-of-massive-mimo-in-5g-c362e790ef61> (visité le 10/06/2019).
- [56] BIPT - *Study of 12 September 2018 on the impact of the radiation standards in Brussels on the deployment of mobile networks*. URL : <https://www.bipt.be/en/operators/radio/antennas-site-sharing/study-of-12-september-2018-on-the-impact-of-the-radiation-standards-in-brussels-on-the-deployment-of-mobile-networks> (visité le 10/06/2019).
- [57] E. DAHLMAN et S. PARKVALL. « NR - The New 5G Radio-Access Technology ». In : *2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. 2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Juin 2018, p. 1–6. DOI : 10.1109/VTCSpring.2018.8417851.

- [58] Florent ALTCHÉ, Arnaud DE LA FORTELLE et Philip POLACK. *Comment les véhicules autonomes doivent-ils communiquer ?* Montrouge, France, jan. 2017. URL : <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-01691909/document> (visité le 10/06/2019).
- [59] Sushmita KALASHIKAR. *The Radical Transformation from Centralized to Distributed Network Systems*. Medium. 11 août 2017. URL : <https://medium.com/@sushmita.kalashikar/the-radical-transformation-from-centralized-to-distributed-network-systems-93d3a3c008d6> (visité le 10/06/2019).
- [60] P. DE LOOR. *Systèmes Distribués : Techniques et Algorithmes de mise en œuvre des systèmes répartis*. Ecole Nationale d'Ingénieurs de Brest. URL : <https://www.enib.fr/> (visité le 10/06/2019).
- [61] Pete BIGELOW. « A new connected-car battle : Cellular vs. DSRC ». In : *Automotive News* (3 fév. 2019). URL : <https://www.autonews.com/mobility-report/new-connected-car-battle-cellular-vs-dsrc> (visité le 10/06/2019).
- [62] David ELLIOTT, Walter KEEN et Lei MIAO. « Recent advances in connected and automated vehicles ». In : *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* 6.2 (1^{er} avr. 2019), p. 109–131. ISSN : 2095-7564. DOI : 10.1016/j.jtte.2018.09.005. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095756418302289> (visité le 10/06/2019).
- [63] Kakan Chandra DEY et al. « Vehicle-to-vehicle (V2V) and vehicle-to-infrastructure (V2I) communication in a heterogeneous wireless network – Performance evaluation ». In : *Transportation Research Part C : Emerging Technologies* 68 (1^{er} juil. 2016), p. 168–184. ISSN : 0968-090X. DOI : 10.1016/j.trc.2016.03.008. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X16300018> (visité le 10/06/2019).
- [64] Nick ISMAIL. *What you need to know about vehicle-to-vehicle communication*. Information Age. 13 avr. 2017. URL : <https://www.information-age.com/need-know-vehicle-vehicle-communication-123465752/> (visité le 10/06/2019).
- [65] NATIONAL INSTRUMENTS et ALTRAN ITALIA. *Altran et NI démontrent la faisabilité du test HIL de systèmes ADAS avec fusion de capteurs - National Instruments*. Mar. 2019. URL : <http://www.ni.com/fr-be/innovations/white-papers/17/altran-and-ni-demonstrate-ad-as-hil-with-sensor-fusion.html> (visité le 10/06/2019).
- [66] BRIAN SHAFFER. *Why are automotive radar systems moving from 24GHz to 77GHz ? - Behind the Wheel - Blogs - TI E2E Community*. Texas Instruments. URL : https://e2e.ti.com/blogs_/b/behind_the_wheel/archive/2017/10/25/why-are-automotive-radar-systems-moving-from-24ghz-to-77ghz# (visité le 10/06/2019).
- [67] BARRY MANZ. *A Radar in Every Bumper/ Mouser*. Mouser Electronics. URL : <https://eu.mouser.com/applications/radar-every-bumper-autonomous/> (visité le 10/06/2019).
- [68] NICK MOKEY. *Solid-State Lidar : The Key to Cheap Self-Driving Cars*. Digital Trends. 15 mar. 2018. URL : <https://www.digitaltrends.com/cars/solid-state-lidar-for-self-driving-cars/> (visité le 10/06/2019).
- [69] Oliver CAMERON. *An Introduction to LIDAR : The Key Self-Driving Car Sensor*. Voyage. 9 mai 2017. URL : <https://news.voyage.auto/an-introduction-to-lidar-the-key-self-driving-car-sensor-a7e405590cff> (visité le 10/06/2019).
- [70] Maik BEER et al. « Background Light Rejection in SPAD-Based LiDAR Sensors by Adaptive Photon Coincidence Detection ». In : *Sensors (Basel, Switzerland)* 18.12 (8 déc. 2018). ISSN : 1424-8220. DOI : 10.3390/s18124338. URL : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6308528/> (visité le 10/06/2019).
- [71] H. AKITA et al. « An imager using 2-D single-photon avalanche diode array in 0.18- μ m CMOS for automotive LIDAR application ». In : *2017 Symposium on VLSI Circuits*. 2017 Symposium on VLSI Circuits. Juin 2017, p. C290–C291. DOI : 10.23919/VLSIC.2017.8008512.
- [72] Gert RUDOLPH et Uwe VOELZKE. *Three Sensor Types Drive Autonomous Vehicles*. Sensors Magazine. 10 nov. 2017. URL : <https://www.sensormag.com/components/three-sensor-types-drive-autonomous-vehicles> (visité le 10/06/2019).

- [73] Evan ACKERMAN. *Velodyne Says It's Got a "Breakthrough" in Solid State Lidar Design*. IEEE Spectrum : Technology, Engineering, and Science News. 13 déc. 2016. URL : <https://spectrum.ieee.org/cars-that-think/transportation/sensors/velodyne-announces-breakthrough-in-solid-state-lidar-design> (visité le 10/06/2019).
- [74] Bill MARSHALL. *Lidar, Radar & Digital Cameras : the Eyes of Autonomous Vehicles*. 21 fév. 2018. URL : <https://www.rs-online.com/designspark/lidar-radar-digital-cameras-the-eyes-of-autonomous-vehicles> (visité le 10/06/2019).
- [75] T. E. CONNECTIVITY. *The Car in the Age of Connectivity : Enabling Car to Cloud Connectivity*. IEEE Spectrum : Technology, Engineering, and Science News. 17 sept. 2018. URL : <https://spectrum.ieee.org/telecom/wireless/the-car-in-the-age-of-connectivity-enabling-car-to-cloud-connectivity> (visité le 10/06/2019).
- [76] Meng LU, Kees WEVERS et Rob Van Der HEIJDEN. « Technical Feasibility of Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) for Road Traffic Safety ». In : *Transportation Planning and Technology* 28.3 (1^{er} juin 2005), p. 167–187. ISSN : 0308-1060. DOI : 10.1080/03081060500120282. URL : <https://doi.org/10.1080/03081060500120282> (visité le 10/06/2019).
- [77] ANN NEAL. *LiDAR vs. RADAR*. Sensors Magazine. URL : <https://www.sensormag.com/components/lidar-vs-radar> (visité le 10/06/2019).
- [78] M. KUTILA et al. « Automotive LIDAR sensor development scenarios for harsh weather conditions ». In : *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Nov. 2016, p. 265–270. DOI : 10.1109/ITSC.2016.7795565.
- [79] Mohammadhossein DARAEIHAJITOUEI. « Tightly-Coupled LiDAR and Camera for Autonomous Vehicles ». Thèse de doct. UC Santa Cruz, 2018. URL : <https://escholarship.org/uc/item/8p2873x4> (visité le 10/06/2019).
- [80] S. S. M. RADZI et al. « Extraction of Moving Objects Using Frame Differencing, Ghost and Shadow Removal ». In : *Modelling and Simulation 2014 5th International Conference on Intelligent Systems*. Modelling and Simulation 2014 5th International Conference on Intelligent Systems. Jan. 2014, p. 229–234. DOI : 10.1109/ISMS.2014.154.
- [81] Wu-Chih HU et al. « Moving object detection and tracking from video captured by moving camera ». In : *Journal of Visual Communication and Image Representation* 30 (1^{er} juil. 2015), p. 164–180. ISSN : 1047-3203. DOI : 10.1016/j.jvcir.2015.03.003. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S104732031500053X> (visité le 10/06/2019).
- [82] FELIX. *Sensor Set Design Patterns for Autonomous Vehicles – open autonomous driving*. URL : <https://autonomous-driving.org/2019/01/25/positioning-sensors-for-autonomous-vehicles/> (visité le 10/06/2019).
- [83] A. IQBAL et al. « Design of multifunctional autonomous car using ultrasonic and infrared sensors ». In : *2017 International Symposium on Wireless Systems and Networks (ISWSN)*. 2017 International Symposium on Wireless Systems and Networks (ISWSN). Nov. 2017, p. 1–5. DOI : 10.1109/ISWSN.2017.8250023.
- [84] PAUL PICKERING. *Radar and Ultrasonic Sensors Strengthen ADAS Object Detection*. Electronic Design. 22 août 2017. URL : <https://www.electronicdesign.com/automotive/radar-and-ultrasonic-sensors-strengthen-adas-object-detection> (visité le 10/06/2019).
- [85] MICHAEL BARNARD. *Tesla & Google Disagree About LIDAR – Which Is Right ?* CleanTechnica. 29 juil. 2016. URL : <https://cleantechnica.com/2016/07/29/tesla-google-disagree-lidar-right/> (visité le 10/06/2019).
- [86] BRIAN KRZANICH. *Data is the New Oil in the Future of Automated Driving | Intel Newsroom*. Nov. 2016. URL : <https://newsroom.intel.com/editorials/krzanich-the-future-of-automated-driving/#gs.2ozj7a> (visité le 10/06/2019).

