

La Revue SEE



Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>



*VÉHICULE
ÉLECTRIFIÉ,
AVENIR DE
L'AUTOMOBILE ?*

Publication trimestrielle du Cercle Thématique 13.01 de la SEE

ENSEIGNER L'ÉLECTROTECHNIQUE ET L'ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE



Société de l'Électricité, de l'Électronique
et des Technologies de l'Information
et de la Communication

N°99 – Janvier 2020

Abonnez-vous à **La Revue 3E.I**

ENSEIGNER L'ÉLECTROTECHNIQUE ET L'ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE

- Outil didactique pour les filières préparant à l'enseignement technique
- Trame indispensable à la formation continue des hommes et des femmes de terrain
- 4 N° par an : Janvier, Avril, Juillet, Octobre
- 3 dossiers complets par an sur des sujets d'actualité + 1 N° Pratique pédagogique



BULLETIN D'ABONNEMENT 2020



VERSION PAPIER

4 numéros : janvier, avril, juillet, octobre.
Distribution postale

France & UE	Hors UE
40 € TTC	49,18 € HT



VERSION NUMÉRIQUE

Accès aux publications numériques
ouvert pendant un an à compter
de la date de souscription

France & UE	Hors UE
30 € TTC	29,38 € HT



VERSION DUO

Version imprimée
+ version numérique

France & UE	Hors UE
50 € TTC	58,97 € HT

VERSION PREMIUM

- > Adhésion SEE avec accès e3E.I
- + Tarif préférentiel à la revue 3E.I format papier
- + Accès numérique aux revues 3E.I et REE
- + Tarifs préférentiels aux conférences et journées d'études

Adhésion SEE		
Standard	Retraités, enseignants, jeunes actifs (< 35 ans)	Etudiants, en recherche d'emploi
125 € TTC	65 € TTC	15 € TTC
+ Abonnement 3E.I (Version papier)		
France & UE : 32 € TTC		Hors UE : 41,34 € HT

TVA de la revue 3E.I : 2,1 %. Adhésion collective possible via des conventions de partenariat - Contactez-nous à : sg@see.asso.fr

MES COORDONNÉES

Prénom :

Nom :

ADRESSE DE LIVRAISON

Adresse :

Code postal :

Pays :

Ville :

Tél. :

e-mail* :

* Obligatoire

MON RÉGLEMENT

Je règle la somme de _____ €

par Chèque à l'ordre de la SEE

Carte bancaire (Visa, Eurocard/Mastercard)

N° Carte _____

Date de validité _____ N° cryptogramme _____ (3 derniers chiffres au dos de la carte)

Je consens à recevoir les autres diffusions de la SEE & de ses activités (congrès, soirées débats, revues, etc.) qui sont extérieur aux diffusions liés à mon abonnement

Conformément aux dispositions légales et réglementaires en matière de données personnelles, les informations recueillies sur ce formulaire sont enregistrées dans un fichier informatisé par la SEE (Société de l'électricité, de l'électronique et des technologies de l'information et de la communication) pour la mise en place et le suivi de l'abonnement souscrit ainsi que pour l'envoi de courriers, e-mails de réabonnements. Elles sont conservées et sont destinées à être utilisées par la SEE et les prestataires techniques de la SEE afin de permettre la bonne réception du magazine et d'assurer le service client. Vous pouvez exercer votre droit d'accès aux données vous concernant par courrier : SEE - Service abonnements 17 rue de l'Amiral Hamelin 75783 Paris Cedex 16 ou par le formulaire de contact du site web : www.see.asso.fr
Offre valable du 01/01/2020 au 31/12/2020.

ADRESSE DE FACTURE (Si différente)

Je joins le bon de commande administratif N° : _____ et je désire recevoir une facture au nom de mon employeur pour paiement à réception

Raison sociale de l'employeur :

Service :

Activité (facultatif) :

Adresse :

Code postal :

Ville :

Pays :

N° TVA :

N° TVA intracommunautaire : obligatoire pour règlement HT en UE Hors de France

e-mail* :

* Obligatoire

Date

Signature (mentions obligatoires) et cachet si il y a lieu :



ABONNEMENT + RAPIDE : <https://www.see.asso.fr/3ei>

La Revue 3E.I est une publication trimestrielle de la SEE.
Les sommaires des derniers numéros sont disponibles sur le site
www.see.asso.fr/3ei





SOCIÉTÉ de l'ELECTRICITE, de l'ELECTRONIQUE et des TECHNOLOGIES de l'INFORMATION et de la COMMUNICATION.

17, rue de l'Amiral Hamelin, 75116 PARIS

Tél : 01 56 90 37 17

site web : www.see.asso.fr

La Revue 3EI

publication trimestrielle
de la SEE

SEE, association reconnue d'utilité publique par le décret du 7 décembre 1886
Siret 785 393 232 00042, APE 9412 Z, n° d'identification FR 44 785 393 232

3EI : Enseigner l'Électrotechnique et l'Électronique Industrielle

<p>La Revue 3EI, Édition SEE, 17 rue de l'Amiral Hamelin 75116 PARIS</p> <p>Directeur de la publication François GERIN Président de la SEE</p> <p>Rédacteur en Chef Franck LE GALL</p> <p>Adresser les propositions d'article à : revue3ei@gmail.com ou sur le site https://www.see.asso.fr/3ei rubrique "soumettre un article"</p> <p>Communication : Mme. Mélisande DE LASSENCE Communication1@see.asso.fr 01 56 90 37 17</p> <p>Promotion et Abonnements : (4 numéros par an) Janvier, Avril, Juillet, Octobre 2020. Tél : 01 56 90 37 17 abo@see.asso.fr</p> <p>Tarifs 2020 :</p> <p>Version PAPIER :</p> <p>France et UE (TTC) 40 € Pays hors UE (HT) 49,18 €</p> <p>Version NUMÉRIQUE :</p> <p>France et UE (TTC) 30 € Pays hors UE (HT) 29,38 €</p> <p>Version DUO (Papier+Num.) :</p> <p>France et UE (TTC) 50 € Pays hors UE (HT) 58,97 €</p> <p>Impression : JOUVE 53100 Mayenne 11 bd de Sébastopol - 75027 Paris Cédex 1 - Tel : 01 44 76 54 40 Couv : O.P. : All. – TFR : 0 – C. : PEFC Corp. : O.P. : Esp. – TFR : 0 – C. : PEFC</p> <p>Dépôt Légal : Janvier 2020</p> <p>Commission Paritaire 1222 G 78028 ISSN 1252-770X</p>	<p style="text-align: right;">Sommaire du n° 99</p> <p style="text-align: center;">Numéro spécial : Le véhicule électrifié, avenir de l'automobile ?</p> <p>p. 2 <i>Éditorial,</i></p> <p>p. 3 <i>Le véhicule électrifié, une solution d'avenir pour l'automobile ?</i> Fabrice LE BERR⁽¹⁾, Anthony JUTON⁽²⁾ ⁽¹⁾ IFPEN - Reuil-Malmaison ⁽²⁾ ENS Paris Saclay,</p> <p>p. 14 <i>Les solutions actuelles de motorisations pour véhicules électriques</i> Xavier RAIN IUT de Cachan</p> <p>p. 26 <i>Les Batteries</i> Valérie SAUVANT-MOYNOT⁽¹⁾, François ORSINI⁽²⁾, Anthony JUTON⁽³⁾ ⁽¹⁾ IFP Energies nouvelles - Solaize ⁽²⁾ RENAULT Technocentre ⁽³⁾ ENS Paris-Saclay</p> <p>p. 43 <i>Chargeurs de batteries pour VE</i> Christelle SABER, Najib ROUHANA Safran Electrical & Power - Magny-les-Hameaux</p> <p style="text-align: center;">Hors Thème :</p> <p>p. 54 <i>Estimation de l'inductance d'une bobine DROITE cylindrique</i> Jean-Charles JACOB, Lycée Saint Exupéry Mantes La Jolie Dominique JACOB, IUT GEII - Poitiers</p> <p>p. 65 <i>Éclairage véhicules (banc de test)</i> A.SIVERT, F.BETIN, B.VACOSSIN U.P.J.V Université de Picardie Jules Verne, Institut Universitaire de Technologie de l'Aisne GEII - Soissons</p> <p>p. 74 <i>Concours Smart Industrie</i> C. BASSET, JP ILARY IUT GEII - Ville d'Avray</p>
---	--

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans la présente édition, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées. Toutefois des copies peuvent être utilisées avec l'autorisation de l'éditeur. Celle-ci pourra être obtenue auprès du Centre Français du Droit de Copie, 20, rue des Grands Augustins, 75006 Paris, auquel la Revue 3EI a donné mandat pour la représenter auprès des utilisateurs. (loi du 11 mars 1957, art.40 et 41 et Code Pénal art. 425)

Le véhicule électrifié est-il l'avenir de l'automobile ? Depuis quelques années, cette question est régulièrement mise en avant dans de nombreuses revues et journaux grand public. Les avis sont souvent tranchés entre les pro « tout électrique » et les sceptiques qui mettent principalement en avant un bilan carbone de l'ensemble de la chaîne de production qui ne serait pas favorable ou les limites de capacité de production des réseaux électriques.

La revue 3EI a souhaité apporter sa pierre au débat en choisissant ce thème pour les numéros de janvier et avril 2020. Les quatre articles qui composent le thème de la revue de janvier ont été rédigés par des spécialistes (industriels ou universitaires) du domaine. Ils permettent de se faire une opinion étayée à base de données actualisées et vérifiables. Afin d'être le plus exhaustif possible, nous poursuivrons ce thème dans le numéro du trimestre prochain. Nous y aborderons les questions sur l'impact sur le réseau électrique, la connexion véhicule-réseau, la recharge sans contact, les perspectives de l'hydrogène, de nouvelles architectures de machines pour finir par quelques applications pédagogiques.

Nous espérons que ces numéros vous seront utiles dans vos formations et qu'ils permettront d'alimenter un débat de qualité basé sur des données scientifiques et techniques.

« Thème : Le véhicule électrifié, avenir de l'automobile ? »

L'article de MM Le Berr et Juton ouvre le thème sur le contexte général de la mutation actuelle de l'industrie automobile qui passe d'une prédominance mécanique et thermique à une importance majeure donnée au génie électrique et à l'informatique embarquée. Les auteurs font le point sur les avantages et les inconvénients des différents types de véhicules électrifiés (Électrique, hybrides, voiture, Bus ...) et sur l'optimisation de leurs usages en ville ou en parcours extra-urbains dans le contexte des problèmes liés au réchauffement climatique et à la pollution locale des agglomérations.

M. Rain de l'UT de Cachan dresse lui l'état de l'art des différentes technologies de motorisations équipant les véhicules tout électriques et hybrides actuels. Après avoir présenté les trois technologies de motorisation actuelles ainsi que les raisons qui ont présidées à leur choix, l'auteur dresse les perspectives des pistes qui devront être explorées pour le moteur électrique de demain.

Le sujet crucial des batteries est traité par Mme Sauvant-Moynot et MM Orsini et Juton. Les auteurs font le point sur les progrès sensibles réalisés ces dernières années avec l'optimisation des cellules Lithium et des autres composants de la batterie (électriques, électroniques et mécaniques). Ils dessinent la feuille de route technologique de la prochaine décennie et insistent sur la nécessité d'intégrer, dans les efforts de recherches les défis de l'écoconception et du recyclage pour minimiser l'empreinte carbone de la filière batterie.

Le dernier article du thème s'intéresse à l'enjeu stratégique pour les constructeurs automobiles que constitue la recharge d'un véhicule électrique (VE) et se concentre particulièrement sur les chargeurs de batteries conductifs pour VE. Il présente les enjeux liés à la recharge des VE et les différents types de chargeurs à cordon avec des exemples concrets de topologies de chargeurs. Les chargeurs étant intimement liés aux infrastructures de recharge (type de bornes de recharge) et aux normes en vigueur dans les pays de déploiement, une section de l'article est dédiée à la présentation de ces technologies.

« Hors thème »

MM. Jacob nous proposent un article très intéressant sur la modélisation de l'inductance d'une bobine droite à noyau magnétique cylindrique. Leur méthode pour établir une formule analytique basée sur le potentiel scalaire magnétique peut être étudiée avec des étudiants de classes préparatoires scientifiques. Elle conduit à des résultats confrontés à des mesures expérimentales qui permettent aux auteurs de proposer une critique constructive de leur propre travail.

Le dernier article de ce numéro s'intéresse au problème de la caractérisation des éclairages de véhicules et particulièrement à la réalisation d'un banc de test. M. Sivert et son équipe font le point sur les normes du domaine et sur l'ensemble des mesures qui peuvent être réalisées montrant ainsi que ce projet peut être réalisé avec des étudiants de DUT.

Bonne lecture

Le Comité de Publication de la Revue 3EI

Faites connaître notre revue
Vous en assurez la pérennité

La Revue 3EI

Comité de publication

Morgan ALMANZA

Hamid BEN AHMED

Arnaud BRUGIER

Jacques COURAULT

Jean FAUCHER

Gilles FELD

Jean Michel GAY

Jean-Philippe ILARY

Anthony JUTON

Chérif LAROUCI

Marie-Michèle LE BIHAN

Franck LE GALL

Denis LABROUSSE

Pascal LOOS

Marc PETIT

Sylvain PIETRANICO

Oviglio SALA

Jean-François SERGENT

Jean-Claude VANNIER

LE VÉHICULE ÉLECTRIFIÉ, UNE SOLUTION D'AVENIR POUR L'AUTOMOBILE ?

FABRICE LE BERR⁽¹⁾, ANTHONY JUTON⁽²⁾

⁽¹⁾ Chef du département Systèmes électrifiés, IFPEN, fabrice.le-berr@ifpen.fr

⁽²⁾ professeur agrégé de physique appliquée, ENS Paris Saclay, anthony.juton@ens-paris-saclay.fr

Résumé : Fin 2018, plus de 5% des véhicules vendus dans le monde étaient électrifiés (véhicules électriques ou hybrides) et l'électrification des véhicules particuliers, ainsi que les fonctions d'autonomie partielle ou complète, sont l'objet de la majorité des nombreuses innovations des constructeurs automobiles. Rarement l'histoire aura vu une filière industrielle effectuer une mutation aussi rapide, d'une prédominance mécanique et thermique à une importance donnée au génie électrique et à l'informatique embarquée. Quelques jours avant que la capitalisation boursière de Tesla ne dépasse celle de Volkswagen, le journal *Le Monde* titrait *Il ne faudrait pas que Tesla soit à Volkswagen ce qu'Apple a été à Nokia* **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** un article sur les transformations en cours dans l'automobile.

Accompagnant cette mutation des compétences nécessaires dans l'industrie automobile, la revue 3EI propose un dossier sur 2 numéros pour faire un état de l'art des technologies des véhicules électrifiés et des innovations à venir. Y seront approfondis ce trimestre les motorisations, les batteries, les chargeurs puis le trimestre prochain les impacts sur le réseau électrique, la connexion véhicule-réseau (V2G : Véhicules To Grid), la recharge sans contact, les perspectives de l'hydrogène, de nouvelles architectures de machines pour finir par quelques applications pédagogiques.

Ce premier article vise à introduire le sujet en l'ancrant dans une perspective économique et écologique s'appuyant sur des études scientifiques solides, pour montrer la pertinence de la filière électrique pour contribuer à répondre à l'enjeu environnemental de la décennie qui s'ouvre. L'aspect social (possession/location du véhicule, auto-partage, rejet urbain de l'automobile au profit des mobilités douces), bien qu'intéressant n'est pas traité ici.

1. Le marché du véhicule électrique en 2019

En France, en Europe, comme en Chine ou aux Etats-Unis, plusieurs facteurs influencent le marché des véhicules électriques :

- La réglementation dans le centre des grandes agglomérations. Parmi de nombreux exemples notons « Copenhague zéro émission en 2030 » ou Paris « interdite au diesel en 2024 » et dès aujourd'hui autorisée sans condition d'immatriculation uniquement aux véhicules zéro émission les jours de forte pollution.
- Les aides publiques à l'achat de véhicules mais aussi à l'installation de bornes de recharge.
- La possibilité de disposer d'une prise pour les recharges quotidiennes (Installation d'un chargeur dans les habitats collectifs ou dans les entreprises, présence de chargeurs urbains pour les personnes ne disposant pas de parking...)
- L'évolution de l'image associée à la voiture. Les critères conventionnels de puissance, vitesse, taille et poids sont antagonistes au développement durable.
- L'acceptation d'une évolution de l'usage : temps de charge augmenté pour les longs trajets

exceptionnels et adaptation du moment de la charge à la disponibilité du réseau.

- Les normes anti-pollution sur les constructeurs automobiles, (moins de 95g CO₂/km en moyenne sur les véhicules en Europe et interdiction prévue de la vente de véhicules à moteur thermique en 2040 en France). D'autres pays (Chine, Etats-Unis) sont sur des trajectoires similaires.
- Les évolutions techniques (capacité et coût des batteries notamment, durée de la charge) et logistiques (densité de chargeurs rapides sur le territoire),
- L'offre proposée (véhicules attractifs, adaptés aux usages et abordables).

En 2018, dans le monde, le marché des véhicules particuliers était réparti de la manière suivante [1] :

- véhicules hybrides non rechargeable (HEV) 2,5 %
- véhicules à batterie électrique (BEV) 2,1 %
- véhicules hybrides rechargeable (PHEV) 0,7 %
- véhicules à pile à combustible (anecdote, 3500 véhicules vendus en 2018)
- véhicules thermiques 84,7 %

On compte actuellement environ cinq millions de véhicules électriques (VE) en circulation dans le monde, soit environ 0,5 % du parc total de véhicules légers. Plus des deux tiers des VE sont 100 % électriques (BEV). La Chine est de loin le premier marché du VE avec plus de 2 millions de véhicules en circulation, soit le double de l'Europe ou des États-Unis.

En Chine, les constructeurs (Geely, Chery, BAIC,...) proposent de nombreux modèles. 40 % des

modèles vendus en 2018 étaient chinois. 3,7 % des ventes sont des véhicules électriques à batterie, grâce à un fort soutien de l'état (subventions, barrières douanière) qui voit dans la jeune filière électrique une possibilité pour l'industrie chinoise de faire jeu égal avec les constructeurs européens.

En Europe, la Norvège se distingue avec 40 % des ventes concernant les véhicules à batterie. Sur l'ensemble du continent, les 360 000 BEV représentent 2,5 % du marché, en hausse de 33 %. La France est le 4^{ème} marché avec 61000 véhicules BEV vendus.

Aux États-Unis, la filière BEV (2,1% des ventes) est essentiellement tirée par Tesla.