-
- [87] TRACIE KAMBIES, PAUL ROMA, NITIN MITTAL, SANDEEP KUMAR SHARMA. *Analyzing dark data for hidden opportunities* / Deloitte Insights. URL : <https://www2.deloitte.com/insights/us/en/focus/tech-trends/2017/dark-data-analyzing-unstructured-data.html> (visité le 10/06/2019).
 - [88] Quartz marketing TEAM. *Connected cars will send 25 gigabytes of data to the cloud every hour*. Quartz. URL : <https://qz.com/344466/connected-cars-will-send-25-gigabytes-of-data-to-the-cloud-every-hour/> (visité le 10/06/2019).
 - [89] KAREN RICCIO. *Ford Plans \$200M Data Center in Anticipation of Connected Car Data Explosion*. Data Center Knowledge. 29 mar. 2017. URL : <https://www.datacenterknowledge.com/archives/2017/03/29/ford-plans-200m-data-center-in-anticipation-of-connected-car-data-explosion> (visité le 10/06/2019).
 - [90] THOMAS PONTIROLI. « La voiture ouvre un nouvel espace-temps publicitaire ». In : *Stratégies* (14 fév. 2018). URL : <http://www.strategies.fr/actualites/marques/4007124W/la-voiture-ouvre-un-nouvel-espace-temps-publicitaire.html> (visité le 10/06/2019).
 - [91] Transport TOPICS. *Autonomous Vehicles to Run on Data*. Transport Topics. 9 fév. 2017. URL : <https://www.ttnews.com/articles/autonomous-vehicles-run-data> (visité le 10/06/2019).
 - [92] CORPORATE COMMUNICATIONS : et DIANE VANASSE. *Aquantia Introduces Multi-Gig Ethernet Products to Enable Autonomous Driving*. Aquantia Corp. 29 jan. 2018. URL : <https://www.aquantia.com/2018/01/29/aquantia-introduces-multi-gig-ethernet-products-to-enable-autonomous-driving/> (visité le 10/06/2019).
 - [93] ARTHUR FIRSTENBERG. *Appel international demandant l'arrêt du déploiement de la 5G sur Terre et dans l'espace*. Déc. 2018. URL : http://www.grappebelgique.be/IMG/pdf/Appel_international_demandant_l_arret_du_deploiement_de_la_5G_sur_Terre_et_dans_l_espace.pdf (visité le 10/06/2019).
 - [94] Environmental Health TRUST. « Bees, Butterflies and Wildlife : Research on Electromagnetic Fields and the Environment ». In : *Environmental Health Trust*. URL : <https://ehtrust.org/science/bees-butterflies-wildlife-research-electromagnetic-fields-environment/> (visité le 10/06/2019).
 - [95] Environmental Health TRUST. « Published Research on the Adverse Effect of Wireless Technology and Electromagnetic Radiation on Bees ». In : *Environmental Health Trust*. 8 oct. 2017. URL : <https://ehtrust.org/published-research-adverse-effect-wireless-technology-electromagnetic-radiation-bees/> (visité le 10/06/2019).
 - [96] Environmental Health TRUST. « Electromagnetic Fields Impact Tree and Plant Growth ». In : *Environmental Health Trust*. 17 fév. 2018. URL : <https://ehtrust.org/electromagnetic-fields-impact-tree-plant-growth/> (visité le 10/06/2019).
 - [97] Deep N. YADAV et al. « Microwave technology for disinfestation of cereals and pulses : An overview ». In : *Journal of Food Science and Technology* 51.12 (déc. 2014), p. 3568–3576. ISSN : 0022-1155. DOI : 10.1007/s13197-012-0912-8. URL : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4252428/> (visité le 10/06/2019).
 - [98] A. A. MISHENKO et al. « Complex high-frequency technology for protection of grain against pests ». In : *The Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy : A Publication of the International Microwave Power Institute* 35.3 (2000), p. 179–184. ISSN : 0832-7823.
 - [99] Arno THIELENS et al. « Exposure of Insects to Radio-Frequency Electromagnetic Fields from 2 to 120 GHz ». In : *Scientific Reports* 8.1 (2 mar. 2018), p. 3924. ISSN : 2045-2322. DOI : 10.1038/s41598-018-22271-3. URL : <https://www.nature.com/articles/s41598-018-22271-3> (visité le 10/06/2019).
 - [100] Anne PERRIN et Martine SOUQUES. *Champs électromagnétiques, environnement et santé*. Springer Science & Business Media, 2 fév. 2011. 176 p. ISBN : 978-2-8178-0133-9.

- [101] Hirata AKIMASA. « EMF Exposure limits above 6 Ghz ». BioEM2018, 2018. URL : http://emfhealth.info/docs/eng/3_MWF%205G_ExposureLimitsAbove6GHz_Hirata.pdf (visité le 10/06/2019).
- [102] Cindy RUSSEL. « A 5G wireless future ». In : *Issuu* 23.1 (). URL : https://issuu.com/18621/docs/bulletin_0217_web/20 (visité le 10/06/2019).
- [103] A. G. PAKHOMOV et al. « Current state and implications of research on biological effects of millimeter waves : a review of the literature ». In : *Bioelectromagnetics* 19.7 (1998), p. 393–413. ISSN : 0197-8462.
- [104] I. L. POTEKHINA et al. « [The effect of low-intensity millimeter-range electromagnetic radiation on the cardiovascular system of the white rat] ». In : *Fiziologicheskii zhurnal SSSR imeni I. M. Sechenova* 78.1 (jan. 1992), p. 35–41. ISSN : 0015-329X.
- [105] M. PROST et al. « [Experimental studies on the influence of millimeter radiation on light transmission through the lens] ». In : *Klinika Oczna* 96.8 (sept. 1994), p. 257–259. ISSN : 0023-2157.
- [106] Denis HABAUZIT et al. « Transcriptome Analysis Reveals the Contribution of Thermal and the Specific Effects in Cellular Response to Millimeter Wave Exposure ». In : *PLOS ONE* 9.10 (10 oct. 2014), e109435. ISSN : 1932-6203. DOI : 10.1371/journal.pone.0109435. URL : <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0109435> (visité le 10/06/2019).
- [107] SCIENTIFIC COMMITTEE ON HEALTH, ENVIRONMENTAL AND EMERGING RISKS. *Statement on emerging health and environmental issues (2018)*. Déc. 2018. URL : https://ec.europa.eu/health/sites/health/files/scientific_committees/scheer/docs/scheer_s_002.pdf (visité le 10/06/2019).
- [108] ELIZABETH KELLEY. *Appel International*. 2017. URL : https://emfscientist.org/images/docs/transl/French_EMF_Scientist_Appeal_2017.pdf (visité le 10/06/2019).
- [109] Adejoke Olukayode OBAJULUWA et al. « Exposure to radio-frequency electromagnetic waves alters acetylcholinesterase gene expression, exploratory and motor coordination-linked behaviour in male rats ». In : *Toxicology Reports* 4 (1^{er} jan. 2017), p. 530–534. ISSN : 2214-7500. DOI : 10.1016/j.toxrep.2017.09.007. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221475001730063X> (visité le 10/06/2019).
- [110] Nora D. VOLKOW et al. « Effects of Cell Phone Radiofrequency Signal Exposure on Brain Glucose Metabolism ». In : *JAMA : the journal of the American Medical Association* 305.8 (23 fév. 2011), p. 808–813. ISSN : 0098-7484. DOI : 10.1001/jama.2011.186. URL : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3184892/> (visité le 10/06/2019).
- [111] Mahsa EGHLIDOSPOUR et al. « Effects of radiofrequency exposure emitted from a GSM mobile phone on proliferation, differentiation, and apoptosis of neural stem cells ». In : *Anatomy & Cell Biology* 50.2 (juin 2017), p. 115–123. ISSN : 2093-3665. DOI : 10.5115/acb.2017.50.2.115. URL : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5509895/> (visité le 10/06/2019).
- [112] Pravin Suryakantrao DESHMUKH et al. « Cognitive impairment and neurogenotoxic effects in rats exposed to low-intensity microwave radiation ». In : *International Journal of Toxicology* 34.3 (juin 2015), p. 284–290. ISSN : 1092-874X. DOI : 10.1177/1091581815574348.
- [113] ZOTHANSIAMA et al. « Impact of radiofrequency radiation on DNA damage and antioxidants in peripheral blood lymphocytes of humans residing in the vicinity of mobile phone base stations ». In : *Electromagnetic Biology and Medicine* 36.3 (3 juil. 2017), p. 295–305. ISSN : 1536-8378. DOI : 10.1080/15368378.2017.1350584. URL : <https://doi.org/10.1080/15368378.2017.1350584> (visité le 10/06/2019).
- [114] PROF. DR. IR. A.P.M. ZWAMBORN et al. *Effects of Global Communication system radio-frequency fields on Well Being and Cognitive Functions of human subjects with and without subjective complaints*. Sept. 2003. URL : http://milieugezondheid.be/dossiers/gsm/TNO_rapport_Nederland_sept_2003.pdf (visité le 10/06/2019).