Tous les scénarios montrent une croissance des ventes de véhicules électriques. Ils envisagent une pénétration de 10 % à 30 % de BEV dans le parc automobile en 2030. Voici les projections pour 2020 et 2035 de la plateforme de la filière automobile (association rassemblant les acteurs français de l'industrie automobile) :

	2020	2035
Véhicules hybrides	10,9	28,9
Véhicules hybrides rechargeables	6	20,4
Véhicules électriques	7,2	30,5
Véhicules essence	34,3	14,7
Véhicules diesel	41,7	5,6

Figure 1 : Répartition des ventes de véhicules légers neufs par mode de chaîne de traction en France. Source : Plateforme de la filière automobile

Notons qu'un développement important du parc électrique est coûteux pour l'état, d'une part sur les premières années à cause des subventions à l'achat de véhicules et au déploiement de l'infrastructure de charge mais aussi, plus durablement, parce qu'il diminue la consommation de carburant à l'origine de 5 % de ses revenus (35 Mds d'euros en 2018 de recettes fiscales sur les produits pétroliers).

Notons également qu'un marché de l'occasion commence à apparaître, porté par les longues garanties constructeurs sur les batteries (jusqu'à 160 000 km).

2. L'impact environnemental du véhicule électrique est-il réellement positif ?

Aspect majeur du développement des véhicules électriques, l'impact environnemental de ces voitures électrifiées fait débat. Tentons d'apporter quelques éléments scientifiques à ce débat. Cette partie, comme la suivante, s'appuie essentiellement sur l'« Étude Économique, Énergétique et Environnementale pour les technologies du Transport routier français » (E4T) [2] réalisée par l'IFPEN en partenariat avec l'ADEME.

La COP21 a fixé des objectifs ambitieux en termes de réduction des gaz à effet de serre. L'Europe s'engage actuellement vers la neutralité carbone pour 2050. En Europe, les transports sont avec 27 % le premier poste d'émissions de gaz à effet de serre et les voitures particulières représentent 30 % de ce total, les véhicules utilitaires 15 %, les bus 2 %.

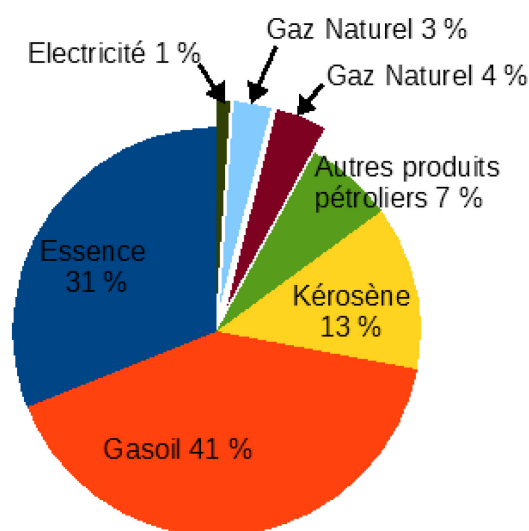


Figure 2: Mix énergétique mondial du secteur des transports en 2012

En France, la production de l'électricité est massivement décarbonée. En Europe la production d'électricité suit cette voie, doucement, par l'introduction d'énergie renouvelable (35 % de la production d'électricité en Allemagne en 2018, 33 % en Espagne) et la fermeture de centrale à charbon.

Ajoutons à cet impact sur le climat, l'aspiration des citoyens pour une meilleure qualité de l'air en ville (limitation des émissions de polluants atmosphériques comme les NOx et les particules fines) et la nécessaire diminution de la dépendance de la France aux pays exportateurs de pétrole (tarissement de la ressource, instabilité des cours, indépendance géopolitique face à des états producteurs peu démocratiques).

L'approche d'analyse de cycle de vie (ACV) retenue par l'étude E4T intègre, dans ses bilans, la production de l'énergie (approche « du puits au réservoir ») mais aussi la fabrication du véhicule (approche « du berceau à la tombe »), ce qui permet d'obtenir des bilans ACV complets et consistants. La démarche est minutieusement détaillée dans l'étude.

Deux années sont considérées, 2018 et 2030. Dans cet intervalle temporel, l'étude prend en compte les améliorations prévues sur les rendements des moteurs et les densités de puissance des batteries notamment.

Plusieurs catégories de véhicules ont été prises en compte. Un usage représentatif de chaque catégorie de véhicule a été retenu, par exemple :

- 10 ans de durée de vie et 12 000 km/an pour les véhicules urbains, avec des parcours types. Les usages exceptionnels, comme les longs trajets de vacances ont été exclus de cette étude,
- 12 ans de durée de vie et 40 000 km/an pour les bus, essentiellement en ville.

Concernant le mix énergétique, l'étude se focalise sur la France et son mix spécifique, très fortement décarboné.

L'étude traite 3 types de véhicules particuliers : les petits véhicules urbains (catégorie A), les véhicules

cœur de gamme (catégorie C) et les véhicules haut de gamme (catégorie D).

2.1. Véhicules urbains

Pour les véhicules urbains, 4 véhicules sont comparés :

- véhicule à essence (4L/100km en cycle normalisé en 2030)
- véhicule à hybridation légère (« mild hybrid » : hybridation 48V permettant un soutien du moteur thermique pour les phases d'accélération mais aussi la récupération d'une partie de l'énergie au freinage, 3L/100km en cycle normalisé en 2030)
- véhicule hybride rechargeable (50 km d'autonomie en électrique).
- véhicule à batterie seule (200 km d'autonomie ; 10kWh/100km en 2030)

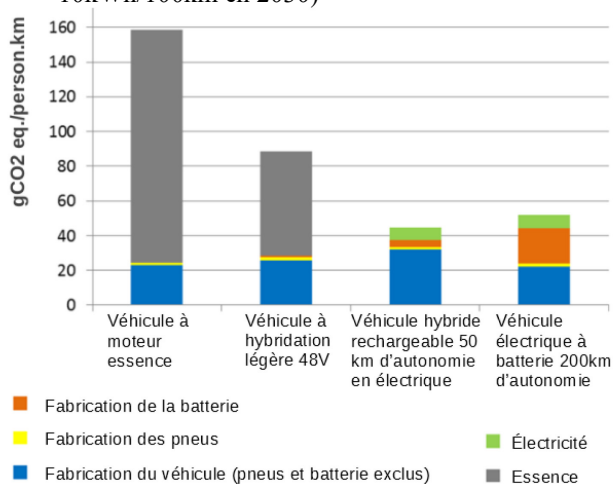


Figure 3: Impact sur le changement climatique d'une personne utilisant son véhicule de segment A en 2030 en usage urbain [2]

Le bilan ressort comme favorable aux véhicules électrifiés à batterie, d'autant plus si on prend en compte une autonomie limitée.

Finalement, et compte tenu des évolutions attendues sur le fonctionnement des centres villes (péages ou interdiction aux véhicules polluants, facilités de stationnement pour le véhicule électrique), il semble que l'avenir du petit véhicule urbain soit promis au véhicule électrifié.

Notons que la tendance actuelle à accroître la taille de la batterie pour accroître l'autonomie du véhicule électrique, pour quelques longs trajets annuels, détériore nettement le bilan carbone du véhicule.

2.2. Véhicules cœur de gamme et haut de gamme

Pour les véhicules de cœur de gamme familiaux et les véhicules haut de gamme, 9 types de véhicules ont été étudiés. Notons qu'à partir de 2021, les véhicules de taille moyenne ou grosses non électrifiés sont bien au-delà de la norme moyenne (pour l'ensemble de la gamme) des 95g CO₂/km.

De plus, pour ce type de véhicules se pose le problème de l'autonomie pour des trajets plus

importants qui demandent une batterie plus grosse ou un prolongateur d'autonomie.

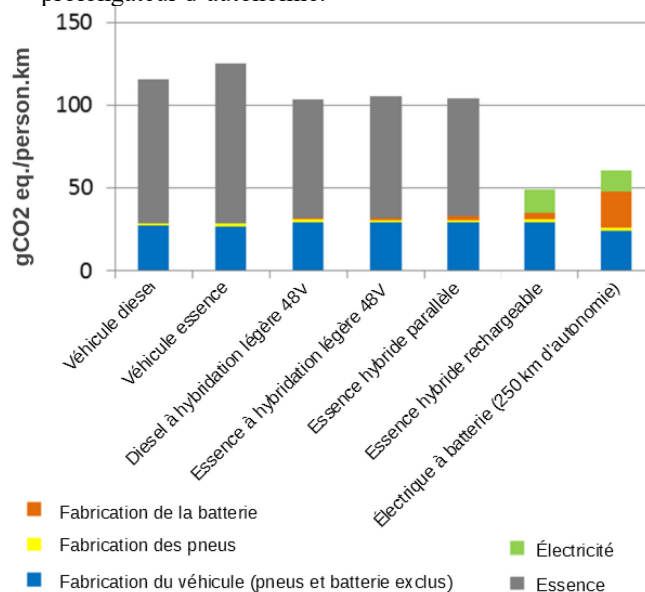


Figure 4: Impact sur le changement climatique d'une personne utilisant son véhicule de segment C en 2030 sur le cycle WLTC [2]

2 solutions ressortent de l'étude (pour les véhicules cœur de gamme comme haut de gamme) comme étant les plus écologiques et permettant de plus de longs trajets tout en gardant une batterie de taille raisonnable :

- L'hybride rechargeable PHEV avec un moteur thermique, un petit moteur électrique et une batterie d'autonomie 50 km (qui correspond aux 10 kWh de batterie installés sur ce type de véhicule),
- Le véhicule électrique à batterie moyenne (30 kWh, autonomie 250 km) avec un petit groupe thermique prolongateur d'autonomie.

Notons que la tendance actuelle à l'augmentation de la taille des batteries des véhicules électriques (50 kWh sur les citadines, 80 kWh sur les haut-de-gamme) ne correspond pas à ce que préconiserait l'étude, et ceci afin de limiter l'impact environnemental et économique des véhicules électrifiés. Le prolongateur d'autonomie interne (Opel Ampera, BMW i3) est pour l'instant abandonné au profit des véhicules hybrides rechargeables moyenne gamme. Se développe par ailleurs une solution originale de prolongateurs d'autonomie remorque EP Tender à louer. [13]

2.3. Bus

Le cycle de roulage des citadines est particulièrement favorable au véhicule électrique. Les bus est donc pressenti comme un candidat à l'électrification, d'autant plus qu'un bus zéro émission contribue à l'image de la ville et que les entreprises propriétaires sont plus susceptibles d'investir massivement pour un retour sur investissement sur 5 ou 10 ans que les particuliers.

L'impact sur les émissions de gaz à effet de serre des solutions électriques est particulièrement intéressant. En effet, l'impact de la batterie est très rapidement amorti

par le nombre de kilomètres conséquents réalisés par ce type de véhicule. De plus, les parcours réalisés par les bus, présentant de nombreux arrêts / redémarrages sont particulièrement favorables aux véhicules électriques.

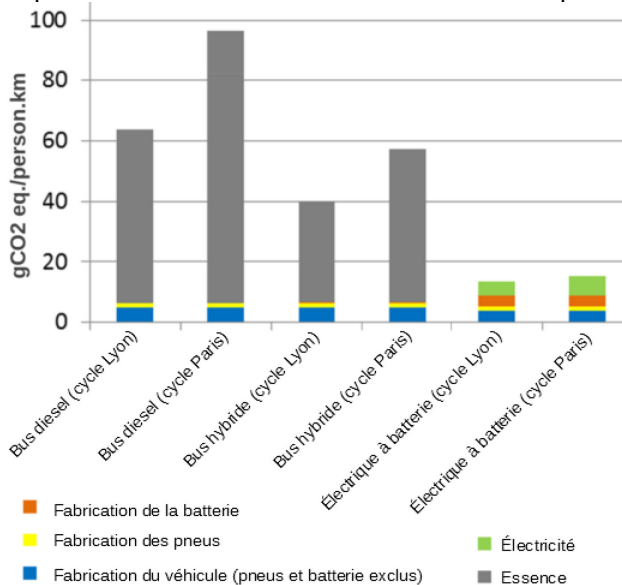


Figure 5: Impacts sur le changement climatique d'une personne prenant le bus pour différentes technologies et différents cycles. Horizon temporel 2030 [2]

2.4. Utilitaires - Camions

L'étude E4T a mis en avant l'adéquation nécessaire entre usage et niveau d'électrification (dimensionnement des batteries). Un usage urbain bénéficie du bon rendement du moteur électrique à tous les régimes et de sa capacité à récupérer l'énergie au freinage, alors que sur un fonctionnement sur autoroute, la forte consommation liée à la prise au vent du véhicule limite rapidement l'autonomie de la batterie. Impossible dans ces conditions de tirer une conclusion sur les utilitaires ou camions en général. 2 réflexions simplement :

L'usage urbain tire profit d'un moteur zéro émission pour un accès non limité au centre-ville. Un camion de livraison pourrait tirer bénéfice d'un moteur électrique dans ces conditions. C'est en ce sens que le camion électrique proposé par Volvo est un camion urbain (ramassage d'ordure, livraison).

Pour les véhicules fonctionnant essentiellement sur autoroute (poids lourds par exemple), l'étude souligne l'intérêt du GNV (Gaz Naturel pour Véhicules) ou GNL (Gaz Naturel Liquéfié), permettant une longue autonomie et un remplissage rapide. Volvo pour le transport longue distance a pour l'instant abandonné l'électrique et propose un camion GNL, le camion tout électrique Tesla Semi (1000 kWh de batteries...) n'a pas de date de commercialisation annoncée et a disparu du site web de Tesla.

3. Le véhicule électrique est-il économiquement viable ?

La rentabilité économique est le reproche souvent fait aux véhicules électriques. Les économies sur le carburant permettent-elles d'amortir le surcoût de la batterie ? L'étude E4T [2] a également étudié minutieusement le **coût global de possession (TCO, pour Total cost of ownership) sur les catégories de véhicules citées dans la partie précédentes**. Cet indicateur prend en compte l'ensemble des coûts liés à l'achat et l'utilisation (énergie, maintenance, assurance, etc.) du véhicule sur toute sa durée de vie y compris sa valeur résiduelle.

Un fort usage du véhicule dans le cas des bus par exemple accélère le retour sur investissement.

Tant que la rentabilité n'est pas assurée, les aides gouvernementales doivent compenser le surcoût pour assurer le démarrage de la filière.

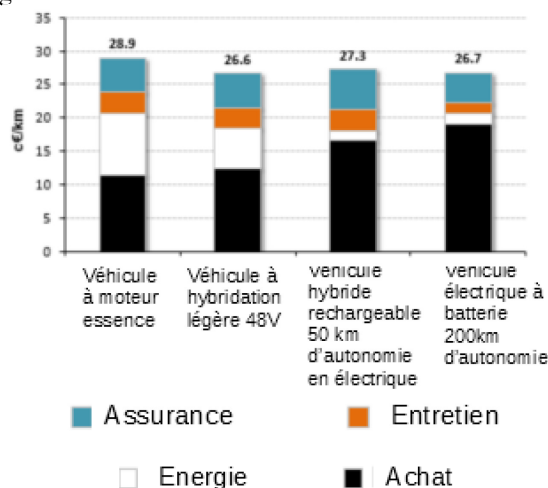
L'étude E4T a ainsi conservé les aides étatiques pour l'étude du coût total de possession en 2018 et supprimé toute aide pour l'étude du coût total de possession en 2030.

Les conclusions de l'étude E4T sont proches de celles de l'étude « Le véhicule électrique dans la transition écologique en France », coordonnée par la Fondation pour la Nature et l'Homme et l'European Climate Foundation en 2017 [3]. C'est pourquoi ses résultats ne sont pas reportés ici. Le lecteur assidu pourra s'y reporter pour confirmation.

3.1. Véhicules urbains

Pour une petite citadine (segment A), parcourant 8 000 km par an, en 2030, l'écart de compétitivité est de 6 % avec le véhicule essence.

On note le positionnement intéressant de la solution hybridation douce 48V, qui pour un investissement initial relativement limité (proche de celui d'un véhicule thermique) permet des gains de consommation significatifs.



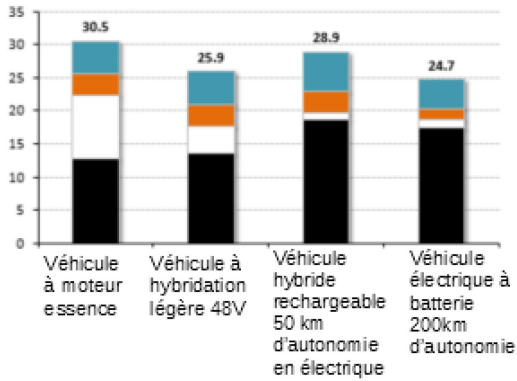


Figure 6 : TCO de véhicules de segment A en 2015 (en haut) et 2030 (en bas) sur le cycle urbain [2]

L'écart de compétitivité entre le VE et le véhicule thermique augmente si l'on considère uniquement des déplacements urbains à condition de ne pas surdimensionner la batterie électrique. De même l'avantage économique du VE augmente avec le nombre de km parcourus.

3.2. Véhicules cœur de gamme et haut de gamme

Pour les véhicules cœur de gamme, on remarque que le véhicule électrique reste compétitif, même en comptant un changement de batterie une fois dans les 10 ans considérés, à la condition d'avoir une batterie limitée à 30 kWh environ, suffisante pour les déplacements pendulaires quotidiens.

Le problème pour ces véhicules est l'autonomie réduite. Les utilisateurs accepteront-ils d'ajouter un prolongateur d'autonomie (surcoût, perte d'une partie du coffre) ou de patienter chaque 200 km les 30 mn de charge (ou moins en 2030 ?) du véhicule, pour les déplacements exceptionnels (WE, vacances) ?

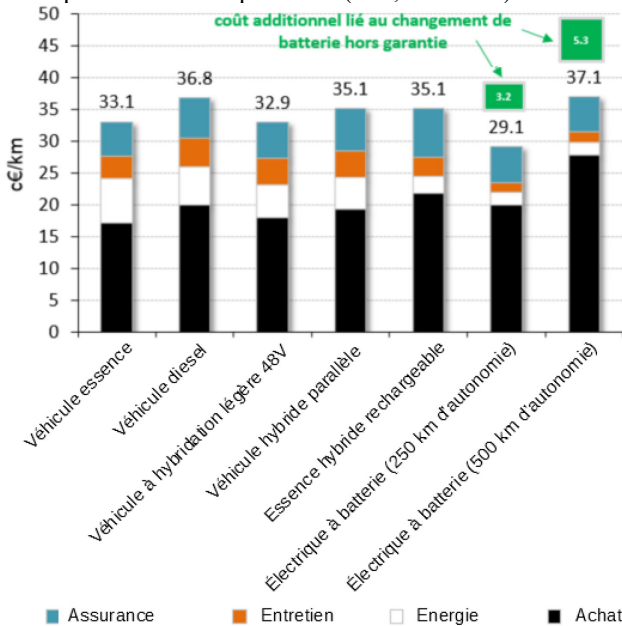


Figure 7 : Comparaison des TCO de véhicules de segment C en 2030 sur le cycle WLTC [2]

Le véhicule hybride rechargeable, intéressant écologiquement, est peu compétitif actuellement du fait du coût des deux motorisations et de la batterie. Arrivent

sur le marché des hybrides rechargeables moyenne gamme (Renault Captur, Kia Niro) avec des moteurs thermiques plus petits (90 ch pour le Captur) et des tarifs pour l'instant encore supérieurs à 30 000 euros.

La course à l'augmentation de l'autonomie pour les véhicules à batterie est un point souligné par l'étude, du point de vue des émissions de GES qu'elle engendre mais aussi du point de vue de la rentabilité de la solution.

3.3. Bus

Compte tenu des profils de sollicitation (nombreux arrêts et redémarrages), l'hybridation apporte des gains en consommation substantiels par rapport à une motorisation conventionnelle, de l'ordre de 40%.

Le bus avec une batterie de taille limitée, en considérant un changement de batterie pendant la vie du véhicule, sera compétitif en 2030. Actuellement, les bus électriques sont plus des outils de validation pour les constructeurs et de communication pour les mairies.

Le TCO ci-dessous des bus électriques intègre l'installation d'une prise de charge.

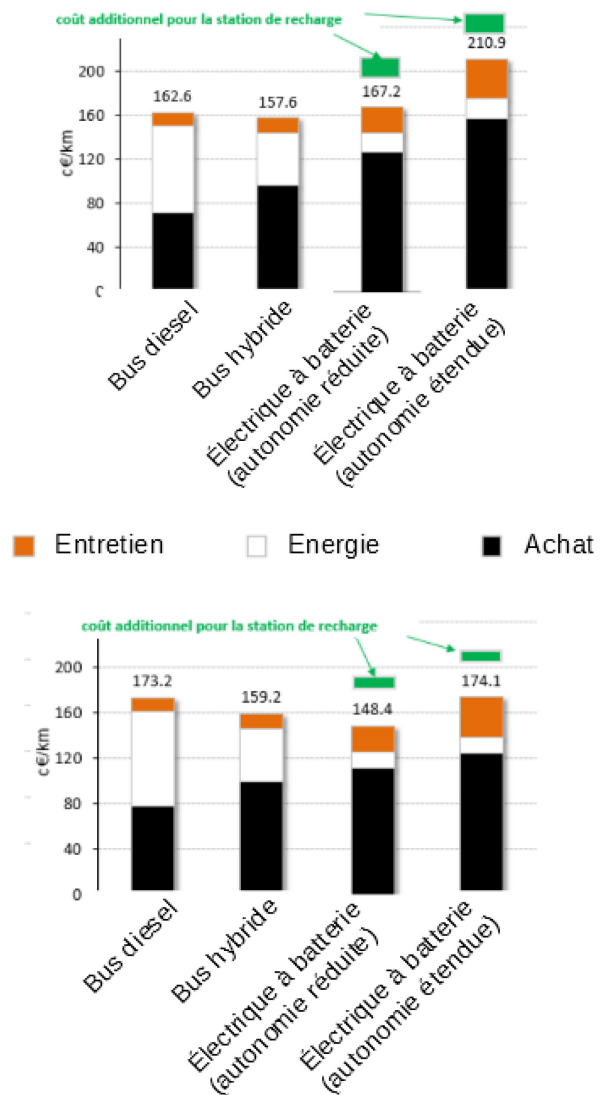


Figure 8 : Comparaison des TCO de bus en 2015 (en haut) et 2030 (en bas) sur le cycle parisien [2]

3.4. Utilitaires – Camions

Comme évoqué dans la partie précédente, seuls les camions de livraison urbaine peuvent bénéficier d'avantages liés à l'électrification. Le profil d'usage étant très différent entre un camion de collecte des ordures ménagères, au profil similaire à celui d'un bus, et un camion roulant principalement sur autoroute.

Ajoutons simplement 2 remarques :

- Le fort coût de la batterie et des frottements aérodynamiques importants à haute vitesse font que le retour sur investissement est très difficile actuellement mais pourrait devenir intéressant à partir de 2030.
- Le temps de « charge rapide » de plusieurs heures d'un tel véhicule avec les technologies actuelles, en dehors de la nuit, serait inacceptable économiquement avec les technologies actuelles. Cela reste une perspective à long terme.

4. Le réseau électrique est-il dimensionné pour la charge de millions de véhicules électriques ?

La forte progression annoncée du véhicule électrique dans le parc automobile pose la question de la possibilité pour le réseau électrique de fournir la puissance et l'énergie nécessaire pour la charge de ces véhicules.

Cette partie s'appuie principalement sur le rapport « Impact du développement des mobilités propres sur le mix énergétique » de la commission de régulation de l'énergie (CRE).[4]

RTE (Réseau de transport de l'électricité) élabore des scénarios avec 3,5 à 5,6 M de véhicules électriques (BEV, PHEV) en 2035.

4.1. Quel impact sur la consommation d'énergie électrique ?

5 Millions de véhicules effectuant un trajet moyen de 50 km à 10 kWh/100km demandent donc quotidiennement 5 kWh chacun, soit 25 GWh. Cela correspond à moins de 2 % de l'énergie électrique produite par jour en France en hiver, période la plus tendue. Les évolutions du logement et le réchauffement climatique permettent au réseau (à énergie installée) équivalente d'appréhender sereinement cette surconsommation en énergie.

L'étude de la CRE montre qu'un développement rapide du nombre des véhicules électriques amène à une stabilisation de la demande annuelle en énergie.

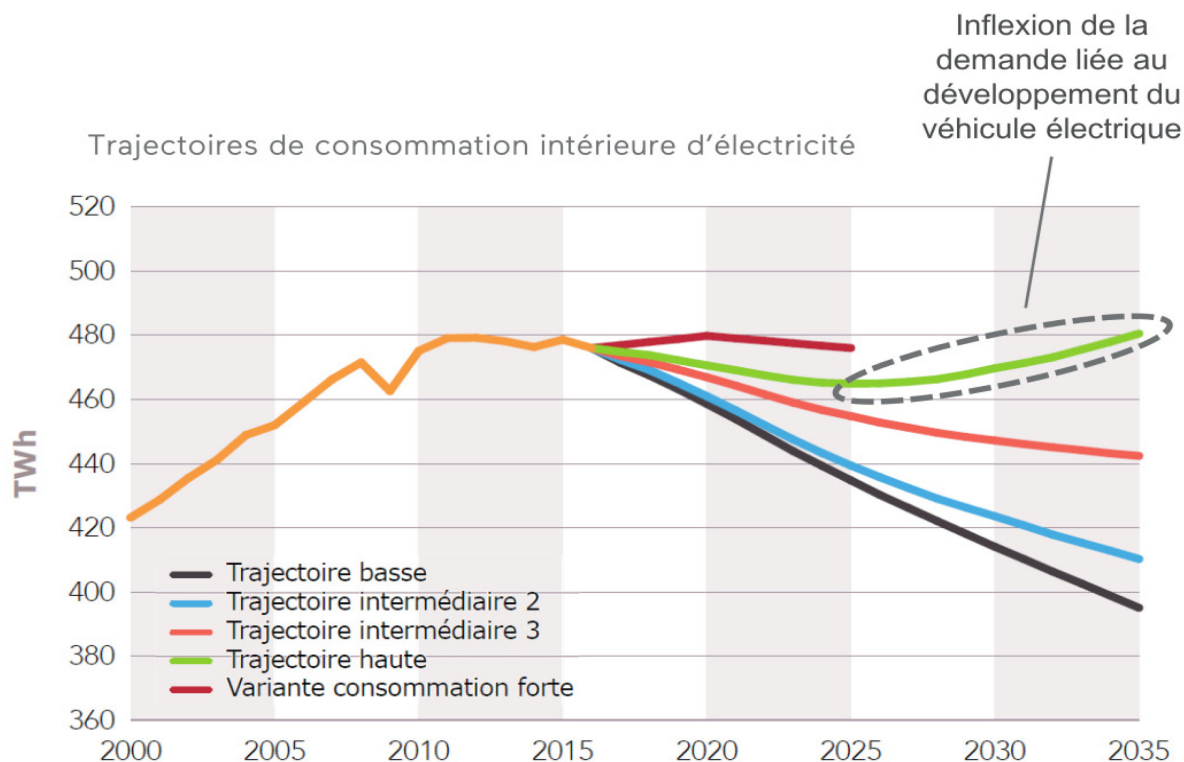


Figure 9: Évolution prévisionnelle de la trajectoire de consommation annuelle d'électricité [4]

4.2. Quel impact sur les pics de consommation ?

Si la quantité d'énergie à fournir par le réseau électrique est envisageable, le moment où fournir cette énergie est plus problématique. Les modèles montrent que la majeure partie de la charge des véhicules est prévue au domicile des particuliers. Hors, le retour à domicile des particuliers entre 18h et 20h est déjà le moment du pic de consommation problématique pour EDF/RTE (maximum historique à 19h le 8/2/2012 : 102 GW pour environ 100 GW de puissance pilotable installée).

5 Millions de véhicules en charge lente sur une Wallbox au domicile (7kW) cela représente 35 GW, puissance que le réseau ne peut fournir aux heures de pointe.

Le véhicule électrique deviendra « le premier appareil électroménager du foyer », jouant un rôle important dans la structuration de la demande. L'essor massif du nombre de véhicules électriques passera donc obligatoirement par des dispositifs de report de la charge des véhicules vers les heures creuses (nuit ou milieu de matinée). Ces dispositifs peuvent être des incitations financières ou des dispositifs techniques de communication entre le véhicule et le réseau (Véhicule To Grid V2G) qui seront détaillés le trimestre prochain.

Allant plus loin dans l'interaction Véhicule To Grid, l'étude « Le véhicule électrique dans la transition écologique en France », [3] consacre une partie complète à l'intérêt des véhicules électriques, comme systèmes de stockage, pour fournir de l'électricité au réseau pendant les pointes de consommation et ainsi faciliter l'intégration des énergies renouvelables.

Enedis a modélisé un fonctionnement acceptable à 1,5 GW de sur-consommation en jouant sur un report de 3h de la charge et a étudié la question des pics de consommation au moment des départs en vacances. Ce sera l'objet d'un article au trimestre prochain.

4.3. L'infrastructure est-elle géographiquement adaptée ?

En 2019, on recensait

- 63500 points de charge chez les particuliers,
- 85400 dans les entreprises.
- 27800 points de charge publics (dont 85 % en 22 kVA, qui correspond à un chargeur rapide). Sur les autoroutes, on comptait 600 points de charge 120 kVA, 1100 50 kVA et 550 43 kVA (source Enedis). Le réseau allemand Ionity a actuellement 30 stations de 4 chargeurs 350 kW sur des stations d'autoroute en France.

Pour la recharge quotidienne, les plus intéressés par les véhicules électriques (les habitants des villes) sont souvent les moins bien lotis pour installer un chargeur au domicile. En effet, le plus simple est de charger dans son garage... quand on en a un.

La loi tente de faciliter l'équipement des parkings collectifs : tous les immeubles nouvellement construits à partir du 01 juillet 2012 ont l'obligation de pré-équiper

au moins 10% de leurs places de stationnement et pour les immeubles plus anciens, un « droit à la prise » permet au locataire ou propriétaire d'installer un chargeur à ses frais dans les locaux collectifs.

Reste le cas des habitants n'ayant pas de parking privé, individuel ou collectif. Il faut alors compter sur le parking de l'entreprise si l'on s'y rend quotidiennement ou sur les bornes de recharges publiques en ville, encore peu nombreuses (200 bornes ex-autolib à Paris).

Hors usage domicile-travail, l'achat d'un véhicule électrique passe aussi par l'assurance de pouvoir le charger en un temps raisonnable (temps d'attente et temps de charge) sur les longs trajets :

- L'état joue ici un rôle majeur par les obligations et les aides financières à l'installation de chargeurs,
- La technologie apporte des solutions à ce besoin avec des chargeurs plus rapides et normalisés (voir article sur les chargeurs).
- Le réseau de distribution doit lui aussi s'adapter à ces demandes localisées de fortes puissances. (un article d'Enedis doit faire le point sur le sujet dans le numéro suivant).
- Précédant le besoin d'un foisonnement de chargeurs, de nouveaux acteurs apparaissent sur le marché. Wattpark (<http://www.wattpark.eu/>) propose aux particuliers d'installer un chargeur accessible au public devant chez eux, Air Bnb de la recharge comme ils se définissent.

Le nombre de chargeurs rapides sur les routes principales lors des départs en vacances est un point pour l'instant non résolu qui cantonne l'horizon du véhicule à batterie essentiellement aux trajets quotidiens bornés (voitures, bus, camions-poubelle), d'autant plus si l'on recommande des batteries de taille limitée. La solution pour les véhicules familiaux et les camions de livraison reste alors pour un temps encore l'hybride rechargeable.

5. Les ressources en matières premières sont-elles suffisantes pour un développement massif des véhicules électrifiés ?

Cuivre, lithium, cobalt, néodyme, dysprosium sont des matériaux en quantité beaucoup plus importantes sur un véhicule électrique que sur un véhicule thermique. La disponibilité des ressources et productions de la planète est régulièrement avancée comme un frein possible à l'essor du véhicule électrique.

Le BRGM, service géologique national, fournit une étude détaillée de la disponibilité de chacun de ces minerais classés d'importance stratégique forte à très forte.

5.1. Le cuivre

Un véhicule électrique contient 3 à 9 fois plus de cuivre qu'un véhicule thermique. Outre la croissance des immatriculations électriques, on observe l'essor des principaux moyens de production d'électricité à base d'énergies renouvelables (solaire et éolienne) qui, à puissance installée équivalente, nécessitent plus de

cuivre que les moyens de production carbonés (charbon et gaz). [6][8]

Près de la moitié des réserves mondiales sont situées en Amérique Centrale et en Amérique du Sud, principalement au Chili et au Pérou. Au Chili, le coût d'extraction augmente en raison de la nécessité d'utiliser l'eau de mer dans les mines Chiliennes pour préserver les réserves d'eau douces.

C'est pourquoi, d'après l'étude IFPEN (projet Generate), la marge de sécurité de l'approvisionnement en cuivre se situe ainsi à 17,3 % pour le scénario de référence (4°C de réchauffement climatique en 2100), et à moins de 4 % pour le 2nd scénario (2°C de réchauffement climatique en 2100 par un développement massif des énergies renouvelables) à horizon 2050. Des ressources supplémentaires sont identifiées, mais pour un coût économique et écologique d'extraction plus important. Le cuivre est ainsi classé en risque d'approvisionnement moyen par le BRGM.

5.2. Le lithium

Le lithium est avec le cobalt le matériau essentiel à la fabrication des batteries des véhicules électriques modernes. Plus de la moitié des réserves répertoriées sont situées en Amérique du Sud et la Bolivie, attachée à développer seule sa propre filière lithium, n'a pas commencé son extraction. Les salars contenant ce matériau sont de plus des zones très touristiques et désertiques alors que l'eau est nécessaire à l'extraction ; ceci freine le développement des mines. [5][9]

Répartition des ressources mondiales de lithium

Sources : BGS 2016, Roskill 2016, SNL 2017

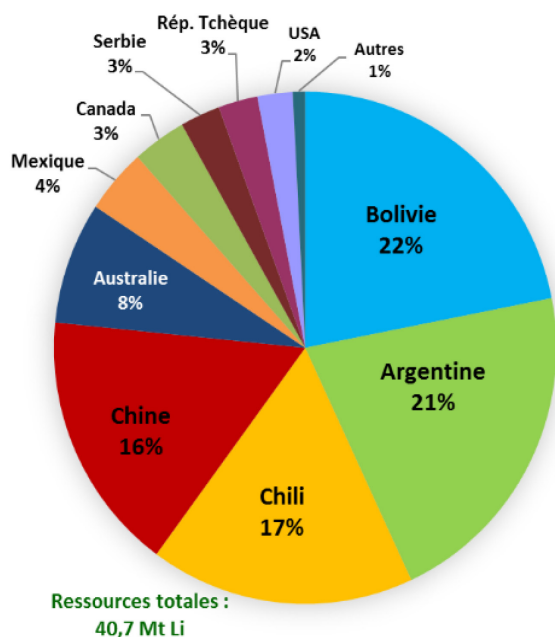


Figure 10: Répartition des ressources mondiales de lithium. [9]

Production minière de lithium en 2016

Sources : Roskill, USGS, Sociétés

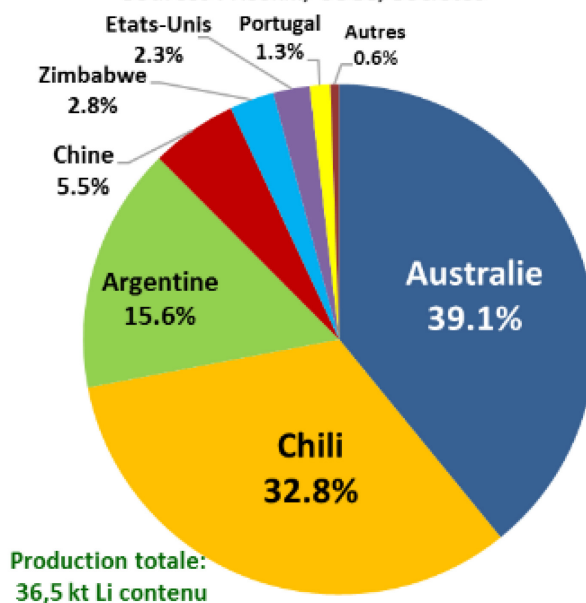


Figure 11: Production minière de lithium en 2016. [9]

Témoin des tensions sur la disponibilité du lithium, le prix est passé de 7 \$/kg en 2014 à 20 \$/kg en 2018.

La Chine, qui fournit à l'heure actuelle plus de 50 % de la demande mondiale en cathodes au lithium, représente aujourd'hui plus de 40% de la consommation mondiale.

Une hausse du coût du lithium permettrait de démarrer une filière de recyclage de ce minéral, filière aujourd'hui non rentable, ce qui atténuerait la pression sur la demande. Ainsi le lithium est classé par le BRGM en risque d'approvisionnement moyen.

5.3. Le cobalt

Deuxième matériau critique pour les batteries, la production de cobalt est régulièrement déficitaire face à la demande.

50 % de la production de cobalt est à destination du secteur des batteries. Actuellement plus de 65 % de la production est localisée en République Démocratique du Congo, pays dont la situation économique et politique est durablement instable. Le secteur minier fait de plus l'objet de dénonciations d'ONG sur le niveau de corruption, le travail des enfants et les conditions de sécurité. [10]

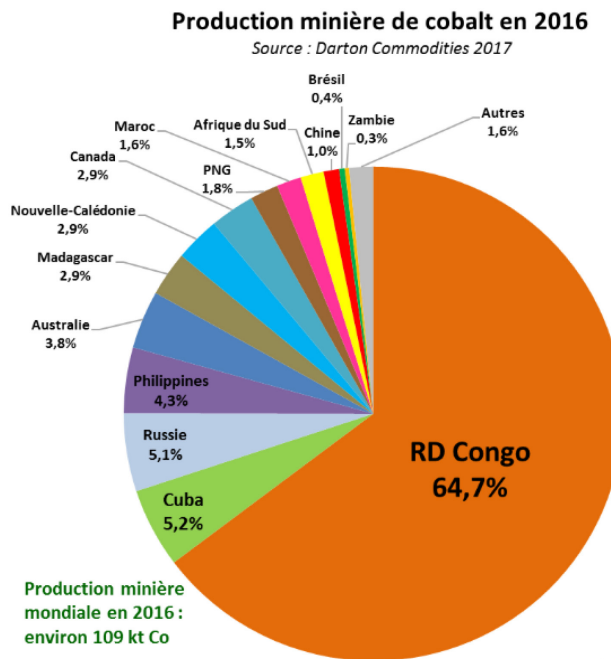


Figure 12: Production minière de cobalt en 2016 [10]

L'instabilité politique crée une instabilité sur les prix : 3 chiffres montrent l'envergure de la volatilité du cours : 21 k\$/t début 2016, 90 k\$/t en 2018 et 30 k\$/t actuellement

Accentuant la concentration des acteurs, 51 % du cobalt mondial est raffiné par la Chine.