- [115] Magda HAVAS. « When theory and observation collide : Can non-ionizing radiation cause cancer ? » In : *Environmental Pollution* 221 (1^{er} fév. 2017), p. 501–505. ISSN : 0269-7491. DOI : 10.1016/j.envpol.2016.10.018. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749116309526> (visité le 10/06/2019).
- [116] Sareesh Naduvil NARAYANAN et al. « Spatial Memory Performance of Wistar Rats Exposed to Mobile Phone ». In : *Clinics (Sao Paulo, Brazil)* 64.3 (mar. 2009), p. 231–234. ISSN : 1807-5932. DOI : 10.1590/S1807-59322009000300014. URL : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2666459/> (visité le 10/06/2019).
- [117] Houston BJ et al. *The effects of radiofrequency electromagnetic radiation on sperm function.* - PubMed - NCBI. URL : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27601711> (visité le 10/06/2019).
- [118] Jingxiu HAN et al. « [Effect of early pregnancy electromagnetic field exposure on embryo growth ceasing] ». In : *Wei Sheng Yan Jiu = Journal of Hygiene Research* 39.3 (mai 2010), p. 349–352. ISSN : 1000-8020.
- [119] Leif G SALFORD et al. « Nerve cell damage in mammalian brain after exposure to microwaves from GSM mobile phones. » In : *Environmental Health Perspectives* 111.7 (juin 2003), p. 881–883. ISSN : 0091-6765. URL : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1241519/> (visité le 10/06/2019).
- [120] Samuel MILHAM. « Evidence that dirty electricity is causing the worldwide epidemics of obesity and diabetes ». In : *Electromagnetic Biology and Medicine* 33.1 (jan. 2014), p. 75–78. ISSN : 1536-8386. DOI : 10.3109/15368378.2013.783853.
- [121] Igor YAKYMENKO et al. « Oxidative mechanisms of biological activity of low-intensity radiofrequency radiation ». In : *Electromagnetic Biology and Medicine* 35.2 (2 avr. 2016), p. 186–202. ISSN : 1536-8378. DOI : 10.3109/15368378.2015.1043557. URL : <https://doi.org/10.3109/15368378.2015.1043557> (visité le 10/06/2019).
- [122] Martha HERBERT et Cindy SAGE. *Findings in Autism (ASD) Consistent with Electromagnetic Fields (EMF) and Radiofrequency Radiation (RFR)*. Harvard Medical School, déc. 2012. URL : https://www.bioinitiative.org/report/wp-content/uploads/pdfs/sec20_2012_Findings_in_Autism.pdf (visité le 10/06/2019).
- [123] HOZEFA A. DIVAN et al. *Prenatal and Postnatal Exposure to Cell Phone Use and Behavioral Problems in Children*. Los Angeles : University of California, mai 2008. URL : http://www.wifiinschools.com/uploads/3/0/4/2/3042232/divan_08_prenatal_postnatal_cell_phone_use.pdf (visité le 10/06/2019).
- [124] De-Kun LI, Hong CHEN et Roxana ODOULI. « Maternal Exposure to Magnetic Fields During Pregnancy in Relation to the Risk of Asthma in Offspring ». In : *Archives of Pediatrics & Adolescent Medicine* 165.10 (3 oct. 2011), p. 945–950. ISSN : 1072-4710. DOI : 10.1001/archpediatrics.2011.135. URL : <https://jamanetwork.com/journals/jamapediatrics/fullarticle/1107612> (visité le 10/06/2019).
- [125] Marie-Claire CAMMAERTS et Olle JOHANSSON. « Ants can be used as bio-indicators to reveal biological effects of electromagnetic waves from some wireless apparatus ». In : *Electromagnetic Biology and Medicine* 33.4 (déc. 2014), p. 282–288. ISSN : 1536-8386. DOI : 10.3109/15368378.2013.817336.
- [126] UNESCO et INTERNATIONAL UNION FOR THE CONSERVATION OF NATURE. *Exodus of species from the Mt. Nardi area of the Nightcap National Park World Heritage Area during a 15-year period (2000-2015.)* 2015. URL : <https://ehtrust.org/wp-content/uploads/Mt-Nardi-Wildlife-Report-to-UNESCO-FINAL.pdf> (visité le 10/06/2019).
- [127] Cornelia WALDMANN-SELSAM et al. « Radiofrequency radiation injures trees around mobile phone base stations ». In : *The Science of the Total Environment* 572 (1^{er} déc. 2016), p. 554–569. ISSN : 1879-1026. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2016.08.045.

- [128] Alfonso BALMORI. « Mobile phone mast effects on common frog (*Rana temporaria*) tadpoles : the city turned into a laboratory ». In : *Electromagnetic Biology and Medicine* 29.1 (juin 2010), p. 31–35. ISSN : 1536-8386. DOI : 10.3109/15368371003685363.
- [129] Neelima R. KUMAR, Sonika SANGWAN et Pooja BADOTRA. « Exposure to cell phone radiations produces biochemical changes in worker honey bees ». In : *Toxicology International* 18.1 (2011), p. 70–72. ISSN : 0971-6580. DOI : 10.4103/0971-6580.75869. URL : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3052591/> (visité le 10/06/2019).
- [130] Alfonso BALMORI. « The incidence of electromagnetic pollution on wild mammals : A new “poison” with a slow effect on nature ? ». In : *The Environmentalist* 30.1 (1^{er} mar. 2010), p. 90–97. ISSN : 1573-2991. DOI : 10.1007/s10669-009-9248-y. URL : <https://doi.org/10.1007/s10669-009-9248-y> (visité le 10/06/2019).
- [131] I. N. MAGRAS et T. D. XENOS. « RF radiation-induced changes in the prenatal development of mice ». In : *Bioelectromagnetics* 18.6 (1997), p. 455–461. ISSN : 0197-8462.
- [132] I. MAGONE. « The effect of electromagnetic radiation from the Skrunda Radio Location Station on *Spirodela polyrhiza* (L.) Schleiden cultures ». In : *Science of The Total Environment*. A Collection of Papers Presented at The International Conference on the Effect of the Radio Frequency Electromagnetic Radiation on Organisms 180.1 (2 fév. 1996), p. 75–80. ISSN : 0048-9697. DOI : 10.1016/0048-9697(95)04922-3. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0048969795049223> (visité le 10/06/2019).
- [133] UBS EVIDENCE LAB. *Electric Car Teardown – Disruption Ahead?* Mai 2017. URL : <https://neo.ubs.com/shared/d1wkuD1EbYPjF/> (visité le 10/06/2019).
- [134] Fereidoon SOISHANSI. *The impact of electric vehicles on electricity demand*. Energy Post. 6 nov. 2018. URL : <https://energypost.eu/the-impact-of-electric-vehicles-on-electricity-demand/> (visité le 10/06/2019).
- [135] The News WHEEL. *Rise of the Underdog : Mazda’s Dedication to ICEs*. The News Wheel. 30 jan. 2019. URL : <https://thenewswheel.com/rise-of-the-underdog-mazdas-dedication-to-ices/> (visité le 10/06/2019).
- [136] Publications Office of the European UNION. *Study on the review of the list of critical raw materials : final report*. 11 sept. 2017. URL : <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/08fdab5f-9766-11e7-b92d-01aa75ed71a1/language-en> (visité le 10/06/2019).
- [137] ADRASTIA. *Disponibilité des matières premières*. Adrastia. 13 août 2014. URL : <http://adrastia.org/disponibilite-matieres-premieres/> (visité le 10/06/2019).
- [138] *Réserves mondiales de cobalt par pays 2018 | Statistique*. Statista. URL : <https://fr.statista.com/statistiques/565285/principaux-pays-du-monde-en-termes-de-reserves-de-cobalt/> (visité le 10/06/2019).
- [139] Ross ROSS, Stanis BUJERKERA et Giulia PARAVINCINI. « Congo declares cobalt ‘strategic’, nearly tripling royalty rate ». In : *Reuters* (3 déc. 2018). URL : <https://www.reuters.com/article/us-congo-cobalt-idUSKBN10220D> (visité le 10/06/2019).
- [140] Serge QUOIDBACH. « Le cobalt, pétrole maudit du 21^e siècle ». In : *L’Echo* (28 avr. 2019). URL : <https://www.lecho.be/entreprises/industries-de-base/le-cobalt-petrole-maudit-du-21e-siecle/10121466.html> (visité le 10/06/2019).
- [141] Jamie SPEIRS et al. « The future of lithium availability for electric vehicle batteries ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 35 (1^{er} juil. 2014), p. 183–193. ISSN : 1364-0321. DOI : 10.1016/j.rser.2014.04.018. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114002457> (visité le 10/06/2019).
- [142] *World graphite reserves top countries 2018 | Statistic*. Statista. URL : <https://www.statista.com/statistics/267367/reserves-of-graphite-by-country/> (visité le 10/06/2019).
- [143] *Graphite – SRG Graphite Inc.* URL : <http://srgraphite.com/graphite/> (visité le 10/06/2019).

- [144] Benjamin LOUVET. *Voiture électrique : quel impact sur la demande de métaux ?* Fév. 2018. URL : <https://www.ofi-am.fr/support/voiture-electrique-quel-impact-sur-la-demande-de-metaux-/5a995d8498029> (visité le 10/06/2019).
- [145] European COMMISSION. *Study on the review of the list of critical raw materials : critical raw materials factsheets*. Website. 13 sept. 2017. URL : <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7345e3e8-98fc-11e7-b92d-01aa75ed71a1/language-en> (visité le 10/06/2019).
- [146] T J BROWN et al. *WORLD MINERAL PRODUCTION 2013-2017*. BRITISH GEOLOGICAL SURVEY. Keyworth, Nottingham. URL : <http://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/worldStatistics.html> (visité le 10/06/2019).
- [147] *Réserves mondiales de nickel par pays 2018 / Statistique*. Statista. URL : <https://fr.statista.com/statistiques/571211/reserves-mondiales-de-nickel--par-pays/> (visité le 10/06/2019).
- [148] Dwight C. BRADLEY et al. *Lithium*. USGS Numbered Series 1802-K. IP-051901. Reston, VA : U.S. Geological Survey, 2017, p. 34. URL : <http://pubs.er.usgs.gov/publication/pp1802K> (visité le 10/06/2019).
- [149] Jessica SKANKLEMAN et al. « We're Going to Need More Lithium ». In : (). URL : <https://www.bloomberg.com/graphics/2017-lithium-battery-future/> (visité le 10/06/2019).
- [150] Datu Buyung AGUSDINATA et al. « Socio-environmental impacts of lithium mineral extraction : towards a research agenda ». In : *Environmental Research Letters* 13.12 (nov. 2018), p. 123001. ISSN : 1748-9326. DOI : 10.1088/1748-9326/aae9b1. URL : <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aae9b1> (visité le 10/06/2019).
- [151] Alexandra WEXLER et Scott PATTERSON. « As Cobalt Prices Rise, Congo Raises Pressure on Western Mining Giants ». In : *Wall Street Journal* (6 fév. 2018). ISSN : 0099-9660. URL : <https://www.wsj.com/articles/as-cobalt-prices-rise-congo-raises-pressure-on-western-mining-giants-1517939714> (visité le 10/06/2019).
- [152] *REE - Rare Earth Elements - Metals, Minerals, Mining, Uses*. URL : <https://geology.com/articles/rare-earth-elements/> (visité le 10/06/2019).
- [153] Artem GOLEV et al. « Rare earths supply chains : Current status, constraints and opportunities ». In : *Resources Policy* 41 (1^{er} sept. 2014), p. 52-59. ISSN : 0301-4207. DOI : 10.1016/j.resourpol.2014.03.004. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301420714000282> (visité le 10/06/2019).
- [154] CES Edupack 2018. *Granta Design Limited, 2018*.
- [155] Paul DE TROCH. *European Battery Alliance*. Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs - European Commission. 8 mai 2018. URL : https://ec.europa.eu/growth/industry/policy/european-battery-alliance_en (visité le 10/06/2019).
- [156] Claudiu C. PAVEL et al. « Role of substitution in mitigating the supply pressure of rare earths in electric road transport applications ». In : *Sustainable Materials and Technologies* 12 (1^{er} juil. 2017), p. 62-72. ISSN : 2214-9937. DOI : 10.1016/j.susmat.2017.01.003. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214993716300641> (visité le 10/06/2019).
- [157] Toby SMITH. « Rare Earthenware : a journey to the toxic source of luxury goods ». In : *The Guardian* (15 avr. 2015). ISSN : 0261-3077. URL : <https://www.theguardian.com/environment/gallery/2015/apr/15/rare-earthenware-a-journey-to-the-toxic-source-of-luxury-goods> (visité le 10/06/2019).
- [158] Lalit KUMAR et Shailendra JAIN. « Electric propulsion system for electric vehicular technology : A review ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29 (1^{er} jan. 2014), p. 924-940. ISSN : 1364-0321. DOI : 10.1016/j.rser.2013.09.014. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113006734> (visité le 10/06/2019).
- [159] Bullard NATHANIEL. « Electric Car Price Tag Shrinks Along With Battery Cost ». In : *Bloomberg Opinion* (12 avr. 2019). URL : <https://www.bloomberg.com/opinion/articles/2019-04-12/electric-vehicle-battery-shrinks-and-so-does-the-total-cost> (visité le 10/06/2019).

- [160] Sergio MANZETTI et Florin MARIASIU. « Electric vehicle battery technologies : From present state to future systems ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51 (1^{er} nov. 2015), p. 1004–1012. ISSN : 1364-0321. DOI : 10.1016/j.rser.2015.07.010. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115006577> (visité le 10/06/2019).
- [161] PROF PETER YK CHEUNG. *Battery Types : Comparison of Key Parameters*. Juin 2018. URL : [http://www.ee.ic.ac.uk/pcheung/teaching/DE1_EE/Lectures/Lecture%2017%20-%20Source%20\(x2\).pdf](http://www.ee.ic.ac.uk/pcheung/teaching/DE1_EE/Lectures/Lecture%2017%20-%20Source%20(x2).pdf) (visité le 10/06/2019).
- [162] M. A. HANNAN et al. « Review of energy storage systems for electric vehicle applications : Issues and challenges ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 69 (1^{er} mar. 2017), p. 771–789. ISSN : 1364-0321. DOI : 10.1016/j.rser.2016.11.171. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116309182> (visité le 10/06/2019).
- [163] *Battery Comparison of Energy Density - Cylindrical and Prismatic Cells*. URL : <https://www.epectec.com/batteries/cell-comparison.html> (visité le 10/06/2019).
- [164] Peter VAN DEN BOSSCHE et al. « SUBAT : An assessment of sustainable battery technology ». In : *Journal of Power Sources*. Special issue including selected papers from the International Power Sources Symposium 2005 together with regular papers 162.2 (22 nov. 2006), p. 913–919. ISSN : 0378-7753. DOI : 10.1016/j.jpowsour.2005.07.039. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775305008761> (visité le 10/06/2019).
- [165] Julien MATHEYS et al. *Comparison of the Environmental impact of 5 Electric Vehicle Battery technologies using LCA*.
- [166] Elsa A. OLIVETTI et al. « Lithium-Ion Battery Supply Chain Considerations : Analysis of Potential Bottlenecks in Critical Metals ». In : *Joule* 1.2 (11 oct. 2017), p. 229–243. ISSN : 2542-4351. DOI : 10.1016/j.joule.2017.08.019. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435117300442> (visité le 10/06/2019).
- [167] Xiaohong ZHENG et al. « A Mini-Review on Metal Recycling from Spent Lithium Ion Batteries ». In : *Engineering* 4.3 (1^{er} juin 2018), p. 361–370. ISSN : 2095-8099. DOI : 10.1016/j.eng.2018.05.018. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809917308226> (visité le 10/06/2019).
- [168] J. ORDOÑEZ, E. J. GAGO et A. GIRARD. « Processes and technologies for the recycling and recovery of spent lithium-ion batteries ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60 (1^{er} juil. 2016), p. 195–205. ISSN : 1364-0321. DOI : 10.1016/j.rser.2015.12.363. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116001623> (visité le 10/06/2019).
- [169] Chunwei LIU et al. « Recycling of spent lithium-ion batteries in view of lithium recovery : A critical review ». In : *Journal of Cleaner Production* 228 (10 août 2019), p. 801–813. ISSN : 0959-6526. DOI : 10.1016/j.jclepro.2019.04.304. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619314015> (visité le 10/06/2019).
- [170] Bin HUANG et al. « Recycling of lithium-ion batteries : Recent advances and perspectives ». In : *Journal of Power Sources* 399 (sept. 2018), p. 274–286. ISSN : 03787753. DOI : 10.1016/j.jpowsour.2018.07.116. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775318308498> (visité le 10/06/2019).
- [171] Pingwei ZHANG et al. « Hydrometallurgical process for recovery of metal values from spent lithium-ion secondary batteries ». In : *Hydrometallurgy* 47.2 (1^{er} jan. 1998), p. 259–271. ISSN : 0304-386X. DOI : 10.1016/S0304-386X(97)00050-9. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304386X97000509> (visité le 10/06/2019).
- [172] Nazanin BAHALOO-HOREH et Seyyed Mohammad MOUSAVI. « Enhanced recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries through optimization of organic acids produced by *Aspergillus niger* ». In : *Waste Management*. Special Thematic Issue : Urban Mining and Circular Economy 60 (1^{er} fév. 2017), p. 666–679. ISSN : 0956-053X. DOI : 10.1016/j.wasman.2016.10.034. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X16306055> (visité le 10/06/2019).

- [173] Anna BOYDEN, Vi Kie SOO et Matthew DOOLAN. « The Environmental Impacts of Recycling Portable Lithium-Ion Batteries ». In : *Procedia CIRP*. The 23rd CIRP Conference on Life Cycle Engineering 48 (1^{er} jan. 2016), p. 188–193. ISSN : 2212-8271. DOI : 10.1016/j.procir.2016.03.100. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827116300701> (visité le 10/06/2019).
- [174] Dominic A. NOTTER et al. « Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles ». In : *Environmental Science & Technology* 44.17 (1^{er} sept. 2010), p. 6550–6556. ISSN : 0013-936X. DOI : 10.1021/es903729a. URL : <https://doi.org/10.1021/es903729a> (visité le 10/06/2019).
- [175] Jia Ying YONG et al. « A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49 (1^{er} sept. 2015), p. 365–385. ISSN : 1364-0321. DOI : 10.1016/j.rser.2015.04.130. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115004001> (visité le 10/06/2019).
- [176] FUTURA. *Des batteries lithium-soufre, une solution pour la voiture électrique ?* Futura. URL : <https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/chimie-batteries-lithium-soufre-solution-voiture-electrique-56762/> (visité le 10/06/2019).
- [177] Arumugam MANTHIRAM, Sheng-Heng CHUNG et Chenxi ZU. « Lithium–Sulfur Batteries : Progress and Prospects ». In : *Advanced Materials* 27.12 (2015), p. 1980–2006. ISSN : 1521-4095. DOI : 10.1002/adma.201405115. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adma.201405115> (visité le 10/06/2019).
- [178] Arumugam MANTHIRAM, Yongzhu FU et Yu-Sheng SU. « Challenges and Prospects of Lithium–Sulfur Batteries ». In : *Accounts of Chemical Research* 46.5 (21 mai 2013), p. 1125–1134. ISSN : 0001-4842. DOI : 10.1021/ar300179v. URL : <https://doi.org/10.1021/ar300179v> (visité le 10/06/2019).
- [179] Haegyeom KIM et al. « Graphene for advanced Li/S and Li/air batteries ». In : *Journal of Materials Chemistry A* 2.1 (27 nov. 2013), p. 33–47. ISSN : 2050-7496. DOI : 10.1039/C3TA12522J. URL : <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2014/ta/c3ta12522j> (visité le 10/06/2019).
- [180] Arumugam MANTHIRAM et al. « Rechargeable Lithium–Sulfur Batteries ». In : *Chemical Reviews* 114.23 (10 déc. 2014), p. 11751–11787. ISSN : 0009-2665. DOI : 10.1021/cr500062v. URL : <https://doi.org/10.1021/cr500062v> (visité le 10/06/2019).
- [181] *Li-S, UAV, Bus, Truck, EV and Marine Batteries*. Oxis Energy. URL : <https://oxisenergy.com/products/> (visité le 10/06/2019).
- [182] Rickard ARVIDSSON et al. « Prospective Life Cycle Assessment of Graphene Production by Ultrasonication and Chemical Reduction ». In : *Environmental Science & Technology* 48.8 (15 avr. 2014), p. 4529–4536. ISSN : 0013-936X. DOI : 10.1021/es405338k. URL : <https://doi.org/10.1021/es405338k> (visité le 10/06/2019).
- [183] Yelin DENG et al. « Life cycle assessment of lithium sulfur battery for electric vehicles ». In : *Journal of Power Sources* 343 (1^{er} mar. 2017), p. 284–295. ISSN : 0378-7753. DOI : 10.1016/j.jpowsour.2017.01.036. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775317300368> (visité le 10/06/2019).
- [184] Jang-Soo LEE et al. « Metal–Air Batteries with High Energy Density : Li–Air versus Zn–Air ». In : *Advanced Energy Materials* 1.1 (2011), p. 34–50. ISSN : 1614-6840. DOI : 10.1002/aenm.201000010. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/aenm.201000010> (visité le 10/06/2019).
- [185] M. XU et al. « Rechargeable Zn-air batteries : Progress in electrolyte development and cell configuration advancement ». In : *Journal of Power Sources* 283 (1^{er} juin 2015), p. 358–371. ISSN : 0378-7753. DOI : 10.1016/j.jpowsour.2015.02.114. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775315003602> (visité le 10/06/2019).