Le cobalt est ainsi classé en risque d'approvisionnement moyen à fort par le BRGM. Des recherches sont menées pour diminuer la quantité de cobalt dans les batteries.

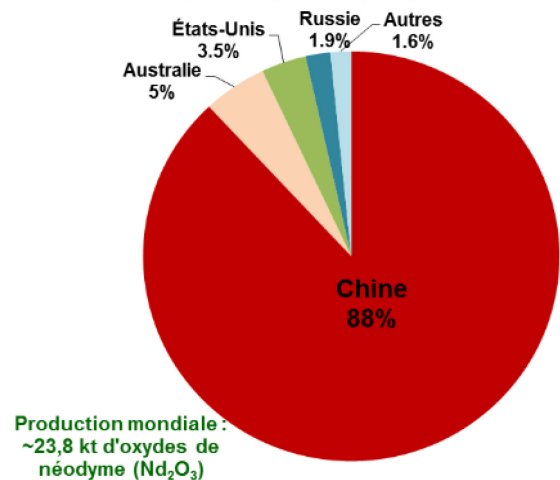
5.4. Les terres rares

Les terres rares sont des éléments nécessaires à la fabrication d'aimants permanents performants, composants clés pour des moteurs et alternateurs à forte densité de puissance. Les aimants Néodyme-Fer-Bore nécessitent comme leur nom l'indique du Néodyme (Nd) mais aussi du Dysprosium (Dy) en faible quantité pour améliorer la tenue en température des aimants. Les gros consommateurs d'aimants permanents sont l'éolien en mer pour limiter le poids des nacelles et ainsi la taille des mats et les véhicules électriques pour faciliter l'intégration du moteur, qui plus est sur un hybride rechargeable où le moteur électrique partage l'espace avec le moteur thermique, et limiter son poids.

Les terres rares ne sont pas rares, les réserves recensées donnant une visibilité de 50 à 500 ans suivant la croissance de la demande. La problématique est liée à la concentration des gisements exploitables à un coût raisonnable quasi exclusivement en Chine, pour le Néodyme comme pour le Dysprosium. [11][12]

Répartition de la production minière de néodyme en 2014

(Estimé d'après Roskill, 2015)



Répartition des réserves de néodyme

(Estimé d'après Roskill, 2015)

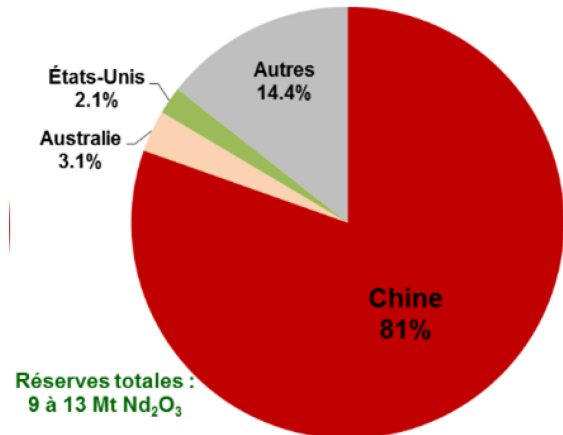
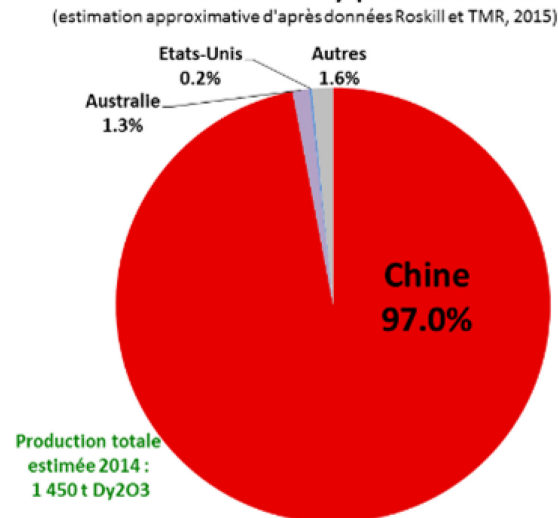


Figure 13: Répartition de la production et des réserves de Néodyme [11]

Production minière de dysprosium en 2014

(estimation approximative d'après données Roskill et TMR, 2015)



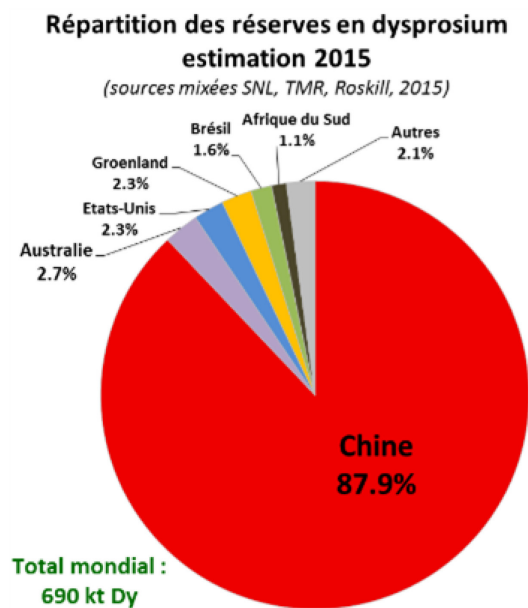


Figure 14: Répartition de la production et des réserves de dysprosium [12]

La Chine a en 2011 montré son monopole en jouant sur le cours des terres rares :

Néodyme : 25 \$/kg en 2010,
460\$/kg en 2011,
50\$/kg depuis 2016.

Dysprosium : 200 \$/kg en 2010,
3400 \$/kg en 2011,
250\$/kg depuis 2016.

Cette hausse subite des prix en 2011 a déstabilisé la filière des alternateurs comme des moteurs électriques. Renault a fait le choix de construire des moteurs plus lourds et plus complexes, sans aimants permanents et des recherches sont menées pour diminuer drastiquement la quantité de terres rares dans les moteurs à aimant permanent. (Voir article motorisations)

Le Néodyme comme le Dysprosium sont classés en risques d'approvisionnement fort par le BRGM.

6. Conclusion

Cette introduction a permis de montrer que le véhicule électrique en ville, le bus plus que la voiture, est une solution pertinente écologiquement et économiquement pour répondre en partie aux problèmes de réchauffement climatique et de pollution locale des agglomérations. Pour les véhicules extra-urbains, le coût, le poids et l'empreinte écologique des batteries ainsi que l'insuffisance du foisonnement des chargeurs rapides laissent présager pour plusieurs années encore un marché adapté aux véhicules hybrides, hybrides rechargeables ou au gaz pour les camions.

Les parts de marché des véhicules électriques et hybrides rechargeables, poussées par une

réglementation incitative, devraient donc continuer de grignoter voir dévorer celles des véhicules individuels thermiques si les infrastructures privées et publiques de charge répondent à la demande.

Les demandes des clients potentiels en termes de coût et d'usage (autonomie, temps de charge), et les contraintes d'infrastructure et d'approvisionnement en matériaux critiques vont continuer à orienter les innovations dans ce domaine.

Les constructeurs automobiles européens qui ont su rester leader pendant 100 ans sur ce marché extrêmement concurrentiels investissent massivement, incités par les pouvoirs publics et attisés par la concurrence de Tesla et des constructeurs asiatiques, pour proposer une offre pérenne, diversifiée, attractive et de qualité en véhicules électrifiés. Gageons que ces investissements vont continuer de faire progresser encore rapidement ces technologies.

Les articles suivants présenteront l'état de l'art et les perspectives nombreuses pour les années futures dans les domaines des motorisations, des batteries et des chargeurs ce trimestre et dans les domaines de l'infrastructure, des relations véhicules-réseau, de la charge sans contact, des architecture machines et de l'hydrogène le trimestre prochain.

Comme évoqué dans l'introduction, la technologie n'apporte qu'une solution partielle aux problèmes environnementaux qui devrait être complétée notamment par une réflexion sur la dimension sociale du véhicule : propriété individuelle du véhicule, occupation de l'espace urbain, transport en commun, mobilités douces,... ce qui sort de notre domaine de compétences.

Bibliographie :

- [1] Véhicules électrifiés : état du marché français, européen et mondial en 2018 et tendances pour les prochaines années, IFPEN, 25.02.2019
- [2] IFP Energies Nouvelles. Bilan transversal de l'impact de l'électrification par segment : PROJET E4T. ADEME. Avril 2018. Cet ouvrage est disponible en ligne www.ademe.fr/mediatheque
- [3] Le véhicule électrique dans la transition écologique en France, étude coordonnée par Marie Chéron, Fondation pour la Nature et l'Homme et Abrial Gilbert-d'Halluin, European Climate Foundation, novembre 2017
- [4] L'impact du développement des mobilités propres sur le mix énergétique, Comité de prospective de la Commission de régulation de l'énergie, juillet 2018.
- [5] Hache Emmanuel, Simoën Marine, Seck Gondia Sokhna, (2018). Electrification du parc automobile mondial et criticité du lithium à l'horizon 2050, 71p.

Cet ouvrage est disponible en ligne
www.ademe.fr/mediatheque

[6] Hache Emmanuel, Bonnet Clément, Simoën Marine,
Seck Gondia Sokhna, Cuivre : quel avenir pour
ce métal essentiel à la transition énergétique ?
2019

[7] Terres rares, énergies renouvelables et stockage
d'énergies, ADEME, novembre 2019

Les fiches de synthèse sur la criticité des métaux
et matières minérales sont disponibles sur le site
du BRGM :

<http://www.mineralinfo.fr/page/fiches-criticite>

[8] Fiche - Le cuivre - Janvier 2018 BRGM

[9] Fiche - Le lithium-décembre 2017, BRGM

[10] Fiche - Le cobalt - décembre 2017, BRGM

[11] Fiche - Le néodyme - Novembre 2015, BRGM

[12] Fiche - Le dysprosium - Août 2016, BRGM

[13] Prolongateur d'autonomie EP Tender :
<http://www.eptender.com/>

INFORMATION 3EI

La Journée 3EI 2020

JOURNÉE 3EI — 26 JUIN 2020

ENS PARIS-SACLAY

4, AVENUE DES SCIENCES
91190 GIF-SUR-YVETTE

*Le comité de rédaction de la Revue 3EI propose une journée d'échanges sur le thème de
la*

**PÉDAGOGIE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE
ET EN PHYSIQUE APPLIQUÉE**

LES SOLUTIONS ACTUELLES DE MOTORISATIONS POUR VÉHICULES ÉLECTRIQUES

XAVIER RAIN

xavier.rain@universite-paris-saclay.fr

IUT de Cachan, 9 Avenue de la Division Leclerc, 94230 Cachan

Résumé : Cet article propose un état de l'art des différentes technologies de motorisations équipant les véhicules tout électriques et hybrides actuels. Dans un premier temps, les caractéristiques requises pour un moteur électrique de traction sont présentées à partir de simulations basées sur le cycle de fonctionnement WLTP. Ensuite, les trois technologies de moteurs utilisées de nos jours seront successivement exposées. Pour chacune d'elles, leurs caractéristiques et les raisons qui ont motivés les constructeurs pour leur choix seront présentées, quelques exemples de moteurs existants seront ensuite détaillés, et pour finir, il sera expliqué très succinctement le principe de leur commande pour une application véhicule électrique.

1. Introduction

Le moteur électrique, élément clé de la chaîne énergétique d'un véhicule n'a cessé d'évoluer depuis "la jamais contente" de 1899 [1] jusqu'à nos jours. Les premiers véhicules électriques étaient pourvus de moteurs à courant continu à excitation séparée réglable. Ils ont été remplacés depuis la fin des années 1990 par des moteurs à courant alternatif, ceci grâce aux progrès réalisés en électronique de puissance et de commande. Par rapport à leurs prédécesseurs, ces moteurs sont beaucoup plus robustes, ont une puissance massique et volumique plus élevée, et un meilleur rendement.

Trois technologies sont actuellement utilisées. Ce sont les machines synchrones dites excitées au rotor, par des aimants permanents ou par des bobinages, et les machines à induction (ou asynchrones).

Dans cet article Nous commencerons par présenter les caractéristiques requises pour un moteur électrique dédié à la traction d'un véhicule, puis nous détaillerons chacune des trois technologies de motorisation.

2. Caractéristiques requises pour un moteur électrique de traction

Le moteur doit répondre à un besoin en puissance et en couple pour satisfaire au minimum le fonctionnement standard du véhicule. Cette standardisation est basée sur des cycles de fonctionnement normalisés. Depuis septembre 2018, le cycle WLTP nommé aussi WLTC (Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycles / Procedures) est le nouveau cycle d'homologation pour mesurer la consommation de carburant, l'autonomie électrique, les rejets de CO₂ et de polluants. Il remplace le cycle NEDC datant de 1973, et mis à jour en 1996. La figure 1 montre ce cycle, de classe 3 (pour les véhicules dont la puissance massique est supérieure à 34 W/kg, soit la majorité des voitures) [2].

Par rapport à son prédécesseur, il reproduit plus fidèlement le fonctionnement réel d'un véhicule.

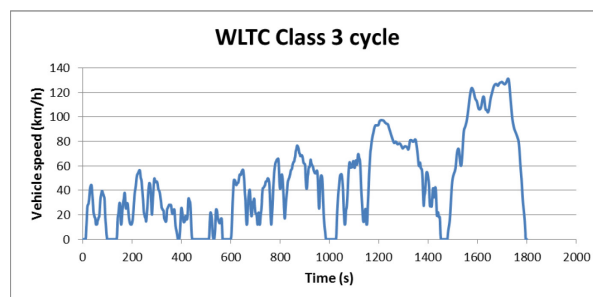


Figure 1 : cycle WLTP classe 3

Il est alors intéressant de connaître quel est le besoin en couple et en puissance à la roue motrice pour satisfaire ce cycle. Nous avons alors pris l'exemple de la Renault Zoé, dont les caractéristiques permettant de calculer ces grandeurs sont connues [3]. Grâce au logiciel Matlab-Simulink, nous avons alors rentré le cycle WLTP classe 3 et, à partir des équations mécaniques classiques, nous avons calculé le couple et la puissance mécanique à la roue. La figure 2 montre les résultats.

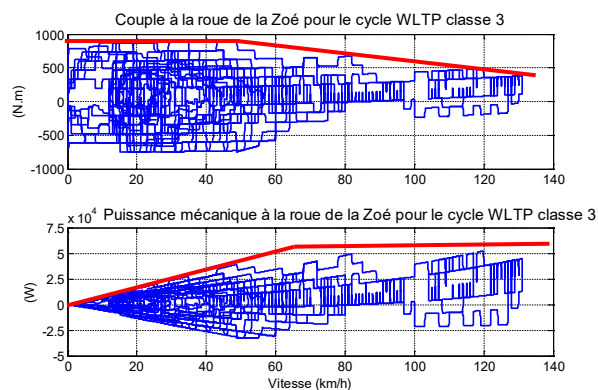


Figure 2 : Couple et puissance mécanique à la roue de la Zoé pour le cycle WLTP classe 3

Les courbes enveloppes de ces caractéristiques montrent qu'un couple d'environ 900 N.m est requis de 0 jusqu'à 50 km/h, et qu'une puissance mécanique

d'environ 52 kW est requise d'environ 70 km/h jusqu'à la vitesse maximale de 130 km/h.

Il y a donc une zone à basse vitesse où un couple important doit pouvoir être délivré, suivie d'une zone où la puissance mécanique maximale doit pouvoir être fournie. Le couple maximal et la puissance maximale à la roue seront en pratique plus élevées que les valeurs issues du cycle WLTP. En effet, le couple maximal à la roue est déterminé par des considérations de démarrage en côte à charge maximale, et la puissance maximale à la roue l'est pour garantir une certaine capacité d'accélération à toute vitesse lors des dépassements.

Les moteurs électriques utilisés pour la traction répondent parfaitement à ces caractéristiques, comme le montre la figure 3 [4].

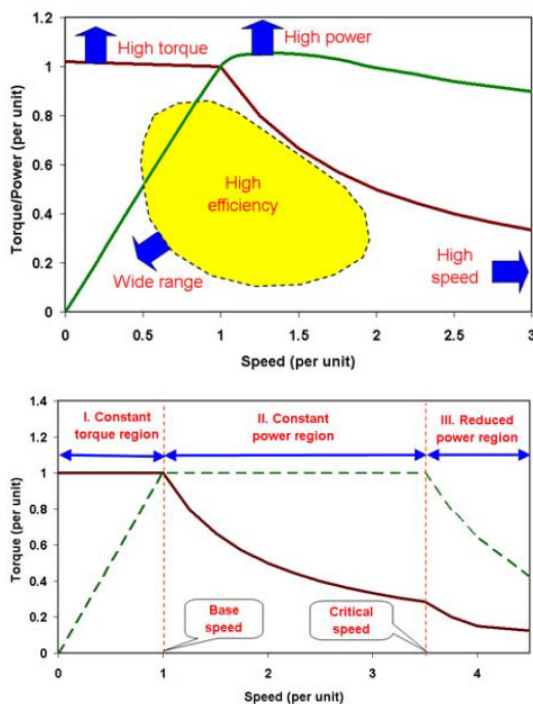


Figure 3 : Caractéristiques requises pour un moteur électrique de traction [4]

Ils peuvent délivrer un couple important constant de l'arrêt jusqu'à une vitesse appelée vitesse de base, puis une puissance mécanique maximale constante sur une certaine plage de vitesse, qui correspond à la zone dite de défluxage. Selon les moteurs, il existe parfois une troisième zone où la puissance mécanique maximale ne peut plus être maintenue constante (cas notamment des moteurs à induction).

Il est donc possible, contrairement aux moteurs thermiques, de coupler le moteur électrique aux roues seulement avec une transmission à rapport de réduction fixe afin d'adapter le couple et la vitesse. C'est la solution utilisée actuellement par quasiment tous les constructeurs, car elle est économique.

Mais il est techniquement tout à fait possible de mettre une boîte de vitesse à faible nombre de rapports entre les roues et le moteur. L'équipementier Allemand ZF en a développé une à 2 rapports pour véhicules

électriques [5]. Il y a plusieurs intérêts pour cette transmission :

- 1- cela permet de sous dimensionner le moteur en couple car le premier rapport, utilisé à basse vitesse, permet de récupérer le couple nécessaire à la roue. Le moteur est ainsi plus léger, plus compact et moins coûteux.
- 2- la largeur de la plage de vitesse à puissance maximale constante du moteur peut être en théorie deux fois plus petite qu'aux roues grâce aux deux rapports. Le moteur peut ainsi être mieux optimisé lors de la conception.
- 3- les 2 rapports offrent un degré de liberté supplémentaire pour ajuster le point de fonctionnement du moteur dans le plan vitesse-couple. Sur un cycle de fonctionnement, cela permettrait de faire fonctionner le moteur plus longtemps dans des zones de meilleur rendement, et ainsi d'accroître le rendement énergétique sur cycle, et donc l'autonomie.

Les principaux inconvénients de la boîte de vitesse sont :

- 1- sa complexité mécanique, et donc son coût.
- 2- les "trous" à l'accélération lors du passage des rapports, ce qui casse l'impression de fluidité du véhicule électrique, agrément de conduite apprécié des utilisateurs.

Actuellement, cette transmission ne séduit donc pas les constructeurs, hormis Porsche pour sa supercar électrique : la Taycan [6].

Pour avoir des moteurs avec une bonne puissance massique (quelques kW/kg pour les moteurs conventionnels), il faut les faire tourner à grande vitesse, généralement supérieure à 10000 tr/min pour la vitesse maximale du véhicule. Actuellement, la technologie des rotors des moteurs et des réducteurs utilisés sur la plupart des voitures limite les vitesses maximales à moins de 20000 tr/min.

On attend aussi d'autres caractéristiques importantes pour un moteur de traction pour véhicules routiers : un bon rendement dans une zone la plus étendue du plan vitesse-couple, une bonne robustesse vis-à-vis des conditions climatiques et d'utilisation du véhicule, et un coût acceptable.

3. Les différentes motorisations actuellement utilisées

Dans cette partie, nous allons passer en revue successivement les trois types de moteurs : les moteurs synchrones à aimants permanents, les moteurs à induction et les moteurs synchrones à rotor bobiné. Pour chacun d'eux, nous exposerons d'abord leurs principales caractéristiques et les raisons qui ont motivé les constructeurs pour leur choix. Nous détaillerons ensuite quelques moteurs existants, et nous terminerons par une présentation très succincte du principe de leur commande pour une application véhicule électrique.

Ces moteurs sont dits conventionnels, car ils sont triphasés, et créent dans l'entrefer un champ magnétique radial tournant à répartition spatiale sinusoïdale. De plus, ils ont un stator de même type. Il est constitué d'un empilement de tôles ferromagnétiques isolées électriquement entre elles, et pourvues d'encoches dans lesquelles on vient loger des conducteurs. Le procédé de fabrication automatisé du stator et du rotor est parfaitement éprouvé depuis très longtemps.

3.1. Moteur synchrone à aimants permanents

Aujourd'hui, 93 % des moteurs de véhicules électriques sont à aimants permanents [7]. Ce moteur est plébiscité par la grande majorité des constructeurs, principalement pour deux raisons. La première est que l'excitation magnétique créée par les aimants ne consomme pas d'énergie. Le moteur possède donc naturellement un bon rendement, du moins sur une certaine plage de vitesse et de couple. Pour une autonomie donnée, cela permet de mettre une batterie de moindre capacité, donc moins chère et moins lourde. La deuxième raison est sa compacité. Pour un couple et une puissance maximales donnés, le moteur est plus léger et moins volumineux que les autres technologies.

La compacité du moteur est un critère de choix prédominant pour les véhicules hybrides, en raison de la place limitée pour loger une ou plusieurs machines électriques. Cela l'est moins pour un véhicule tout électrique.

Citons comme exemples quelques modèles très courants tout électriques ou hybrides pourvus de ce moteur (figure 4) [8] : la Nissan Leaf, la BMW i3, la Toyota Prius, la Kia e-Nrio et la Tesla modèle 3 (pour sa version propulsion). La Peugeot e208 (commercialisée à l'automne 2019), et la Volkswagen ID3 s'appêtant à être livrée en 2020, sont aussi équipées d'un moteur synchrone à aimants permanents.



Figure 4 : (haut) Nissan Leaf, BMW i3, (bas) Toyota Prius 4, Tesla Model 3

Pour avoir de bonnes performances, les aimants choisis sont de type terres rares. Ce sont des aimants à haute densité d'énergie constitués d'un alliage de Néodyme, de fer et de Bore (aimants Nd-Fe-B) qui est le plus utilisé dans les machines électriques. Ces aimants ont une induction rémanente et un champ coercitif élevés, comme le montre la figure 5 [9].

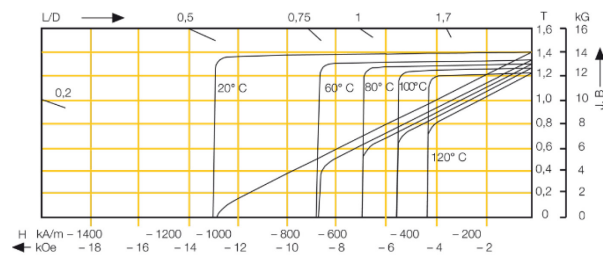


Figure 5 : Courbe de démagnétisation d'un aimant Nd-Fe-B en fonction de la température [9]

Une limitation de ces aimants est leur capacité à conserver leurs propriétés magnétiques à haute température. Pour améliorer la tenue en température, les constructeurs rajoutent une autre terre rare, dite lourde, telle que le dysprosium, ou le terbium qui est beaucoup plus chère que le néodyme, ce dernier étant une terre rare dite légère.

Les constructeurs occidentaux sont dépendant de la chine qui détient le monopole de la production des terres rares, et assure donc la dépendance de l'occident. Ils subissent une forte volatilité de coût comme le montre la figure 6, où en 2011, le prix du dysprosium a été multiplié par 12 par rapport au prix actuel [10].

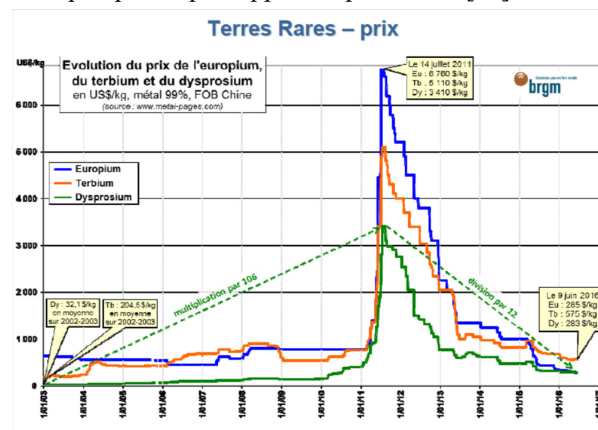


Figure 6 : Evolution du prix des terres rares lourdes [10]

Cela entraîne donc un coût de fabrication du moteur à aimants très fluctuant, et aléatoire. Aujourd'hui, le coût des aimants représente en moyenne 30 % du coût total du moteur.

Un des objectifs des concepteurs de moteurs à aimants est alors de réduire la masse des aimants, tout en maintenant les performances en termes de densité de couple, de rendement, et de tenue en température. Par exemple, au lieu de mettre du dysprosium dans tout le volume de l'aimant, il est possible, grâce à des modélisations, d'en mettre seulement dans certaines zones, qui sont les plus sensibles à la température et dont le risque de démagnétisation est le plus important [40].

Il existe plusieurs manières de disposer les aimants au rotor. La figure 7 illustre les différentes possibilités de positionnement de ces aimants [11]. Ils peuvent être montés à la surface du rotor (structures a, b, c) ou bien à l'intérieur du rotor (structures d, e, f, g). Ces dernières structures sont appelées IPM (Interior Permanent Magnet) et sont les mieux adaptées pour une application de traction électrique.

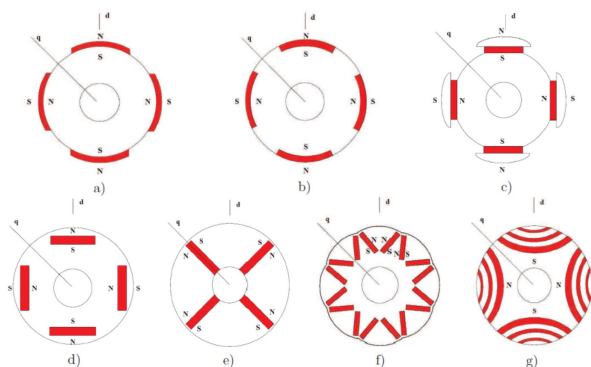


Figure 7 : Différentes typologies de machines synchrones à aimants [11]

En effet, par rapport aux structures à aimants en surface, les structures enterrées confèrent au moteur une bonne capacité de surcharge, et une grande plage de vitesse grâce à ses possibilités de défluxage [11] [12]. De plus ils présentent moins de risque d'être éjectés par la force centrifuge à haute vitesse, et ils sont moins sensibles à la démagnétisation. Pour finir, l'induction dans l'entrefer est plus élevée, contribuant à une meilleure compacité et un rendement amélioré.

Notons que la typologie g) correspond à une structure synchro-réductante assistée par des aimants permanents [13]. Les aimants, logés dans des encoches circulaires créant des barrières au passage du flux, permettent d'améliorer le rendement, le facteur de puissance et la plage de vitesse à puissance constante par rapport à une machine synchro-réductante pure. Elle a fait l'objet de beaucoup de recherche, mais ne se retrouve toujours pas actuellement dans les moteurs des véhicules.

Selon les constructeurs, la disposition et le nombre d'aimants diffèrent. Par exemple la figure 8 montre une tôle de rotor du moteur de la Nissan Leaf 2012 [14]. C'est un rotor qui a 8 pôles. Chaque pôle est créé par 3 rangées d'aimants formant une structure de type "nabla". Ces aimants sont logés dans des encoches à l'intérieur du rotor.

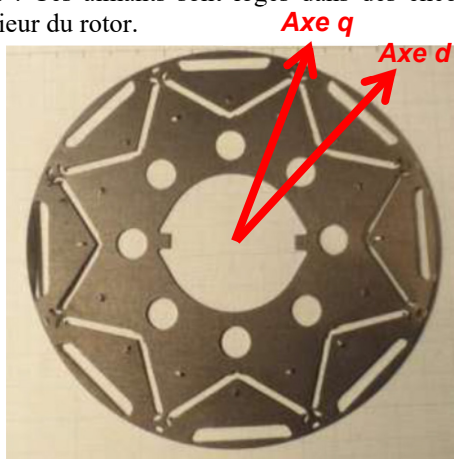


Figure 8 : Tôle rotorique du moteur de la Leaf 2012 [14]

La figure 9 montre le rotor à aimants de la Tesla model 3 [15]. Il y a 6 pôles et chaque pôle est formé par deux rangées d'aimants disposés en V. La puissance

maximale du moteur est de 211 kW. Ce moteur a intrigué et fortement impressionné les spécialistes qui l'ont démonté et examiné, car il est non seulement beaucoup plus puissant que ceux de la Chevrolet Bolt et de la BMW i3, mais il est aussi plus léger, plus petit, son rendement est supérieur et sa production serait moins onéreuse [16].



Figure 9 : Moteur à aimants de la Tesla model 3 [15]

Enfin la figure 10 montre le rotor du moteur de la BMW i3 en cours d'assemblage [17].



Figure 10 : Rotor du moteur de la BMW i3 en cours d'assemblage [17]

Le rotor a 12 pôles. Chaque pôle est réalisé à l'aide de deux couches d'aimants en parallèle sous la surface externe du rotor. A l'extrémité de chaque aimant sont rajoutées des trous permettant d'augmenter la saillance du rotor et de diminuer les pertes fer à haute vitesse [18].

Dans une machine synchrone, le couple électromagnétique total est la contribution de deux couples de natures différentes. Le premier, appelé couple hybride est dû à l'interaction entre le champ magnétique créé par l'induit (le stator) et le champ d'excitation créé par les aimants, ou les bobines de l'inducteur (le rotor). Le deuxième, appelé couple réductant est causé par une saillance rotorique. La saillance est la création de chemins privilégiés pour le passage du flux magnétique dans le rotor. C'est-à-dire que sur un tour complet du rotor, il y a alternance de chemins de faible réductance (passage du flux facile) et de chemins de forte réductance (passage du flux difficile). Lorsqu'il existe un champ magnétique d'induit fixe dans l'espace, le rotor, sans ses aimants, tourne et vient se caler dans une position telle que le flux magnétique résultant de l'alimentation des trois phases soit maximum.

On observe sur la figure 10 que l'axe d (axe d'un pôle inducteur) offre une réductance plus grande que l'axe q (axe inter pôles) car la perméabilité d'un aimant est proche de celle de l'air. Il s'ensuit donc une inductance d'axe d (L_d) plus faible que l'inductance d'axe q (L_q). On dit alors que le rotor présente une saillance inverse, contrairement à un rotor bobiné de moteur synchrone où la saillance est directe ($L_d > L_q$).

Dans une structure IPM, la contribution du couple hybride est prépondérante par rapport au couple réductant dans la création du couple total (environ 70 à 80 % selon les géométries). Lors de la conception du moteur, il y a alors un intérêt à renforcer la saillance afin d'augmenter le couple réductant, ce qui permet de diminuer le couple hybride, et donc la masse des aimants.

La figure 11 montre les courbes de couple et de puissance mécaniques maximales du moteur de la BMW i3 [19]. Le couple maximal est de 250 Nm entre 0 et 4775 tr/min. La puissance mécanique est de 125 kW, et reste quasi constante jusqu'à la vitesse maximale de 11500 tr/min. Cette possibilité de maintenir une puissance élevée sur une grande plage de vitesse est justement due à la structure du rotor à aimants enterrés, associée à un dimensionnement adéquat [12].

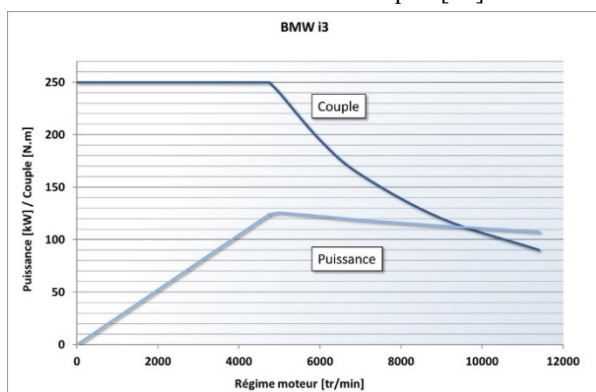


Figure 11 : Courbes de couple et de puissance mécanique maximales du moteur de la BMW i3 [19]

Ce moteur est alimenté par un onduleur de tension triphasé avec une tension batterie nominale de 360 V. Le refroidissement liquide du moteur est réalisé à l'aide de tubes en forme de spirale autour du stator [18] (figure 12). Le rotor ayant très peu de pertes, n'a pas à être refroidi, ce qui est aussi un avantage, par la simplicité du système de refroidissement.

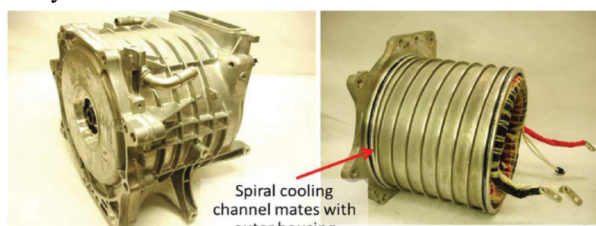


Figure 12 : Refroidissement du moteur de la BMW i3 [18]

Principe de la commande du moteur

Pour une application de véhicule électrique, le moteur est piloté en couple, c'est-à-dire que la sollicitation du conducteur par la pédale d'accélérateur définit le couple moteur requis. L'onduleur alimente le moteur par des courants asservis en amplitude et en phase grâce à la position du rotor qui est mesurée par un résolveur ou un codeur optique. Le moteur est dit autopiloté. Pour avoir de bonnes performances en termes de dynamique, précision de réglage, et gestion du défluxage, la commande vectorielle est traditionnellement utilisée. Il s'agit alors d'asservir 2 courants fictifs i_d et i_q dans un repère (d-q) lié au rotor.

On peut montrer que le couple électromagnétique s'exprime en fonction de ces 2 courants [20]. Pour imposer une certaine valeur de couple, il existe donc une infinité de valeurs (i_d - i_q) possibles, avec des contraintes de courant et tension maximales en sortie d'onduleur. La stratégie utilisée est de choisir le binôme (i_d - i_q) permettant de maximiser le rendement global moteur + convertisseur de puissance dans tout le plan vitesse-couple.

La figure 13 montre ainsi la cartographie de rendement du moteur de la BMW i3 [18]. On constate que le meilleur rendement est obtenu sur une plage de vitesse moyenne (entre 2500 tr/min et 9000 tr/min), et pour des couples plutôt élevés. C'est une caractéristique générale des moteurs à aimants. Pour des couples plus faibles le rendement baisse, et d'autant plus que la vitesse est importante. En effet, un problème du moteur synchrone à aimants est son mode de défluxage. Lorsque la tension maximale onduleur est atteinte pour la vitesse de base, la seule possibilité pour accélérer est d'augmenter la valeur absolue du courant i_d , sa valeur étant négative. Pour les faibles couples à haute vitesse, l'amplitude des courants reste donc importante, et ainsi les pertes Joule, ce qui contribue à faire baisser le rendement.

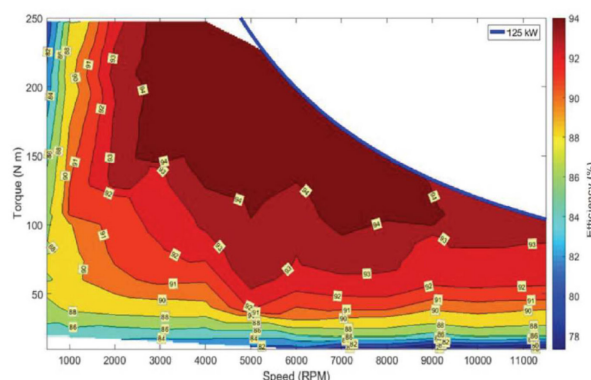


Figure 13 : Cartographie de rendement du moteur de la BMW i3 [18]

Nous constatons aussi que le rendement est moins bon à basse vitesse. Ceci est une caractéristique commune à tous les moteurs. Le rendement baisse (plus ou moins) lorsque la puissance n'est pas importante.

3.2. Moteur à induction

Ce moteur est avec les moteurs synchrones à rotor bobiné, et les moteurs à réluctance variable (synchro-réductant et double saillance), une solution alternative aux moteurs à aimants à terres rares. Plusieurs constructeurs ont fait ce choix, tels que le Californien Tesla, avec ses modèles S et X, ainsi que les constructeurs Allemands : Audi pour le SUV e-tron et Mercedes-Benz pour son nouveau EQC [21] (figure 14).



Figure 14 : Tesla model S P100D, Audi e-tron, Mercedes-Benz EQC 400 [21]

Quelques véhicules à vocation urbaines sont aussi pourvus de moteurs à induction, tels que le Renault Twizy, la Mia, et des Tuk Tuk électriques pour le tourisme (figure 15) [22].