- [186] Hansu KIM et al. « Metallic anodes for next generation secondary batteries ». In : *Chemical Society Reviews* 42.23 (4 nov. 2013), p. 9011–9034. ISSN : 1460-4744. DOI : 10.1039/C3CS60177C. URL : <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2013/cs/c3cs60177c> (visité le 10/06/2019).
- [187] P. TAN et al. « Advances and challenges in lithium-air batteries ». In : *Applied Energy* 204 (15 oct. 2017), p. 780–806. ISSN : 0306-2619. DOI : 10.1016/j.apenergy.2017.07.054. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917309091> (visité le 10/06/2019).
- [188] Mats ZACKRISSON et al. « Life cycle assessment of lithium-air battery cells ». In : *Journal of Cleaner Production* 135 (1^{er} nov. 2016), p. 299–311. ISSN : 0959-6526. DOI : 10.1016/j.jclepro.2016.06.104. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616307818> (visité le 10/06/2019).
- [189] V. VISWANATHAN et al. « Electrical conductivity in Li₂O₂ and its role in determining capacity limitations in non-aqueous Li-O₂ batteries ». In : *The Journal of Chemical Physics* 135.21 (6 déc. 2011), p. 214704. ISSN : 0021-9606. DOI : 10.1063/1.3663385. URL : <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.3663385> (visité le 10/06/2019).
- [190] G. GIRISHKUMAR et al. « Lithium–Air Battery : Promise and Challenges ». In : *The Journal of Physical Chemistry Letters* 1.14 (15 juil. 2010), p. 2193–2203. ISSN : 1948-7185. DOI : 10.1021/jz1005384. URL : <https://doi.org/10.1021/jz1005384> (visité le 10/06/2019).
- [191] Stefano TROCINO et al. « Iron–Air Battery Operating at High Temperature ». In : *Energy Technology* 5.5 (2017), p. 670–680. ISSN : 2194-4296. DOI : 10.1002/ente.201600438. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ente.201600438> (visité le 10/06/2019).
- [192] Fredrik HENRIKSSON. « Introducing New Materials in the Automotive Industry : Managing the Complexity of Introducing New Materials in Existing Production Systems ». In : (2017). URL : <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-142873> (visité le 10/06/2019).
- [193] Huymberto VILLASENOR-OHOA. *Engineering Fundamentals Refresh : Strength vs Stiffness vs Hardness | Fictiv - Hardware Guide*. Fictiv. 15 fév. 2017. URL : <https://www.fictiv.com/hwg/design/engineering-fundamentals-refresh-strength-vs-stiffness-vs-hardness> (visité le 10/06/2019).
- [194] M. -C. THEYSSIER. « 3 - Manufacturing of advanced high-strength steels (AHSS) ». In : *Welding and Joining of Advanced High Strength Steels (AHSS)*. Sous la dir. de Mahadev SHOME et Muralidhar TUMULURU. Woodhead Publishing, 1^{er} jan. 2015, p. 29–53. ISBN : 978-0-85709-436-0. DOI : 10.1016/B978-0-85709-436-0.00003-5. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857094360000035> (visité le 10/06/2019).
- [195] Michael DAVENPORT. « Third-generation advanced high-strength steel emerges ». In : *STAMPING JOURNAL* (5 oct. 2017). URL : <https://www.thefabricator.com/article/stamping/third-generation-advanced-high-strength-steel-emerges> (visité le 10/06/2019).
- [196] Mekonnen Asmare FENTAHUN et Prof Dr Mahmut Ahsen SAVAŞ. « Materials Used in Automotive Manufacture and Material Selection Using Ashby Charts ». In : *International Journal of Materials Engineering* 8.3 (2018), p. 40–54. ISSN : 2166-5400. URL : <http://article.sapub.org/10.5923.j.ijme.20180803.02.html> (visité le 10/06/2019).
- [197] SELECTRICITY. *Harmonic Distortion Analysis*. URL : <http://selectricity.com/> (visité le 10/06/2019).
- [198] S. DEILAMI et al. « Voltage profile and THD distortion of residential network with high penetration of Plug-in Electrical Vehicles ». In : *2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)*. 2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe). Oct. 2010, p. 1–6. DOI : 10.1109/ISGTEUROPE.2010.5638979.
- [199] *IEEE 519-2014 - IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. URL : <https://standards.ieee.org/standard/519-2014.html> (visité le 10/06/2019).

- [200] J. C. GOMEZ et M. M. MORCOS. « Impact of EV battery chargers on the power quality of distribution systems ». In : *IEEE Transactions on Power Delivery* 18.3 (juil. 2003), p. 975–981. ISSN : 0885-8977. DOI : 10.1109/TPWRD.2003.813873.
- [201] A. ALJANAD et Azah MOHAMED. *Harmonic Impact of Plug-In Hybrid Electric Vehicle on Electric Distribution System*. Modelling and Simulation in Engineering, 2016. URL : <https://www.hindawi.com/journals/mse/2016/5968943/> (visité le 10/06/2019).
- [202] Rashid A. WARAICH et al. « Plug-in hybrid electric vehicles and smart grids : Investigations based on a microsimulation ». In : *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*. Euro Transportation : selected paper from the EWGT Meeting, Padova, September 2009 28 (1^{er} mar. 2013), p. 74–86. ISSN : 0968-090X. DOI : 10.1016/j.trc.2012.10.011. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X12001337> (visité le 10/06/2019).
- [203] K. S. REDDY et al. « A review of Integration, Control, Communication and Metering (ICCM) of renewable energy based smart grid ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 38 (1^{er} oct. 2014), p. 180–192. ISSN : 1364-0321. DOI : 10.1016/j.rser.2014.05.049. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114003748> (visité le 10/06/2019).
- [204] Nur IQTIYANIILHAM, M. HASANUZZAMAN et M. HOSENUZZAMAN. « European smart grid prospects, policies, and challenges ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67 (1^{er} jan. 2017), p. 776–790. ISSN : 1364-0321. DOI : 10.1016/j.rser.2016.09.014. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116305020> (visité le 10/06/2019).
- [205] Muhammad HUDA, Muhammad AZIZ et Koji TOKIMATSU. « Potential ancillary services of electric vehicles (vehicle-to-grid) in Indonesia ». In : *Energy Procedia*. Cleaner Energy for Cleaner Cities 152 (1^{er} oct. 2018), p. 1218–1223. ISSN : 1876-6102. DOI : 10.1016/j.egypro.2018.09.172. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610218307161> (visité le 10/06/2019).
- [206] L. RAUCHFUSS, J. FOULQUIER et R. WERNER. « Charging station as an active filter for harmonics compensation of smart grid ». In : *2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*. 2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). Mai 2014, p. 181–184. DOI : 10.1109/ICHQP.2014.6842905.
- [207] T. GHANBARZADEH, S. GOLEJANI et M. P. MOGHADDAM. « Reliability constrained unit commitment with electric vehicle to grid using Hybrid Particle Swarm Optimization and Ant Colony Optimization ». In : *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*. 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Juil. 2011, p. 1–7. DOI : 10.1109/PES.2011.6039696.
- [208] C. SILVESTRE, D. M. SOUSA et A. ROQUE. « Reactive power compensation using on board stored energy in Electric Vehicles ». In : *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Oct. 2012, p. 5227–5232. DOI : 10.1109/IECON.2012.6389545.
- [209] Willett KEMPTON et Jasna TOMIĆ. « Vehicle-to-grid power implementation : From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy ». In : *Journal of Power Sources* 144.1 (1^{er} juin 2005), p. 280–294. ISSN : 0378-7753. DOI : 10.1016/j.jpowsour.2004.12.022. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775305000212> (visité le 10/06/2019).
- [210] Brian TARROJA, Brendan SHAFFER et Scott SAMUELSEN. « The importance of grid integration for achievable greenhouse gas emissions reductions from alternative vehicle technologies ». In : *Energy* 87 (1^{er} juil. 2015), p. 504–519. ISSN : 0360-5442. DOI : 10.1016/j.energy.2015.05.012. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544215005460> (visité le 10/06/2019).
- [211] Donald MACKENZIE, Stephen ZOEPF et John HEYWOOD. « Determinants of US passenger car weight ». In : *International Journal of Vehicle Design* 65.1 (2014), p. 73. ISSN : 0143-3369, 1741-5314. DOI : 10.1504/IJVD.2014.060066. URL : <http://www.inderscience.com/link.php?id=60066> (visité le 10/06/2019).

- [212] MICHAEL ASHBY. *Materials Selection in Mechanical Design*. Butterworth-Heinemann. Elsevier, nov. 2016. ISBN : 978-1-85617-663-7. DOI : 10.1016/C2009-0-25539-5. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0965856415002694> (visité le 10/06/2019).
- [213] Zia WADUD, Don MACKENZIE et Paul LEIBY. « Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles ». In : *Transportation Research Part A : Policy and Practice* 86 (2016), p. 1–18. ISSN : 0965-8564. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.12.001>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856415002694>.
- [214] Ardalan VAHIDI et Antonio SCARRETTA. « Energy saving potentials of connected and automated vehicles ». In : *Transportation Research Part C : Emerging Technologies* 95 (1^{er} oct. 2018), p. 822–843. ISSN : 0968-090X. DOI : 10.1016/j.trc.2018.09.001. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X18305199> (visité le 10/06/2019).
- [215] Jooyong LEE et Kara M. KOCKELMAN. « ENERGY AND EMISSIONS IMPLICATIONS OF SELF-DRIVING 1 VEHICLES 2 ». In : 2018.
- [216] David SCHRANK, Bill EISELE et Tim LOMAX. « 2012 Urban Mobility Report ». In : (déc. 2012). URL : <https://trid.trb.org/view/1243151> (visité le 10/06/2019).
- [217] Morteza TAIEBAT et al. « A Review on Energy, Environmental, and Sustainability Implications of Connected and Automated Vehicles ». In : *Environmental Science & Technology* 52.20 (16 oct. 2018), p. 11449–11465. ISSN : 0013-936X. DOI : 10.1021/acs.est.8b00127. URL : <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00127> (visité le 10/06/2019).
- [218] Asif FAISAL et al. « Understanding autonomous vehicles : A systematic literature review on capability, impact, planning and policy ». In : *Journal of Transport and Land Use* 12.1 (28 jan. 2019). ISSN : 1938-7849. DOI : 10.5198/jtlu.2019.1405. URL : <https://www.jtlu.org/index.php/jtlu/article/view/1405> (visité le 10/06/2019).
- [219] Nianfeng WAN, Ardalan VAHIDI et Andre LUCKOW. « Optimal speed advisory for connected vehicles in arterial roads and the impact on mixed traffic ». In : *Transportation Research Part C : Emerging Technologies* 69 (2016), p. 548–563. ISSN : 0968-090X. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.01.011>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X16000292>.
- [220] Raj Kishore KAMALANATHSHARMA, Hesham A. RAKHA et Hao YANG. « Networkwide Impacts of Vehicle Ecospeed Control in the Vicinity of Traffic Signalized Intersections ». In : *Transportation Research Record* 2503.1 (1^{er} jan. 2015), p. 91–99. ISSN : 0361-1981. DOI : 10.3141/2503-10. URL : <https://doi.org/10.3141/2503-10> (visité le 10/06/2019).
- [221] Q. JIN et al. « Platoon-based multi-agent intersection management for connected vehicle ». In : *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013)*. 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013). Oct. 2013, p. 1462–1467. DOI : 10.1109/ITSC.2013.6728436.
- [222] S. A. FAYAZI et A. VAHIDI. « Vehicle-in-the-loop (VIL) verification of a smart city intersection control scheme for autonomous vehicles ». In : *2017 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)*. 2017 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA). Août 2017, p. 1575–1580. DOI : 10.1109/CCTA.2017.8062681.
- [223] S. TSUGAWA, S. JESCHKE et S. E. SHLADOVER. « A Review of Truck Platooning Projects for Energy Savings ». In : *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles* 1.1 (mar. 2016), p. 68–77. ISSN : 2379-8904. DOI : 10.1109/TIV.2016.2577499.
- [224] Aaron LELOUVIER, Jacopo GUANETTI et Francesco BORRELLI. « Eco-Platooning of Autonomous Electrical Vehicles Using Distributed Model Predictive Control ». In : 2017.
- [225] Stacy C. DAVIS, Susan W. DIEGEL et Robert G. BOUNDY. *Transportation Energy Data Book Edition 31*. Oak Ridge National Laboratory. 2012.