Ce moteur est aussi choisi pour certains véhicules de transport routiers. Par exemple le bus électrique eCitaro de Mercedes-Benz (figure 16) [23].



Figure 15 : Renault Twizy, Mia, Tuk Tuk électrique [22]

L'essieu arrière du eCitaro est doté de moteurs montés sur les moyeux des roues. Chacune des roues de cet essieu portique électrique porte un moteur asynchrone refroidi par eau. Chaque moteur développe 125 kW, soit une puissance totale de 250 kW, pour un couple de 2 x 485 N.m départ arrêté



Figure 16 : Bus électrique Mercedes-Benz eCitaro [23]

Les avantages du moteur à induction sont les suivants :

- conception simple, coût de fabrication faible et stable, expérience de sa fabrication en série
- bonne robustesse mécanique du rotor, grandes vitesses de rotation entraînant une puissance massique assez élevée
- Le rotor peut accepter des températures élevées (pas d'aimants donc pas de risques de démagnétisation)
- Puissance continue importante, à la condition d'avoir un refroidissement performant

- pas de pertes lorsque l'alimentation est coupée
- meilleure robustesse vis-à-vis de la défaillance du convertisseur de puissance.

Ses inconvénients sont les suivants :

- rendement maximal moins bon que le moteur synchrone à aimants à cause des pertes Joule au rotor, et dans une zone plus restreinte du plan vitesse-couple
- plage de vitesse à puissance maximale constante limitée
- pertes au rotor difficiles à évacuer.

Les constructeurs Tesla, Audi, et Mercedes-Benz ont néanmoins choisi ce moteur car il est bien adapté pour le cahier des charges de leurs véhicules. Ce sont des véhicules dotés de grosses batteries (jusqu'à 100 kWh) donc de masse élevée (jusqu'à 2,5 t), ayant de très bonnes capacités d'accélération (0 à 100 km/h en moins de 5 s), et pouvant rouler à haute vitesse (jusqu'à 250 km/h). La puissance motrice maximale doit donc être très importante, ainsi que la puissance motrice devant être soutenue en régime continu. La transmission mécanique étant à rapport de réduction fixe, pour la vitesse maximale du véhicule, le moteur doit pouvoir tourner à un régime très élevé (jusqu'à 18000 tr/min).

Pour ces caractéristiques, le dimensionnement d'un moteur synchrone serait d'un coût beaucoup trop élevé. Le choix du moteur à induction est de plus renforcé par le fait que le rendement sur cycle de l'ensemble moteur + convertisseur est un critère de second rang, dû à la capacité importante des batteries et la possibilité de les charger à très forte puissance (jusqu'à 200 kW).

Tesla a donc développée pour ses modèles S et X un moteur à induction de forte puissance avec une densité de couple élevée, et équipé d'un rotor à cage en cuivre coulé sous pression [14] (figure 17). L'entreprise hérite de toute l'expérience accumulée dans le passé dans la conception de ces types de moteurs pour l'EVI de General Motors [24], le tzero de l'entreprise "AC Propulsion" [25], et le Tesla roadster de première génération [25]. L'intérêt d'un rotor à cage en cuivre par rapport à l'aluminium, métal le plus couramment utilisé, est sa plus faible résistivité, ce qui engendre moins de pertes par effet Joule au rotor. Par rapport à un moteur à cage aluminium, il est alors possible de diminuer les dimensions du moteur à rendement identique, ou d'augmenter le rendement à dimensions identiques, ou encore d'accroître la puissance continue à dimensions et rendement identiques. La contrepartie est sa plus forte masse et son prix plus élevé.

La figure 18 montre les courbes maximales de couple et de puissance mécanique de ce moteur [26]. Il peut développer un couple maximal de 600 Nm et une puissance maximale de 310 kW (pour les versions de véhicules avec des batteries de capacité importante). Au couple maximal, les courants de phase dépassent les 1000 A.

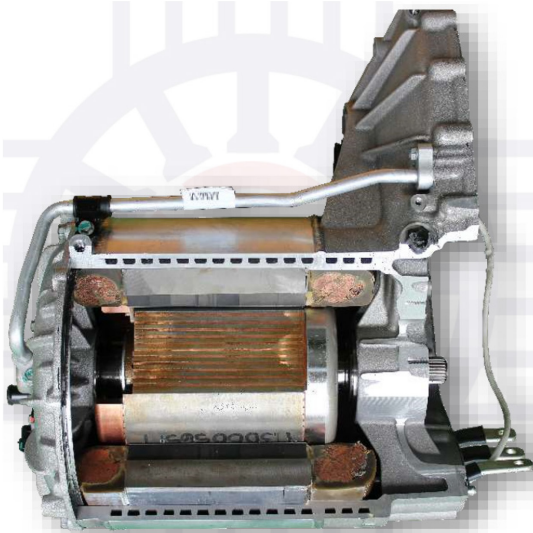


Figure 17 : Moteur à induction de la Tesla model S [14]
(Stator : OD = 254 mm ; SL = 152,6 mm)

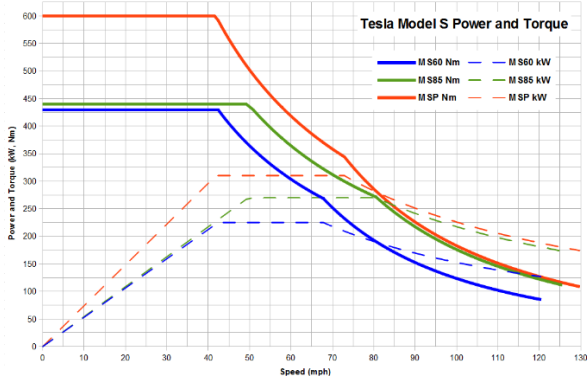


Figure 18 : Courbes enveloppes de couples et de puissance mécanique du moteur à induction de la Tesla model S [26]

Le refroidissement du moteur, très élaboré, est réalisé par circulation forcée de liquide dans le stator et dans le rotor au travers de l'arbre creux, ce qui permet d'extraire le maximum de pertes et contribue à augmenter la puissance en régime de fonctionnement continu. Il a fait l'objet de plusieurs brevets [27] [28] (figure 19).

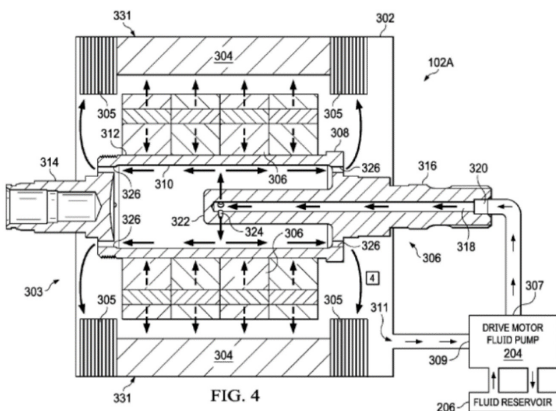


Figure 19 : Refroidissement liquide du moteur à induction Tesla [28]

Comme pour les Tesla modèles S et X, l'audi e-tron est équipée de 2 moteurs à induction, un sur chaque

train. La puissance peut donc être transmise à ces derniers en fonction des conditions d'adhérences et de la demande de puissance du conducteur. En condition de circulation normale, seul le moteur arrière fonctionne afin d'avoir un meilleur rendement global.

Le choix d'Audi pour ce moteur est clairement dicté par des considérations de puissances en régime continu assez importantes à tenir, en raison de la masse du véhicule, des possibilités d'accélération répétées, et d'un mode boost pendant 10 s.

La figure 20 montre le groupe motopropulseur Audi monté sur le train avant de l'e-tron [29].



Figure 20 : Groupe motopropulseur Audi APA250 [29]

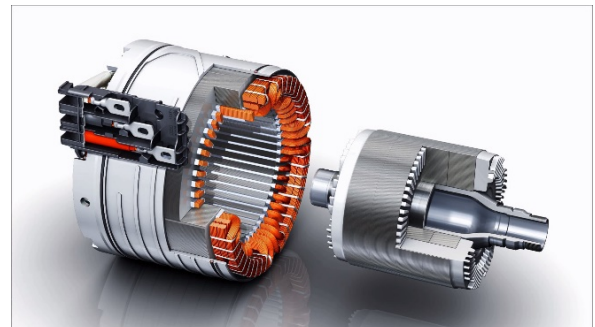


Figure 21 : Moteur Audi APA250 [30]

Ce groupe motopropulseur est constitué d'un moteur à induction à cage en aluminium (figure 21). Ses caractéristiques maximales de couple et de puissance mécaniques sont montrées à la figure 22. On peut noter une puissance en régime continu remarquable de 40 kW pour ce moteur dont le diamètre extérieur du stator est de 245 mm, et de longueur active 120 mm. Comme pour la Tesla, on constate aussi que la puissance maximale du moteur n'est obtenue que sur une plage de vitesse très limitée. Cela est dû au fait que le moteur est très poussé (puissance maximale très grande devant la puissance continue). Ainsi, dans la zone de défluxage, à partir d'une certaine vitesse, la courbe de couple rejoint la courbe enveloppe du couple de décrochage, qui lui diminue selon l'inverse du carré de la fréquence statorique. La puissance mécanique ne peut donc plus être maintenue constante.

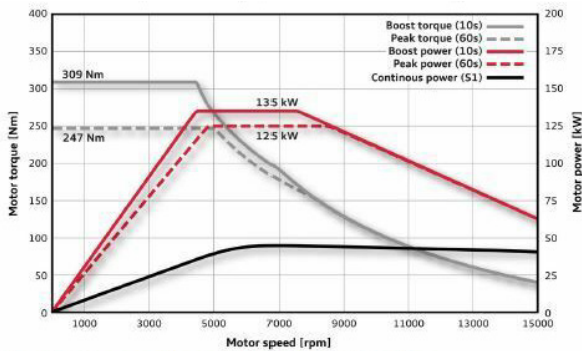


Figure 22 : Caractéristiques de couple et de puissance mécanique du moteur Audi APA250 [31]

De la même manière que Tesla, le constructeur a développé un système de refroidissement liquide du moteur très élaboré, avec circulation du fluide dans l'arbre du rotor et sur ses flasques (figure 23) [32] [33]. Cela contribue à augmenter la puissance soutenue en continu.

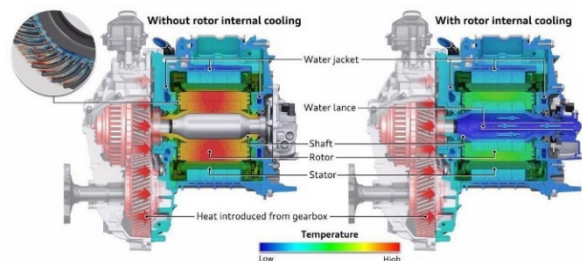


Figure 23 : Circuit de refroidissement du moteur Audi APA250 [32] et répartition de la température dans le moteur (avec et sans refroidissement interne du rotor) [33]

Le moteur à induction, avec son faible coût, peut être une solution intéressante pour le futur développement en masse (s'il a lieu) de véhicules à vocation urbaine, par exemple pour l'autopartage. En effet, ces véhicules doivent être économiques pour les collectivités, ils ne font qu'un faible kilométrage sur une journée et devront pouvoir être chargés à chaque station. L'efficacité énergétique du véhicule n'est donc pas, là aussi, le critère le plus important pour ce type de véhicule.

Le moteur à induction peut aussi être utilisé en complément de motorisation dans les véhicules tout électriques et hybride car dans certaines conditions il est plus avantageux que le moteur synchrone à aimants. Par exemple, la dernière version de la voiture hybride Toyota Prius est une 4 roues motrices (4 WD). Le train avant est motorisé par un moteur à essence couplé à 2 machines électriques synchrones à aimants permanents

(comme pour les versions antérieures), et le train arrière (figure 24) est équipé par un petit moteur à induction (5,3 kW/55 Nm) [34]. Ce moteur est utilisé pour le démarrage et pour le déplacement à faible vitesse en 4 roues motrices en conditions d'adhérence difficiles. Pour des vitesses plus élevées, seul le train avant fonctionne. Afin de limiter les pertes d'entraînement, et donc d'optimiser la consommation d'énergie, un moteur à induction n'engendrant pas de pertes magnétiques car non magnétisé lorsqu'il n'est pas alimenté, était préférable au moteur synchrone à aimants, qui lui engendre toujours ces types de pertes même lorsqu'il tourne à vide.

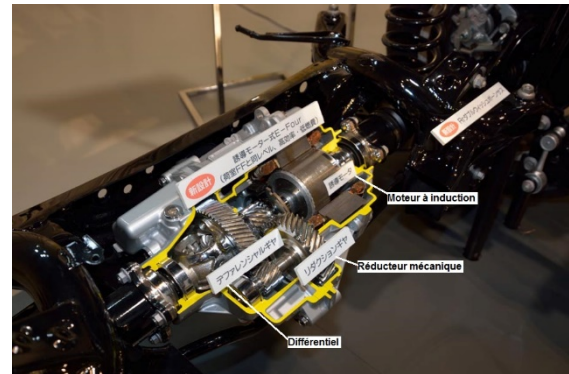


Figure 24 : Train arrière de la Prius 4WD [34]

Autre exemple, la Tesla modèle 3 en version "Dual Motor" est équipée d'un moteur synchrone à aimants sur le train arrière, et d'un moteur à induction sur le train avant (figure 25) [16].

Cela confère au véhicule les avantages des 4 roues motrices. La stratégie de commande des moteurs consiste à utiliser seulement le moteur arrière en fonctionnement normal (vitesse faible à modérée, besoin de puissance relativement limité, conditions d'adhérence normales) car celui-ci est plus efficace que le moteur à induction pour ce type de fonctionnement. Comme pour la Prius 4WD, le moteur à induction, non alimenté, est préférable au moteur à aimants. En cas de besoin supplémentaire de puissance, le moteur à induction est utilisé avec le moteur arrière.

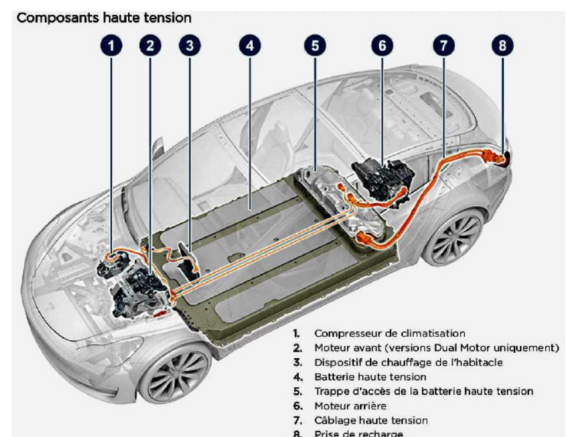


Figure 25 : Motorisation de la Tesla Modèle 3 dual motor [16]

De plus, pour les hautes vitesses, le moteur avant peut être plus efficace que le moteur arrière, à condition qu'il ait été bien optimisé pour ces vitesses. Ainsi, dans le cas où la puissance demandée n'est pas trop élevée, le moteur à induction peut fonctionner seul ou fournir plus de puissance que le moteur arrière, afin d'augmenter le rendement global de la batterie aux roues. Cette architecture qui combine deux technologies différentes de motorisation permettrait donc de rajouter un degré de liberté dans l'optimisation de l'efficacité énergétique du véhicule. Le moteur à aimants serait optimisé pour les basses et moyennes vitesses, et le moteur à induction, pour les hautes vitesses.

Principe de la commande du moteur à rendement maximal

Comme pour le moteur synchrone, le moteur à induction est alimenté par un onduleur de tension triphasé. La commande de l'onduleur permet d'imposer au moteur les courants statoriques en amplitude et fréquence afin de respecter les consignes de couple et de flux. La commande vectorielle à flux rotorique ou statorique orienté, associée à des observateurs permet d'obtenir de très bonnes performances, en termes de dynamique, précision de réglage et robustesse vis-à-vis des variations paramétriques du moteur, en particulier la résistance rotorique dans le cas d'une commande vectorielle à flux rotorique orienté.

En partant du schéma équivalent monophasé (valable uniquement en régime permanent) avec fuites magnétiques totalisées au stator, on peut démontrer que le couple électromagnétique dépend de 2 grandeurs : la valeur efficace du flux rotorique ϕ'_R et la pulsation des courants rotoriques ω_R . Pour imposer une certaine valeur de couple, une infinité de couples de valeurs (ϕ'_R, ω_R) sont a priori possibles, avec comme contraintes le courant maximal et la tension maximale (fixée par la tension de la batterie et la stratégie de modulation) en sortie d'onduleur. Il est donc possible de choisir le couple de valeurs permettant d'optimiser un critère. Pour les véhicules électriques, le critère privilégié est le rendement global moteur + convertisseur de puissance. A partir d'un modèle de pertes (calculées ou mesurées), il est alors possible de déterminer les paramètres de réglage optimaux afin de maximiser le rendement global pour tout point de fonctionnement dans le plan vitesse-couple. Le flux rotorique est alors ajusté en temps réel par la commande vectorielle pour être toujours au maximum de rendement. Pour une vitesse donnée, sa valeur optimale augmente à mesure que le couple augmente.

A titre d'exemple, la figure 26 montre la cartographie optimale de rendement du moteur (sans le convertisseur) de la Tesla model S [14]. On constate que la zone de meilleur rendement est située vers des vitesses moyennes à élevées et pour des couples moyens.

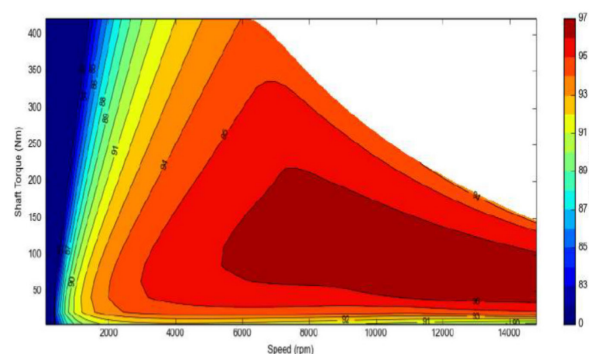


Figure 26 : Cartographie de rendement du moteur à induction de la Tesla model S [14]

Même avec la commande optimale, ce moteur est pénalisé par un rendement beaucoup moins favorable vers les basses vitesses, et d'autant plus que le couple est élevé. La raison principale est, qu'à basse vitesse et couple élevé, le glissement est important, ce qui fait chuter le rendement du rotor.

3.3. Moteur synchrone à rotor bobiné

Le constructeur Renault est aujourd'hui le seul à utiliser cette technologie. Ses motivations étaient dès l'origine liées à une volonté de ne pas dépendre du problème de coût et d'approvisionnement en terres rares. S'offrait alors à lui la possibilité de choisir trois technologies sans aimants. Les moteurs à induction et à réluctance variable n'ont pas été retenus à cause principalement de leurs rendements sur cycle et de leurs plages de vitesse à puissance constante moins bons que pour le moteur à rotor bobiné.