- [226] Benjamin LOEB et Kara M. KOCKELMAN. « Fleet performance and cost evaluation of a shared autonomous electric vehicle (SAEV) fleet : A case study for Austin, Texas ». In : *Transportation Research Part A : Policy and Practice* 121 (C 2019), p. 374–385. URL : <https://ideas.repec.org/a/eee/transa/v121y2019icp374-385.html> (visité le 10/06/2019).
- [227] John THOMAS et al. « Predicting Light-Duty Vehicle Fuel Economy as a Function of Highway Speed ». In : *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems* 6.2 (8 avr. 2013), p. 859–875. DOI : 10.4271/2013-01-1113. URL : <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2013-01-1113/> (visité le 10/06/2019).
- [228] DAVID COSTENARO et ANTHONY DUER. *The Megawatts behind Your Megabytes : Going from Data-Center to Desktop*. 2012. URL : <https://aceee.org/files/proceedings/2012/data/papers/0193-000409.pdf> (visité le 10/06/2019).
- [229] Yin ZHANG, Zhiyuan WEI et Mingshan ZHANG. « Free cooling technologies for data centers : energy saving mechanism and applications ». In : *Energy Procedia*. Leveraging Energy Technologies and Policy Options for Low Carbon Cities 143 (1^{er} déc. 2017), p. 410–415. ISSN : 1876-6102. DOI : 10.1016/j.egypro.2017.12.703. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217364676> (visité le 10/06/2019).
- [230] Nokia OYJ. *5G network energy efficiency - Massive capacity boost with flat energy consumption*. 2016.
- [231] Yuche CHEN et Alan MEIER. « Fuel consumption impacts of auto roof racks ». In : *Energy Policy* 92 (1^{er} mai 2016), p. 325–333. ISSN : 0301-4215. DOI : 10.1016/j.enpol.2016.02.031. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421516300714> (visité le 10/06/2019).
- [232] *2019 Tesla Model 3 Long Range RWD - Specifications*. EVSpecifications. URL : <https://www.evspecifications.com/en/model/3c3b98> (visité le 10/06/2019).
- [233] *Statistiques électricité / FEBEG Fédération Belge des Entreprises Électriques et Gazières*. URL : <https://www.febeg.be/fr/statistiques-electricite> (visité le 10/06/2019).
- [234] E-RSE. *Développement Durable : définition, histoire et enjeux*. La RSE et le développement durable en entreprise : e-RSE.net. URL : <https://e-rse.net/definitions/definition-developpement-durable/> (visité le 10/06/2019).

Liste des figures

1	L'approche par couches de Ashby pour l'analyse de durabilité [1].	2
1.1	Déploiement prévu selon le niveau d'autonomie [4].	4
1.2	Intervenants principaux [7].	6
2.1	Étude des conséquences des VA sur six secteurs [1].	7
2.2	Estimation des économies annuelles aux États-Unis grâce à la VA [32].	11
2.3	Coût (€/km) pour l'utilisateur d'un service de mobilité autonome partagée (robotaxi) [34].	12
2.4	Secteurs d'approfondissement.	15
3.1	Motivation de la 5G pour des applications en temps réel [43].	17
3.2	Domaines d'utilisation de la 5G [45].	18
3.3	Approche de spectre multicouche [45].	19
3.4	Atténuation (dB) en espace libre en fonction de la distance d [47].	20
3.5	Atténuation (dB/km) due à la pluie [47].	21
3.6	Atténuation (dB/km) due au brouillard [47].	21
3.7	Affaiblissement (dB/km) dû aux gaz de l'atmosphère [50].	22
3.8	Bandes de fréquences disponibles pour le déploiement de la 5G [47].	23
3.9	Concept de <i>Phantom Cell</i> [51].	23
3.10	Amélioration des <i>Phantom Cells</i> [51].	24
3.11	Description de la technologie MIMO [54].	25
3.12	Communications centralisées vs distribuées [59].	26
3.13	Capteurs pour la détection de l'environnement [65].	27
3.14	Courbe caractéristique du SPAD [71].	29
3.15	Mesure de la distance par un LiDAR [72].	29
3.16	Détection d'un objet en mouvement par une caméra [81].	31
3.17	Intervalle des fréquences du capteur à ultrasons [84].	31
3.20	Comparaison des quatre principaux capteurs.	33
3.21	Reconstitution par un LiDAR (à gauche) et un RADAR haute précision (à droite) [77].	34
3.22	" <i>Data is the New Oil in the Future of Automated Driving</i> " [86].	34
3.23	Augmentation des échanges de données [42].	35
3.24	Puissance absorbée en fonction de la fréquence par les insectes étudiés pour une intensité de champ incident de 1 V/m [99].	37
3.25	Dépendance de la longueur de pénétration des ondes avec la fréquence [101].	38
4.1	Répartition de la masse (kg) [133].	42
4.2	Évolution de la demande en matériaux pour une flotte constituée entièrement de Bolt [133].	43
4.3	Matières premières critiques définies par la CE (2017) [137].	44
4.4	Répartition de la production mondiale de nickel (prévisions) [144].	45
4.5	Pays producteurs du lithium, graphite et cobalt [154].	46
4.6	Évolution attendue du prix des batteries Li-ion des voitures électriques [159].	48
4.7	La technologie Li-ion possède la plus grande densité d'énergie [163].	50
4.8	Schéma du cycle de vie d'une batterie [164].	50

4.9	Dépendance du coût de la batterie en fonction du prix de ses matériaux de base [149]. . .	52
4.10	Répartition de la masse de la batterie de la Bolt [133].	53
4.11	Gestion de la fin de vie des batteries Li-ion [169].	54
4.12	Chronologie du développement des batteries [175].	55
4.13	Schéma de fonctionnement d'une batterie Li-S [176].	56
4.14	Comparaison des densités énergétiques des batteries traditionnelles et air-métal [184]. . .	57
4.15	Principe de fonctionnement de la cellule Zn-air [184].	58
4.16	Configurations de la batterie Li-air en fonction du type d'électrolyte [184].	59
4.17	Évolution attendue de la composition de la carrosserie des voitures [192].	61
4.18	La ténacité (l'aire sous la courbe) représente l'énergie absorbée [193].	62
4.19	Comparaison de la ténacité des matériaux utilisés en automobile en fonction de leur masse volumique [154].	62
4.20	Graphes <i>GRANTA</i> [154].	63
4.21	Graphes <i>GRANTA</i> [154].	64
4.22	Graphes <i>GRANTA</i> [154].	65
4.23	Utilisation des aciers AHSS de troisième génération pour former les composants structurels de la voiture [195].	66
4.24		67
4.25	Représentation du signal de base et de l'harmonique de rang 3 [197].	69
4.26	Profil de la tension en <i>p.u</i> [201].	70
4.27	Pourcentage des pertes de puissance pour différents taux de pénétration [201].	70
4.28	Technologies V2H, V2V et V2G avec une production décentralisée basée sur les énergies renouvelables [175].	74
4.29	Représentation de la structure portante et de sa coupe transversale.	76
4.30	Représentation des matériaux selon nos deux indices de performance. Ceux qui minimisent la masse tout en respectant nos deux contraintes sont le plus en bas à gauche [154]. . . .	78
4.31	Choix de matériaux en utilisant les deux indices de performance et des limites pour différents paramètres [154].	79
4.32	Données transmises par kWh d'énergie pour la 4G et la 5G [230].	83
5.1	Les trois piliers du développement durable [1].	91

Liste des tableaux

3.1	Caractéristiques des Smart Cells	24
3.2	Dimensions des modèles d’insectes étudiés [99].	37
3.3	Augmentation de la puissance absorbée pour un décalage vers des fréquences plus élevées [99].	38
4.1	Comparaison technique des principales technologies actuelles [161, 162].	49
4.2	Scores environnementaux (points éco-indicateurs de SimaPro) des étapes de la vie des batteries. Le score le plus élevé a l’impact le plus important [165].	51
4.3	Quantités des métaux présents dans les cathodes NCA et NMC (en kg/kWh) [166].	52
4.4	Comparaison des deux batteries utilisées pour l’expérience.	57
4.5	Comparaison de la batterie Li-ion avec les technologies futures.	60
4.6	Résumé des matériaux automobiles avec leurs applications actuelles, leurs avantages et leurs inconvénients [196].	68
4.7	Comparaison entre le réseau actuel et le <i>Smart Grid</i> [203, 204].	72
4.8	Analyse de la composition des systèmes d’automatisation [39].	75
4.9	Limites imposées pour affiner le choix des matériaux.	79
4.10	Comparaison des matériaux répondant au cahier des charges.	80
4.11	Caractéristiques des capteurs utilisés par le constructeur Waymo.	83
4.12	Conséquences de la conduite autonome et partagée sur la consommation d’énergie.	85
4.13	Variation de la consommation d’énergie d’une Tesla Model 3 rendue autonome selon nos hypothèses.	88
4.14	Comparaison entre la Tesla Model 3 actuelle et le même modèle rendu complètement autonome et inscrit dans un schéma de mobilité partagée.	89
5.1	Synthèse des impacts sur les trois piliers du développement durable	92

Annexe : Retranscription des interviews

Interview de Sidina Wane

Jeudi 7 mars 2019

Questions spécifiques aux télécommunications

Q: Quelles sont les changements apportés par la 5G sur le réseau cellulaire ?

R:

- Jusqu'à présent: antennes sont omni-directionnelles (isotropes). Le coût énergétique est élevé car on envoie de l'énergie dans toutes les directions. Les amplificateurs de puissance n'ont pas un rendement élevé et nécessitent un refroidissement important.
Exemple: 1 envoi d'SMS nécessite 200 W de puissance → ce n'est pas un modèle économique viable !
- Raisons principales: énergétique et économique ! Envoyer l'information à des endroits bien précis; les antennes réseaux (antennes intelligentes) sont directionnelles, elles focalisent l'énergie et ne l'envoient pas dans tous les sens;
- Augmenter le nombre de canaux et la bande passante;
- Latence diminuée; permet des échanges de données très rapidement;
- Durée de vie des batteries augmentée car efficacité énergétique est focalisée;
- Impacts sur la santé pas encore bien connus, mais potentiellement dangereux car énergie envoyée est très concentrée;

Q: Quels sont les intérêts/motivations à utiliser la 5G dans le contexte des voitures autonomes ?

R:

- Latence diminuée permet des échanges de données très rapides, ce qui est essentiel pour la sécurité de la conduite;
- Gérer les flux de données énormes créés par les capteurs de la voiture (LiDAR, RADAR, caméras,...) ainsi que tout l'historique de ces capteurs/de ces données pour pouvoir prendre une décision (intelligence artificielle);

Q: Quels sont les enjeux des systèmes de télécommunications de la voiture autonome ?

R:

- Fabrication électronique: créer une chaîne de valeur durable et locale;
- Il faut créer un standard pour tous les constructeurs pour être sûr que toutes les voitures peuvent communiquer entre elles; ce standard risque de prendre du temps à être adopté par tout le monde;
- Etudier les impacts sur la santé/environnement de ces systèmes;

Q: Recommandations pour notre étude ?

R:

S'intéresser à un système à plus petite échelle déjà développé/en développement (par exemple: nanodrones), tirer des conclusions et les adapter à la voiture autonome;

Interview de Damien Deroanne

Mercredi 13 mars 2019

Questions générales

Voici une checklist de l'analyse de durabilité de la voiture autonome:

- Matériaux et fabrication: analyse de la chaîne d'approvisionnement et de ses risques, recyclage durant l'utilisation et en fin de vie de la voiture;
- Environnement: efficacité énergétique, bio-efficacité, pollution de l'air, de l'eau et des sols.
- Législation: connaissance et respect des normes nationales et internationales, accords, directives, restrictions et assurances.
- Société: santé, éducation, logement, emploi, équité, bonheur.
- Aspects économiques: le coût du projet, avantages potentiels de cette voiture.
- Énergie: production de l'énergie nécessaire, consommation énergétique.

Nous considérons le cas d'une flotte de voitures entièrement électriques, d'autonomie de niveau 5.

Q: Quels sont les objectifs d'un passage à la voiture autonome ? Quels en sont les enjeux ?

R:

- Sécurité routière: l'humain n'est pas fait pour conduire;
- Complémentarité avec les transports en commun; mobilité comme un service;
- En gros: tous les avantages de la voiture actuelle, sans ses désavantages (pollution, trafic, mortalité, clivage riches/pauvres,...)
- Enjeux: impact sur les emplois, déshumanisation du secteur automobile, investissements nécessaires,...

Q: Quels sont les freins actuels qu'il faudrait lever pour lancer leur déploiement ?

R:

- Besoin d'un opérateur à bord;
- Investissements massifs nécessaires;
- Législation: niveau international, niveau européen, niveau national, niveau régional. Pour qu'une voiture autonome sorte, il faut que toutes ces parties acceptent;
- Améliorer capacité des batteries;
- Besoin d'une législation comptable avec les voitures autonomes sur la protection des données;
- Recyclabilité des batteries au Lithium ?
- Prendra du temps à se développer et à être accepté, car très médiatisé et mentalité des gens doit évoluer;

Q: Vision de l'arrivée de la voiture autonome ?

R:

- Révolution ! Comme le passage du cheval à la voiture;
- Voiture autonome sera de facto électrique/plug-in;
- Intégration dans Smart Grids;
- Infrastructure routière connectée pour optimiser trafic (comme Waze);

- Messages publicitaires affichés sur un écran à l'arrière de la voiture;

Questions spécifiques d'approfondissement

1. Environnement:

- a. *Arrivée de la voiture autonome: quels impacts sur environnement ? Avantageux ou désavantageux par rapport à situation actuelle ?*

Electricité: propre, mais attention à la production de l'électricité et production des batteries; demander à Ores impact d'une flotte entièrement électrique (pas possible pour l'instant). Alternatives "propres": hydrogène à ne pas négliger, gaz, moteur à fusion. Dépendance vis-à-vis de la Chine au niveau électricité.

2. Société:

- a. *Quels seront les conséquences sur le niveau de vie des consommateurs ?*

Ex: métier de conducteur professionnel: moins d'interactions avec la route, si problème technique on ne peut rien faire, intervention sur ordinateur;

Ex: particuliers: nouveaux moyens de mobilité, + "fainéants", - actifs (vélo, marche), moins de gens passeront le permis de conduire, on ne possèdera plus son véhicule (concept du MAAS). Un vrai service.

- b. *Quels seront les principaux changements à prévoir au niveau urbanisme/infrastructure?*

Moins de parkings, réinventer l'espace public (+ de place pour piétons, vélos,...). Moins de trafic, meilleure qualité de vie en ville.

3. Législation:

- a. *Où en est la législation en ce qui concerne la conduite autonome ?*

A l'international: c'est la convention de Vienne qui établit les règles de base, reconnues et acceptées par tous les pays (sauf USA et quelques pays d'Asie); Depuis 2016, on peut faire des essais de voitures autonomes de niveau 3 en Belgique. C'est très réglementé. 2018: premiers essais de véhicules de niveau 5.

Jusqu'au niveau 4 d'autonomie : c'est le conducteur qui est responsable ! Niveau 5 : constructeur. C'est mieux de donner la responsabilité à la voiture... L'être humain n'est pas encore capable d'accepter que les robots conduisent...

4. Economie:

- a. *Quelles seraient les conséquences sur l'économie de l'arrivée de cette technologie ?*

Economie du service et du car-sharing;

Nécessite des investissements énormes;

Pousser à la réparation plutôt qu'au remplacement;

Interview de Jean-François Gaillet (pour VIAS)

Jeudi 21 mars 2019

Questions générales

Q: Quels sont les objectifs d'un passage à la voiture autonome ? Quels en sont les enjeux ?

R:

- Sécurité routière: plus de dépendance du comportement humain, temps de réaction + court → meilleure sécurité;
- Mobilité: complémentaire aux transports en commun;
- Véhicules + sûrs, moins de bouchons,... → positif pour la mobilité !
- Attention aux accidents entre véhicules autonomes et non-autonomes;
- Enjeux: impact sur les métiers: assurance, garagiste, concessionnaire;
- Impact sur habitudes de mobilité des gens, sur leur santé (car - de déplacements à vélo par exemple), + de déplacements qu'aujourd'hui;

Q: Quels sont les freins actuels qu'il faudrait lever pour lancer leur déploiement ?

R:

- Législation;
- Technique (détection d'obstacles, conditions météo,...)
- Besoin d'un opérateur à bord;
- Impact sociétal, comportement;
- Education du conducteur ! Autonomie de niveau 4, comment reprendre le contrôle du véhicule...? Niveau 4, reprendre le contrôle, on perd 10-13s.

Q: Comment VIAS voit-elle l'arrivée de la voiture autonome ?

R:

- Supposition: impact positif sur la sécurité routière;
- Attention aux comportements des gens, à des nouveaux scénarios d'accidents (des gens qui traversent devant le véhicule)
- Ils sont positifs, mais il faut encadrer et ne pas laisser n'importe quoi sur les routes. Il faut accompagner le conducteur. Proposer une formation "continue" aux conducteurs.
- Tous les véhicules homologués doivent avoir un volant pour l'instant.
- Niveau 5 pas avant 2040-2050;

Questions spécifiques d'approfondissement

1. Environnement:

- a. *Arrivée de la voiture autonome: quels impacts sur environnement ? Avantageux ou désavantageux par rapport à situation actuelle ?*

Electricité: propre, mais attention à la production de l'électricité et production des batteries; demander à Ores impact d'une flotte entièrement électrique (pas possible pour l'instant). Alternatives "propres": hydrogène à ne pas négliger, gaz, moteur à fusion. Dépendance vis-à-vis de la Chine au niveau électricité.

2. Société:

- a. *Quels seront les conséquences sur le niveau de vie des consommateurs ?*

Ex: métier de conducteur professionnel: moins d'interactions avec la route, si problème technique on ne peut rien faire, intervention sur ordinateur;

Ex: particuliers: nouveaux moyens de mobilité, + "fainéants", - actifs (vélo, marche), moins de gens passeront le permis de conduire, on ne possèdera plus son véhicule (concept du MAAS). Un vrai service.

- b. *Quels seront les principaux changements à prévoir au niveau urbanisme/infrastructure ?*

Moins de parkings, réinventer l'espace public (+ de place pour piétons, vélos,...). Moins de trafic, meilleure qualité de vie en ville.

3. Législation:

- a. *Quelles sont les règles/lois en Belgique à adapter pour pouvoir implémenter à 100% la voiture autonome ?*

Règlements mondiaux (règles de Genève), homologations mondiales (non spécifiques à la Belgique). Code de la route: règlement de Vienne, donc aussi international. La Belgique devra juste adapter ses règles nationales.

4. Economie:

- a. *Quelles seront les conséquences sur l'économie de l'arrivée de cette technologie ?*

En Belgique, pas de R&D (à part Toyota). Plutôt impact pour France, Chine, Russie, USA,... test de shuttle chinois.

- b. *Comment évoluera le coût du transport en général ?*

Beaucoup d'offres privées, mais à terme bénéfiques pour les utilisateurs. Voir comment le "traditionnel" va s'adapter (TEC? Stib,...). Nouveau Business model. Le coût au kilomètre diminuera.