Le moteur synchrone à rotor bobiné n'avait jamais été utilisé auparavant pour des véhicules routiers. En traction électrique ferroviaire, Alstom est la seule entreprise qui avait développé ce moteur pour la locomotive BB26000 "Sybic" et le TGV Atlantique (8 moteurs de 1100 kW).

Parmi les avantages de ce moteur, on peut citer les points suivants :

- Moteur facilement défluxable, grâce au réglage d'un courant continu au rotor à l'aide d'un hacheur associé à une boucle de régulation de courant
- Plage de vitesse à puissance maximale constante très importante, possible en théorie de la vitesse de base jusqu'à la vitesse maximale
- Fonctionnement possible à facteur de puissance unitaire, ce qui permet de minimiser les courants de phase et donc de réduire le calibre en courant des transistors du convertisseur de puissance, ou de réduire ses pertes par conduction et par commutation
- Optimisation du rendement global moteur + convertisseur dans tout le plan vitesse-couple, grâce à 3 paramètres de réglage
- Bon rendement (> 95 %) dans une zone très large du plan vitesse-couple, ce qui permet d'obtenir un bon rendement global sur cycle WLTP

Comme pour les autres technologies, ce moteur est pénalisé par quelques inconvénients :

- Puissance et couple massiques et volumiques plus faibles que pour le moteur à aimants.
Remarquons que pour les véhicules tout électriques actuels, ceci n'est pas un gros problème car le groupe moto propulseur est de toute façon moins encombrant qu'un moteur thermique associé à sa transmission (embrayage + boîte de vitesse + différentiel). Cela n'est pas le cas pour un véhicule hybride, où la place disponible pour loger une machine électrique est beaucoup moins importante.
- Nécessité de refroidir le rotor à cause des pertes Joule dues à l'excitation.
- Vitesse maximale moins élevée que pour les moteurs à induction à cause des efforts centrifuges s'exerçant sur les bobines rotoriques.
- Moteur plus difficile à fabriquer, donc coût de fabrication plus élevé que pour les autres moteurs sans aimants.

Au début, Renault avait fait appel à l'équipementier Allemand Continental pour la motorisation des véhicules Fluence ZE, Kangoo ZE, et la Zoé de première génération (figure 27) [35]. Ces moteurs (nommés 5A Gen1 et 5A Gen2 pour la Zoé) étaient à refroidissement liquide, avaient une puissance allant de 44 kW à 70 kW selon le véhicule, et un couple maximal de 220 / 226 Nm. Ils étaient dotés d'un rotor à 8 pôles.



Figure 27 : Renault Fluence ZE, Kangoo ZE et Zoé [35]

La figure 28 montre le groupe moto propulseur Continental (ensemble moteur + transmission + convertisseur de puissance moteur + chargeur) équipé du moteur 5A Gen 1 [36].

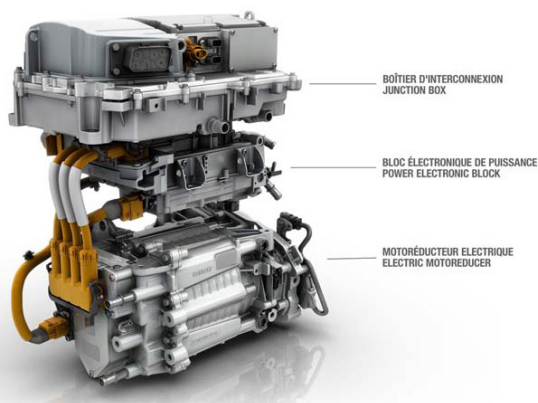


Figure 28: Groupe motopropulseur Renault-Continental et moteur 5A Gen1 [36]

La figure 29 montre les caractéristiques maximales de couple et de puissance mécanique du moteur 5A Gen2 de la Zoé [37]. La principale différence par rapport au moteur à induction est que la puissance maximale peut être maintenue constante sur une très large plage de

vitesse, et cela en ajustant convenablement les paramètres de réglage du moteur. C'est l'une des caractéristiques remarquables des moteurs synchrones à rotor bobiné.

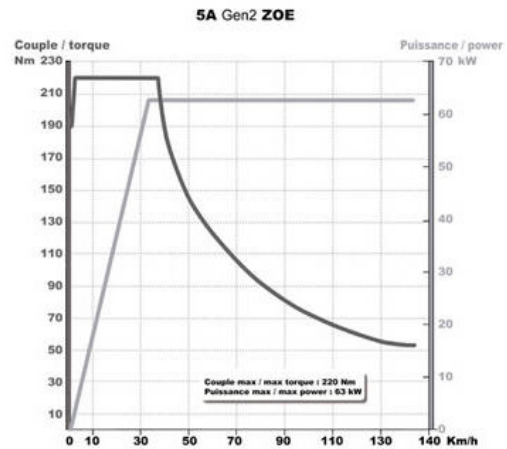


Figure 29 : Courbes enveloppes de couple et de puissance mécanique du moteur 5A Gen2 de la Zoé [37]

Suite de divers problèmes de fiabilité, Renault a décidé de concevoir et de construire son propre moteur dans les usines de Cléon (Normandie). Ce moteur, le 5A Gen3, équipe depuis 2015 tous les nouveaux véhicules électriques Renault (excepté le Twizy). Il aura nécessité environ 3 années de développement durant lesquelles le constructeur a consulté différents partenaires dont son allié Nissan qui fabrique déjà son propre moteur pour la Leaf.

Il y a eu plusieurs challenges afin de concevoir un moteur à la fois performant et robuste, tout en limitant les coûts de fabrication [38]. Renault a dû travailler particulièrement sur :

- le contrôle optimal du moteur afin de maximiser le rendement global moteur + convertisseur dans tout le plan vitesse-couple.
Remarque : la commande vectorielle de ce moteur est plus délicate que celle d'un moteur synchrone à aimants car il y a un couplage statique et dynamique entre les bobinages rotoriques et statoriques. Ainsi une variation de courant sur l'un des bobinages perturbe la régulation des courants des autres bobinages. Ce phénomène est entretenu par des imperfections telles que l'excentricité du rotor (très faible mais toujours présente), les harmoniques d'espace du stator et les non linéarités de l'onduleur
- le refroidissement du moteur, et particulièrement le rotor toujours beaucoup plus difficile à refroidir
- la mise au point du système bagues-ballais devant être robuste vis-à-vis des conditions climatiques variables, de la pollution et des vibrations. Un point clé du cahier des charges était que ce dispositif ne devait pas subir de maintenance sur la durée de vie prévue du véhicule (> 200000 kms)
- La tenue mécanique des bobines rotoriques à haute vitesse (12000 tr/min pour ce moteur)

- La technique de bobinage du rotor afin d'optimiser le coefficient de remplissage et l'échange thermique avec le circuit magnétique, et minimiser les contraintes mécaniques

Par rapport à son prédécesseur, ce moteur tétrapolaire est plus compact et plus léger, possède un meilleur rendement, et a un refroidissement interne par air forcé entre le stator et le rotor. Pour la Zoé dotée d'une batterie de 22 kWh, le simple changement de moteur a fait passer son autonomie de 210 kms à 240 kms sur cycle NEDC.

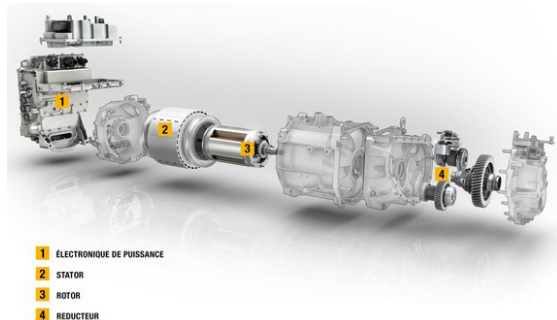


Figure 30 : Groupe moto propulseur Renault 5A Gen3 [37]

Les figures 30 et 31 montrent le nouveau groupe moto propulseur Renault 5A Gen3. Pour la dernière version de la Zoé, sortie en 2019 (la Zoé ZE50, pour une batterie de 52 kWh), il y a deux versions de ce moteur selon la puissance développée (80 kW / 225 Nm ou 100 kW / 245 Nm).



Figure 31 : Groupe motopropulseur Renault 5A Gen3 [37] et rotor bobiné 4 pôles

La commande en couple du moteur synchrone à rotor bobiné se fait à l'aide de 3 paramètres de réglage : la valeur efficace du courant statorique I_s , l'angle d'autopilotage ψ qui est le déphasage entre un courant de phase et la force électromotrice correspondante, et le courant d'excitation I_f dans le rotor (aussi appelé inducteur ou roue polaire). Pour la commande de moteurs, on préfère souvent travailler dans un repère (d-q) lié au rotor (axe d orienté sur l'axe du flux inducteur). Les trois courants statoriques i_{as} , i_{bs} et i_{cs} sont alors transformés en deux courants I_d et I_q (courants d'axes direct et en quadrature). Pour une vitesse donnée, il existe donc une infinité de triplets (I_d, I_q, I_f) permettant de satisfaire le couple demandé. L'idée, comme pour les autres moteurs, est de choisir, à partir d'un modèle de pertes, le triplet optimal permettant de maximiser le rendement global moteur + convertisseur de puissance dans tout le plan vitesse-couple. La figure 32 montre la cartographie de ces 3 paramètres de contrôle pour le moteur 5A Gen3 [38]. Comme pour le moteur à induction, la stratégie de commande à rendement maximal entraîne une augmentation du flux (mais ici réglé au rotor par le courant I_f) lorsque le couple

augmente pour une vitesse donnée. Le courant I_q augmente aussi avec le couple et son signe définit le mode traction/freinage du moteur. Quant au courant I_d , toujours négatif pour un moteur synchrone à rotor bobiné, il reste faible dans une large zone du plan vitesse-couple, et augmente fortement en valeur absolue pour de fortes puissances dans la zone de défluxage.

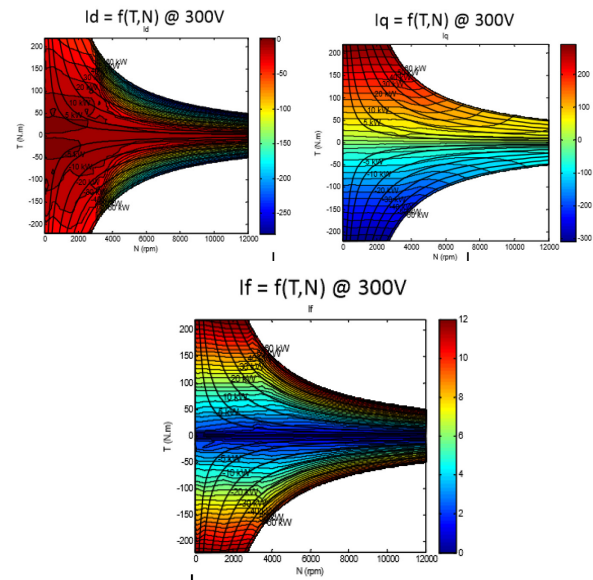


Figure 32 : Cartographie des paramètres de contrôle optimaux du moteur Renault à rendement maximal [38]

4. Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté de manière condensée les trois technologies de motorisation actuellement utilisées par les constructeurs automobiles. Elles sont basées sur des structures de moteurs conventionnelles, car éprouvées depuis très longtemps et dont les procédés de fabrication sont parfaitement maîtrisés, ce qui est pour l'industriel un gage de sûreté concernant la fiabilité et la maîtrise des coûts de fabrication. Néanmoins, il est toujours possible d'améliorer les performances de chaque type de moteur. Beaucoup d'innovations technologiques sont alors mises en œuvre, au niveau des matériaux utilisés, de la géométrie, du bobinage, du refroidissement. Les industriels travaillent donc dans l'amélioration de l'existant, sans véritables ruptures technologiques.

Nous avons pu mettre en évidence les différentes caractéristiques pour chaque type de moteurs. Actuellement, le moteur synchrone à aimants permanents fait quasiment l'unanimité des industriels, du fait principalement de son bon rendement et de sa compacité. En 2018, 4,3 millions de véhicules tout électriques et hybrides ont été vendus dans le monde. Ce nombre pourrait monter à 12,5 millions d'unités en 2025 et 32 millions en 2030 selon le cabinet Adamas, et qui table aussi sur un recours croissant aux moteurs à aimants. La demande en terres rares va donc augmenter et donc mécaniquement leurs coûts.

Il est donc important de développer en parallèle avec les moteurs actuels à aimants, d'autres technologies,

avec beaucoup moins ou sans terres rares. La part de ces technologies alternatives pourrait donc certainement progresser, avec par exemple la mise sur le marché de nouvelles machines dites synchro-reluctantes assistées d'aimants à faible densité d'énergie, bien connue des chercheurs [39].

5. Références

- [1] <https://www.usinenouvelle.com/article/jusqu-ou-ira-la-jamais-contente.N192726>
- [2] <http://www.car-engineer.com/fr/les-differents-cycles-de-conduite>
- [3] <https://www.planeterenault.com/UserFiles/files/doc/2%20Caract%C3%A9ristiques%20techniques%20Nouveau%20Renault%20ZOE.pdf>
- [4] Z.Q. Zhu and D. Howe. Electrical machines and drives for electric, hybrid, and fuel cell vehicles. Proceedings of the IEEE, 95 :746–765, 2007
- [5] <https://insideevs.fr/news/361000/zf-boite-vitesses-vehicules-electriques/>
- [6] <https://insideevs.fr/news/353772/porsche-taycan-boite-vitesses/>
- [7] <https://www.usinenouvelle.com/article/des-terres-rares-a-gogo-dans-l-auto.N913579>
- [8] <https://www.nissan.fr>
<https://www.bmw.fr>
<https://www.toyota.fr> https://www.tesla.com/fr_fr
- [9] <https://www.binder-magnetic.com>
- [10] https://www.brgm.fr/sites/default/files/dossier-actu_terres-rares.pdf
- [11] H. Dogan. Méthodologie de Conception des Machines Synchrones à Aimants Permanents - Application au Véhicule Electrique avec Chargeur Rapide Embarqué. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2013
- [12] B. Multon. Analyse des possibilités de fonctionnement en régime de désexcitation des moteurs à aimants permanents. Journal de Physique. III, 1995
- [13] W.L. Soong and N. Ertugrul. Field-weakening performance of interior permanent-magnet motors. IEEE Transactions on Industry Applications, 38(5) :1251–1258, 2002
- [14] D. Staton, J. Goss. Open Source Electric Motor Models for Commercial EV & Hybrid Traction Motors, 2017 – www.motor-design.com
- [15] https://cleantechnica.com/files/2018/05/ACTU_AL-Rotor-close-up-with-laminates-3.jpg
- [16] www.auto-innovations.com/site/dossier&dopp/tesla3model43gprint.html
- [17] <https://www.youtube.com/watch?v=wCg2sCV5HVM>
- [18] http://actes.sge-conf.fr/2018/articles/article_188270.pdf
- [19] <https://www.guillaumedarding.fr/technique-moteurs-electriques-7609409.html>
- [20] B. Multon. Les Machines Synchrones Autopilotées. Préparation à l'agrégation de Génie Electrique, ENS Cachan Bretagne, 1993-2010
- [21] <https://www.audi.fr/fr/web/fr/gamme/tron/audi-e-tron.html>
<https://www.mercedes-benz.fr/passengercars/>
https://www.tesla.com/fr_fr
<https://www.renault.fr>
<https://www.automobile-propre.com/breves/la-mia-va-ressusciter-en-hongrie/>
<https://www.mobiliteplus-transport.fr>
https://www.mercedes-benz-bus.com/fr_FR/models/ecitaro.html
<https://www.automobile-propre.com/gm-ev1-histoire>
<https://evannex.com/blogs/news/75692101-from-zero-to-model-s-how-ac-propulsion-was-a-catalyst-for-tesla-motors>
<https://electrek.co/2017/11/20/teslas-next-gen-roadster-technical-analysis>
Brevet Tesla Motors n° US 7489,057 B2. LIQUID COOLED ROTOR ASSEMBLY
Brevet Tesla n° US 2018 / 0091012 A1. ELECTRIC MOTOR HEATING / COOLING SYSTEM
<https://www.audi-mediacycenter.com/en/audiemediatv/video/audi-e-tron-components-e-engine-animation-4846>
<https://www.audi-mediacycenter.com/en/technology-lexicon-7180/drive-system-7227>
<https://www.motor-talk.de/bilder/der-e-tron-faehrt-anders-als-andere-audi-g79938458/e-tron-motoren-i209344531.html>
<https://www.audi-mediacycenter.com/en/audiemediatv/video/audi-e-tron-cooling-concept-e-motor-animation-4847>
<https://www.scoopnest.com/user/tsport100/1074050273318850560-audi-etron-electric-motors-with-rotor-internal-cooling-right-picturethis-is-what-ensures-high-contin>
<http://news.hybridlife.org/explication-du-systeme-e-four-de-toyota-prius-4-reduction-des-efforts-de-frottement>
<https://www.renault.fr/vehicules/vehicules>
<https://www.planeterenault.com/1-gamme/45-moteurs/5020-5agen1-ze-q90>
<https://www.planeterenault.com/1-gamme/45-moteurs/9816-5agen3-ze-r90>
T. Nguyen, Renault Guyancourt France. MAGNET FREE ELECTRIC MACHINES FOR AUTOMOTIVE POWERTRAINS. Journée 3EI, CNAM PARIS, 2016
https://www.researchgate.net/publication/306089169_Electric_Vehicle_Traction_Based_on_Synchronous_Reluctance_Motors
https://product.tdk.com/info/en/techlibrary/archives/techjournal/vol08_hal/index.html

LES BATTERIES

VALÉRIE SAUVANT-MOYNOT⁽¹⁾, FRANÇOIS ORSINI⁽²⁾, ANTHONY JUTON⁽³⁾

⁽¹⁾ Chef de département Electrochimie et matériaux - IFP Énergies nouvelles – Direction Physico-chimie et Mécanique Appliquées - Établissement de Lyon - 69360 Solaize

⁽²⁾ Advanced Engineering Batteries Technocentre RENAULT - Guyancourt

⁽³⁾ professeur agrégé de physique appliquée, ENS Paris Saclay, anthony.juton@ens-paris-saclay.fr

1. Introduction

Dans les débuts de l'automobile, un tiers des véhicules étaient électriques. Le 20^{ème} siècle a été celui du véhicule thermique. Aujourd'hui, essentiellement pour des problématiques environnementales (production de gaz à effet de serre et pollution locale en ville), le marché assiste au retour des véhicules électrifiés (véhicules électriques et véhicules hybrides rechargeables ou non) grâce aux progrès effectués sur les batteries.

Les batteries assurent le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique : la conversion réversible se fait grâce à des réactions électrochimiques. Les batteries Nickel-Cadmium (Ni-Cd) des premiers véhicules électriques (106 électrique des années 90, Kangoo dans les années 2000) ont été complétées par les batteries Nickel-Metal Hydrure (Ni-MH) dès 1997 (premières Toyota Prius hybrides au Japon) puis remplacées peu à peu par des technologies au lithium, avec les batteries Li-ion qui couvriront bientôt l'essentiel du marché. Le Ni-MH est toujours majoritairement utilisé pour les véhicules hybrides avec Toyota.