Interview de Eric Pirard

Mercredi 09 avril 2019

Questions spécifiques d'approfondissement

- 1) Etat des lieux de la situation actuelle:
 - a) Quels sont les matériaux principaux qui constituent les voitures (au niveau du châssis, batterie, électronique,...) ? Qu'en est-il actuellement du recyclage de ces composants ?
 - b) Quels sont les risques de la chaîne d'approvisionnement (extraction lithium, cobalt, nickel,...)
- 2) Évolutions attendue lors de l'arrivée des véhicules autonomes:
 - a) Quels seront les changements majeurs au niveau des matériaux utilisés ?
 - b) Introduction de nouveaux matériaux: fibre carbone, polycarbonate (pour remplacer surfaces vitrées): durabilité ? Faisabilité ? Coûts ? Recyclage possible ?
 - c) Quelles sont les pistes de solution pour le recyclage des batteries ? Comment augmenter la rentabilité du recyclage ?
 - d) Quelles sont les perspectives d'avenir concernant les batteries ? Utilisation du lithium/cobalt/nickel, batterie lithium-soufre, batterie sodium,... quid de la fabrication et de la durabilité ?
 - e) Quel serait le meilleur modèle à adopter pour optimiser le recyclage des composants ?
- 3) Analyse du cycle de vie et de l'eco-audit sur GRANTA:
 - a) Quelles sont les différents scénarios qu'il est intéressant de comparer ?
 - b) Quel outil est le plus intéressant: Granta ou SimaPro ? Ou autre chose ?

Prise de notes pendant l'interview

- 1) Etat des lieux de la situation actuelle:
 - a) Matériaux principaux: voir document de UBS sur tear-down (Golf) avec décomposition matière. Fer, alliages d'aluminium, cuivre, alliages de zinc,... multiplicité des alliages ! Puis caoutchouc, verre,...
Batterie: lithium-ion (NMC): lithium, nickel, manganèse, cobalt: 8 nickel pour 1 manganèse et 1 cobalt; 2% du poids de la batterie est le lithium;
Recyclage: voir FEBELAUTO. Exemple Toyota Prius: on démantèle les batteries et puis on recycle 97.5% de la carcasse de la voiture. Voir COMET-TRAITEMENT.
Europe: il faut que 95% du POIDS de la voiture soit recyclé. Attention aux matières premières + critiques (métaux rares) qui passent à la trappe... On arrive à retirer les super-aimants des moteurs électriques, qui contiennent des terres rares.
 - b) Voir le Raw Materials Scoreboard de l'Europe: essentiel de la pression se trouve sur le cobalt (extrait à 70% en RDC), donc vraie contrainte pour la production de la batterie de

demain. Deux efforts: trouver d'autres sources de Cobalt que le Congo, ou bien remplacer le cobalt de la batterie pour pousser à avoir + de nickel et - de cobalt.
Nickel: + de producteurs (Canada, Russie, Nouvelles Calédonie, Australie,...)
Lithium: Australie, Chili, Argentine,... en roche ou en lac salé (est présent dans une saumure et on ne fait que l'évaporer).

2) Evolutions attendues:

- a) Carrosserie actuelle: acier galvanisé avec couche de peinture. Difficile à recycler (peinture, zinc de la galvanisation,...). Aluminium: extrêmement gourmand en énergie grise pour l'amener à l'état métallique en tant que matériaux, mais meilleure recyclabilité. Matériaux composites (avec fibres de carbone) peut être une possibilité pour la voiture, mais horrible pour le recyclage car difficile de séparer les polymères, les multi-couches. Avantageux pour masse et résistance et coût, désavantageux pour recyclage.
 - b) Voir a)
 - c) Aujourd'hui: impossible de tout récupérer. Bcp de graphite dans les batteries, impossible à récupérer pour l'instant. Umicore arrive à récupérer le cobalt et le nickel, mais manganèse lithium et graphite: perdu ! Voir si à l'avenir le procédé sera économique/subsidié, loin d'avoir le recyclage parfait pour des raisons technologiques et économiques. Il vaut mieux réfléchir à faire des batteries à assemblage + simple. Standardisation des batteries par marque ? Ou bien pour tous les fabricants ?
 - d) Fabrice Tassin de chez Umicore. On va vers des batteries lithium-soufre, mais à quelle échéance... et à quels usages ? Batterie Lithium fer phosphate: très intéressante car matériaux abondants.
 - e) Pas besoin d'être propriétaire des véhicules: économie du service, qui améliorera la robustesse et la durée de vie. Comparer énergie de fabrication par rapport à l'énergie d'usage: utiliser le + longtemps possible un produit qu'on a fabriqué ! Changement du business model !
- 3) Analyse de cycle de vie: simplifier le problème ! Choisir des gros changements (carrosserie en acier, aluminium ou fibre carbone). Attention: ça n'inclut pas la recyclabilité !!!
Deux options: carrosserie et technologie de batterie tout à fait différentes.
OpenLCA + Ecolnvent pour la base de données.

Autres commentaires:

Durable: mettre dans la balance par rapport à d'autres technologies (analyse cycle de vie pour tenir en compte des émissions de CO2, quantifier ! Prendre en compte le facteur sociétal)
Autonome: encore + d'électronique embarquée, et c'est ça le problème du recyclage !!! Moteur électrique, + simple à fabriquer et + performant que MCI. Par contre, quantité d'électronique embarquée dans véhicules autonomes: problème !!!! Métaux rares !!!! Il faudrait électronique modulaire, facilement démontable. Le pire: avoir l'électronique dispersée dans tout le véhicule, noyée dans les sièges, la carrosserie, le tableau de bord,... ça doit être facile à retirer et à remplacer. Genre "phone blocs", tout modulable.

Interview de Thomas Pardoën

Vendredi 19 avril 2019

Questions spécifiques d'approfondissement

- 1) Etat des lieux de la situation actuelle:
 - a) Quels sont les matériaux principaux qui constituent les voitures:
 - i) Au niveau du châssis ?
 - ii) Au niveau de la batterie des véhicules électriques ?
 - iii) Au niveau des capteurs (capteur à ultrason, caméras, LIDAR, RADAR,...)
 - iv) Qu'en est-il actuellement du recyclage de ces composants ?
 - b) Quels sont les risques de la chaîne d'approvisionnement (extraction lithium, cobalt, nickel,...) ?
- 2) Évolutions attendue lors de l'arrivée des véhicules autonomes:
 - a) Quels seront les changements majeurs au niveau des matériaux utilisés ?
 - b) Introduction de nouveaux matériaux: fibre carbone, polycarbonate (pour remplacer surfaces vitrées): durabilité ? Faisabilité ? Coûts ? Recyclage possible ?
 - c) Quelles sont les pistes de solution pour le recyclage des matériaux, principalement au niveau des capteurs et des batteries ? Comment augmenter la rentabilité du recyclage ?
 - d) Quelles sont les perspectives d'avenir concernant les batteries ? Utilisation du lithium/cobalt/nickel, batterie lithium-soufre, batterie sodium,... quid de la fabrication et de la durabilité ?
 - e) Quel serait le meilleur modèle à adopter pour optimiser le recyclage des composants ?

Prise de notes pendant l'interview

- 1) Etat des lieux de la situation actuelle:
 - a) Structure portante: acier, et ça continuera à être de l'acier car progrès immense ces 15 dernières années. Propriétés de l'acier (absorption chocs) multipliée par 2 en 15 ans. Pour une masse + faible, on peut atteindre les mêmes résultats qu'il y a 10 ans. Aciers: + résistants ! Sinon: titane, mais beaucoup + cher.
Emballage: acier, aluminium, et composites. En fonction du type de sollicitations. Rapport densité/module de l'aluminium amélioré en y ajoutant du lithium.
Donc pour le châssis (la couverture): aluminium ou composite (+ cher !).
Coût énergétique fibre de carbone est très cher ! On espère aller vers composite avec fibres naturelles ou polymères biosourcés (sources naturelles et pas pétrole, mais bien végétale ou animale !)

Important pour le châssis: ne pas avoir de déformation plastique permanente.
Gros problème des composites: très chers et pas recyclables, car résines thermosensibles: au niveau moléculaires, elle forment un réseau 3D de chaînes pour

améliorer ses propriétés. Thermoplastiques: recyclables ! Fibre de verre thermoplastique: recyclable !

- b) Batterie: /
- c) Principalement silicium, polysilicium,... pas problématique. Arséniure de gallium, problématique ! Tous les matériaux utilisés pour réaliser des transistors ! Recyclage difficile car petite quantité... stratégie incroyable de la Chine. Aussi: coût énergétique pour les extraire. Parallèle avec les barils de pétrole...
- d) Alliages: parfait pour recycler car alliages de fer à 95% (et le reste: silicium, bore, manganèse, chrome et nickel pour les inox,...) ça reste extrêmement durables.

2) Evolutions attendues:

- a) Comme moins d'accident, on peut se poser la question de savoir si les matériaux devront être aussi résistants ? On peut diminuer la résistance structurale ? On fera diminuer la masse.
- b) Polycarbonate: problème de tenue aux UV, problèmes de qualité optique sur le long terme ! Faire calcul sur indice de performance ! Module du verre est bien supérieur au polycarbonate (50x supérieur), problèmes de défection et de rupture ! Capacité à résister à la fissuration est meilleure pour le polycarbonate.
- c) Simplifier les matériaux de base ! Intégrer moins, moins d'alliages, éléments + purs, éviter de coller, éviter de souder, utiliser toutes les techniques d'intégration mécaniques (exemple: frettage qui utilise des efforts mécaniques; imbrication mécanique) ... on peut perdre en efficacité. Impression 3D va peut-être aider à cela. Pouvoir désassembler facilement. + la logique du mécano. Eviter au maximum la chimie dans les étapes du recyclage !
Énergie dans le recyclage: réchauffer et refroidir (pour passer à l'état liquide/gazeux), les solvants pour séparer, les chocs mécaniques, les vibrations pour démanteler.
Avant de recycler: réparons ! Mettre des contraintes pour que les fabricants soient forcés à faire les meilleurs choix pour être durables, surtout pour l'économie de la fonctionnalité. Réparer !!!! Comme les avions ! Le fait d'avoir autonomie peut aider à voir la voiture comme un avion, et LCA c'est positif pour la durabilité !

Autres commentaires:

Camion: 2-3 millions de km!!!

Voir chiffres km taxi, avion;

Il vaut mieux UN GROS MOTEUR thermique qui produit électricité pour alimenter des voitures électriques, plutôt qu'un million de petits moteurs thermiques.

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/epl