Rappelons les problématiques auxquelles doivent répondre les batteries d'un véhicule électrique :

- Coût,
- Sécurité – le véhicule électrique doit être aussi sûr qu'un véhicule thermique,
- Énergie massique, énergie volumique,
- Puissance massique, puissance volumique,
- Temps de charge,
- Durée de vie versus vie du véhicule,

Sécurité des approvisionnements (voir article d'introduction),

On pourrait ajouter à cela une faible auto-décharge et l'absence d'effet mémoire, inconvénients quasiment oubliés depuis l'arrivée des batteries Li-ion.

Cette invention majeure pour le développement des véhicules électriques a été saluée par l'attribution du prix Nobel 2019 en décembre dernier à Stanley Whittingham, John Goodenough et Akira Yoshino. Notons que d'autres scientifiques comme les français Michel Armand et Jean-Marie Tarascon auraient mérité de faire partie de la liste des lauréats, malheureusement limitée à 3 chercheurs [4].

La première partie de cet article s'attachera à expliquer le principe de fonctionnement de cette technologie, la seconde s'intéressera à la fabrication des cellules et la troisième fera un état de l'art des performances des batteries actuellement sur le marché. La dernière partie présentera les innovations envisagées pour les décennies à venir.

La pile à combustible associée à un réservoir d'hydrogène, souvent vue à court terme comme un prolongateur d'autonomie (range extender), ou à plus long terme comme une alternative potentielle aux batteries, sera présentée dans le prochain numéro.

2. Principe et caractéristiques d'une cellule Li-ion

La batterie Li-ion est composée d'un assemblage de cellules élémentaires connectées en série et / ou parallèle.

La terminologie Lithium-ion ne correspond pas directement à un couple électrochimique comme pour la technologie Nickel-Cadmium par exemple. Le Lithium est présent à l'état d'ions qui migrent pendant la charge/décharge et s'insèrent réversiblement dans les électrodes.

2.1. Énergie et puissance

On utilise aussi pour les batteries une grandeur nommée capacité, notée en Ah. Elle comptabilise la charge stockée dans la batterie (quantité d'électrons) : $1 \text{ Ah} = 3600 \text{ Coulomb}$.

L'énergie stockée dans une batterie de 100 Ah et de tension moyenne 300 V, est d'environ $300 \times 100 = 30 \text{ kWh}$.

Le régime de décharge est souvent exprimé en C/x, x étant la durée en heures de la décharge. Par exemple, une batterie de 100 Ah délivrera 100 A pendant 1 h, si on la décharge au régime de C/1.

Une batterie stocke de l'énergie pour fournir une puissance électrique à la demande. L'énergie est comptabilisée en kWh ($1 \text{ kWh} = 3600 \text{ kJ}$) et la puissance maximale que peut délivrer la batterie est donnée en kW.

En théorie, une batterie de 50 kWh peut fournir 50 kW pendant 1 h ou 10 kW pendant 5 h. L'énergie est habituellement mesurée à C/3 (décharge en 3h peu sévère). Cependant, même à un régime sévère de 1C (par ex 50 kW pour 50 kWh), l'écart par rapport à C/3, dû au rendement, reste faible. De plus, pour un VE il faut

prendre en compte le freinage récupératif, qui selon le profil peut faire gagner jusqu'à 10% d'énergie disponible. Donc une batterie de 50 kWh pourra bien restituer en moyenne 50 kWh.

2.2. Principe de fonctionnement du système Li-ion

La cellule de base de la batterie Li-Ion est constituée de différents composants [5] :

- deux électrodes (négative et positive) présentant une différence de potentiel, placées dans des compartiments séparés et reliées par un circuit extérieur,
- des collecteurs de courant supportant les électrodes, sous forme de feuillets métalliques d'aluminium (pour la positive), de cuivre (pour la négative) ; ces collecteurs étant reliés aux bornes,
- un électrolyte conducteur ionique : sel de lithium dans un solvant organique (non aqueux) permettant le déplacement des ions Li^+ .
- un séparateur poreux, permettant le passage des ions mais évitant le contact direct entre électrodes,
- un boîtier rigide ou souple pour contenir le système.

Le potentiel chimique du composé d'insertion de l'ion lithium à l'électrode négative est inférieur à celui du composé d'insertion de l'ion lithium à l'électrode positive. La tension théorique aux bornes d'une cellule Li-ion (en Volts) correspond à la différence de potentiel entre les électrodes positives et négatives à l'équilibre.

Pour la description du fonctionnement, nous considérerons une électrode négative en graphite et une électrode positive en oxyde de manganèse.

Lors de la charge, sous l'effet du courant délivré par un chargeur externe :

- Côté négative, les électrons qui arrivent permettent la réduction des ions lithium issus de l'électrolyte et leur insertion dans le graphite (lithié à pleine charge suivant la stœchiométrie LiC_6). La négative joue le rôle de cathode.
- Côté positive, l'oxyde de manganèse lithié s'oxyde, libérant des ions Li^+ dans l'électrolyte et des électrons dans le circuit électrique (rôle d'anode).

Lors de la décharge (spontanée), les réactions électrochimiques sont inversées : le lithium emprisonné dans le graphite à l'anode repart vers la cathode en oxyde de manganèse.

- Côté négative, l'oxydation conduit à la libération des ions Lithium dans l'électrolyte et des électrons partent dans le circuit électrique (rôle d'anode)
- Côté positive, la réduction de l'oxyde de manganèse sous la forme LiMn_2O_4 se produit,

consommant les ions lithium arrivant via l'électrolyte et les électrons arrivant via le circuit électrique (rôle de cathode).

La tension nominale d'un tel élément Li-ion s'élève à 3,6 V ou 3,7 V. La plage de température de service varie typiquement entre -20°C et 55°C . En dehors de cette plage, le fonctionnement reste possible, mais en-deçà de -20°C la puissance est fortement réduite, et au-delà de 55°C la durée de vie est fortement impactée.

2.3. Choix des électrodes

Il existe de nombreux matériaux d'insertion pour électrodes positives et négatives. Le choix des matériaux d'électrodes se fait en considérant les problématiques évoquées dans l'introduction : énergies volumique et massique, puissances volumique et massique, sécurité intrinsèque, la durée de vie et le coût. Les principales caractéristiques d'intérêt des matériaux sont : le potentiel redox par rapport au Lithium, les capacités spécifiques (Ah/kg, Ah/L), la stabilité, la cyclabilité, et le coût.

A l'électrode positive, communément appelée **cathode** (cas de la décharge), le coût prend en compte notamment le volume des ressources et les difficultés d'approvisionnement de certains éléments, fortes pour le Cobalt (voir article d'introduction). Les matériaux privilégiés à ce jour, dans les véhicules, sont les oxydes d'un mélange de Manganèse, Nickel, Cobalt, voire Aluminium.

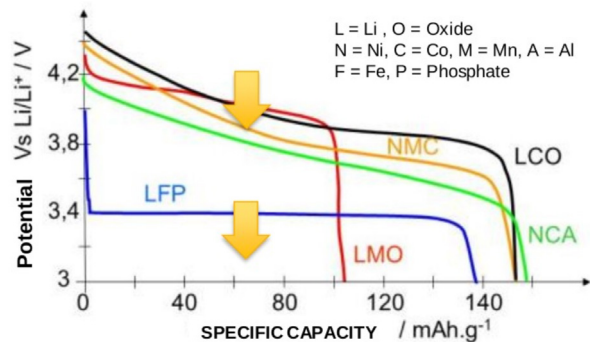


Figure 1 : comparaison des technologies de cathode.
Source Renault

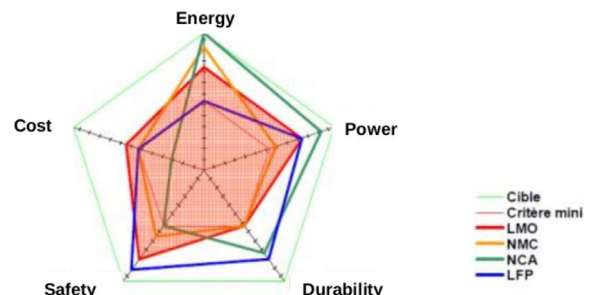


Figure 2 : comparaison des technologies de cathode.
Source Renault


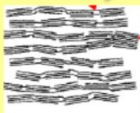

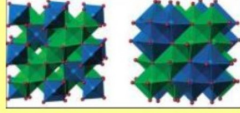
Natural / Artificial graphite	Soft Carbon	Hard Carbon	Titanate oxide (LTO)
+%Si? 	cristallinity 		
Large (reversible) capacity	Better chargeability but lower capacity	Low resistance but lower capacity	Good power & durability but lower energy

Figure 3: Différentes technologies d'anodes

Les cathodes Lithium-Fer-Phosphate, apparentées à la famille des polyanions, sont moins performantes mais sans cobalt et sans nickel. A ce jour, elles sont plutôt utilisées pour le stockage stationnaire et la micromobilité (vélos, trottinettes électriques...) et elles équipent de nombreux bus électriques chinois.

L'électrode négative communément appelée **anode** est généralement constituée de carbone. Le carbone est souvent utilisé sous forme de graphite, naturel ou artificiel, et l'électrode est optimisée pour maximiser la capacité massique/volumique tout en minimisant la résistance interne, afin de garantir une chargeabilité maximale. Une technologie alternative à base de titanate (voir Figure 3) existe, privilégiée dans les applications où une forte puissance de charge est requise, au détriment de la densité d'énergie. En effet, une cellule Li-ion dotée d'une telle électrode négative voit sa tension nominale réduite à 2,4 V – ce qui grève l'énergie de la batterie.

Des anodes de graphite intégrant du silicium (alliage entre Carbone et Silicium), qui permet d'accroître la capacité massique de l'électrode, sont également développées et intégrées depuis peu dans les batteries commerciales, et récemment utilisées dans les batteries Panasonic des VE Tesla model 3.

Le silicium est souvent introduit sous forme d'oxyde de silicium (SiOx), parfois sous forme de Si métallique (alliage Graphite/Si).

Enfin, les nanotechnologies proposent des perspectives intéressantes d'amélioration de la densité d'énergie et de puissance, avec les nanotubes de carbone pour les anodes, voire du graphène utilisable comme conducteur électronique.

Dans l'automobile aujourd'hui, deux tendances principales se dégagent :

- La plupart des fabricants de cellules pour VE développent des batteries à base de cathode **Nickel-Manganese-Cobalt (NMC)**. Initialement de stoechiométrie NMC111, le taux de Cobalt a été diminué grâce aux stoechiométries NMC622, voire NMC811. Le taux de cobalt pourrait encore être réduit avec des stoechiométries plus riches en Ni et pauvres en Co, sous réserve que stabilité et durée de vie restent assurées.

- Le constructeur Tesla, fabricant de cellules en partenariat avec Panasonic, développe des batteries avec des cathodes **nickel-cobalt-aluminium (NCA)**. Selon Tesla, la quantité de Cobalt est passée de 11 à 4,5 kg par voiture de 2012 à 2018. C'est également une technologie prisée par le fabricant de batteries SAFT.

Le séparateur est l'isolant électronique entre les électrodes, consistant en une membrane poreuse polymérique (Polyéthylène, Polypropylène,...), dans laquelle les ions Lithium (contenus dans l'électrolyte liquide, conducteur ionique) circulent librement d'une électrode à l'autre, lors de la décharge et la charge de la batterie.

2.4. L'électrolyte

L'électrolyte liquide assure la conductivité des ions lithium dans le séparateur et les électrodes. Il ne peut être aqueux compte tenu des potentiels chimiques des couples redox considérés. L'électrolyte est composé typiquement d'un sel de lithium (par exemple Li^+PF_6^-) dissout dans un mélange de solvants organiques formulé suivant l'application visée.

Lors de la première charge (cycle de formation), une couche mince nommée SEI (Solid Electrolyte Interface ou Solid Electrolyte Interphase) se forme entre l'électrolyte et l'électrode négative en graphite (produit de dégradation de l'électrolyte au contact de l'électrode négative). Cette SEI joue un rôle essentiel en stabilisant l'électrode de graphite tout en permettant l'insertion réversible des ions Li^+ .

A noter que les accumulateurs d'appellation commerciale « Lithium-ion-Polymère (LiPo) » sont une variante des batteries Li-ion où l'électrolyte liquide est gélifié par un polymère.

3. Fabrication d'une batterie Li-ion

- Pour parler de la fabrication des batteries Li-ion, il est important de distinguer :
- **Cellule Li-ion** = élément Li-ion = cellule élémentaire d'environ 3.6-3.7V de tension nominale,
- **Module** = assemblage de quelques cellules, souvent réalisé par le fabricant de cellules,

- **Pack** = Batterie complète : assemblage souvent réalisé chez le constructeur à partir de modules.

La fabrication d'une cellule Li-ion est un procédé complexe comprenant 3 étapes principales, pas forcément effectuées par le même acteur industriel. Les recherches sur les procédés visent à améliorer la qualité finale du produit, à réduire la quantité de matériaux utilisée, et à baisser les coûts de fabrication.

Une part importante de la valeur d'un véhicule électrique est issue de la fabrication de sa batterie. C'est pourquoi on observe actuellement de la part de l'union européenne et des constructeurs automobiles européens une volonté européenne d'aider à la création d'acteurs européens dans la fabrication des batteries et leur recyclage. [8]

Sont décrites ici les étapes principales de production d'une cellule : fabrication des électrodes, assemblage de la cellule et sa formation. Chacune de ces étapes peut varier d'un industriel à l'autre, d'ailleurs de nombreux brevets protègent les innovations d'un fabricant de son utilisation par ses concurrents.

L'assemblage de la batterie complète (encore appelé Pack) se fait ultérieurement, souvent chez le constructeur automobile, à partir des modules (pré-assemblage de cellules).

3.1. Fabrication des électrodes

La première étape regroupe les activités nécessaires pour fabriquer les électrodes (cf figure 4) :

1. La formulation et préparation par mélangeage d'une encre (matériaux actifs, percolants électroniques, liants, solvants)
2. L'application de l'encre sur le support métallique d'électrode, appelé collecteur, (une face puis l'autre ou double face)
3. Le séchage pour évaporer les solvants nécessaires à la formulation de l'encre
4. Le calendrage (« laminage ») de l'électrode pour atteindre l'épaisseur et la porosité cibles.

Cet enchaînement permet de produire des feuilles d'électrodes de l'ordre de 100 μm d'épaisseur.

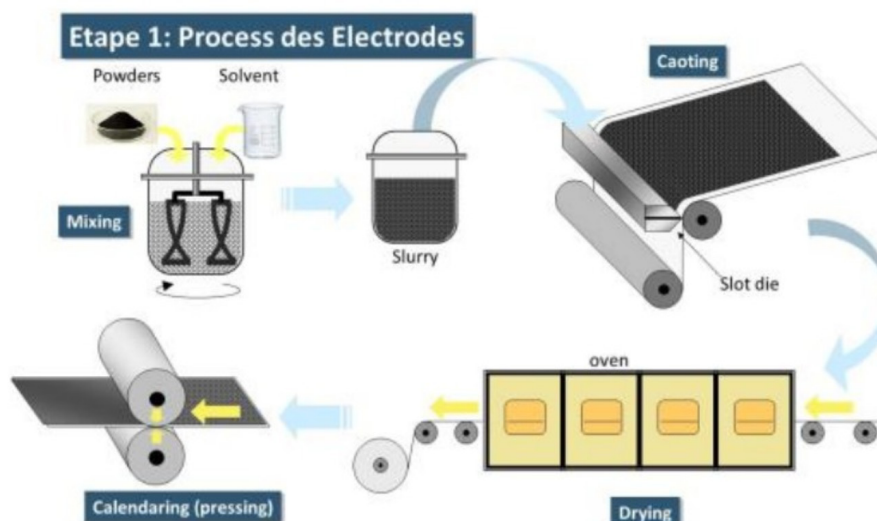


Figure 4: Process des électrodes Source Renault

3.2. Assemblage de la cellule

La seconde étape consiste à assembler l'électrode positive, l'électrode négative et le séparateur en couches (par ex 20-30 couches) pour former une structure de cellule de format parallélépipédique type boîtier métallique (« prismatique ») ou enveloppe souple métalloplastique (« pouch »), ou plus rarement de type spiralé dans un boîtier cylindrique (« cylindrique »).

Ces formats traditionnels sont obtenus en enchaînant (cf figure 5 pour l'exemple « pouch ») :

1. Le découpage de l'électrode

2. L'assemblage des principaux constituants : électrodes positive, négative et séparateur, où le positionnement des différentes couches doit être très précis. L'assemblage consiste soit à empiler les constituants (stacking), soit à les enrouler (bobinage)
3. La soudure des bornes sur les collecteurs (en Al pour la positive, en Cu pour la négative)
4. L'insertion dans le sachet souple
5. La scellée partielle du sachet
6. L'injection d'électrolyte suivie d'une extraction sous vide pour disperser l'électrolyte
7. La scellée complète de la cellule.

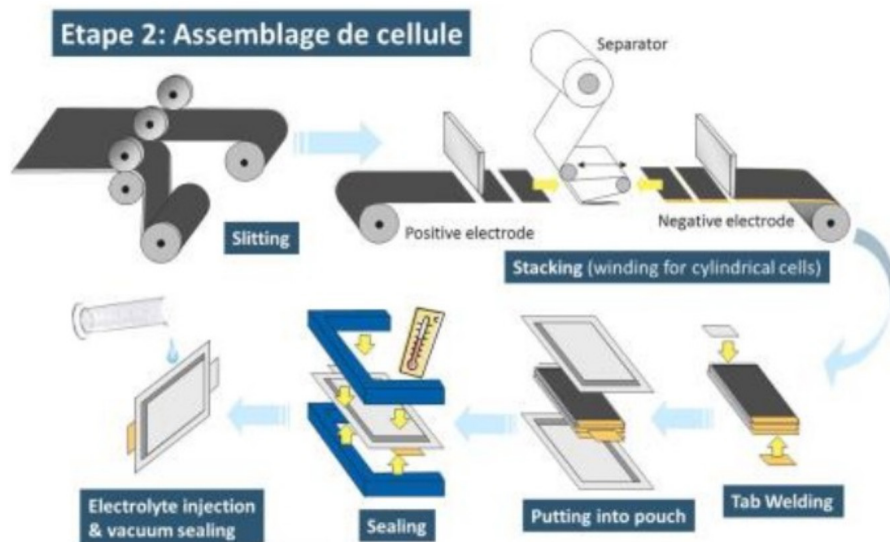


Figure 5: Assemblage de cellules. Source Renault

3.3. Finition

La dernière étape, majeure, consiste à effectuer au moins un cycle de charge et décharge sur la cellule (étape de formation de la SEI). Puis le gaz formé durant la formation (décomposition de l'électrolyte) est évacué et la cellule définitivement scellée.

Ensuite, des tests de vieillissement à haute température et température normale sont effectués pendant plusieurs semaines.

Enfin, la cellule est stockée pendant quelques semaines à une certaine température pour finaliser l'étape de formation, cruciale pour le bon fonctionnement ultérieur de la cellule.

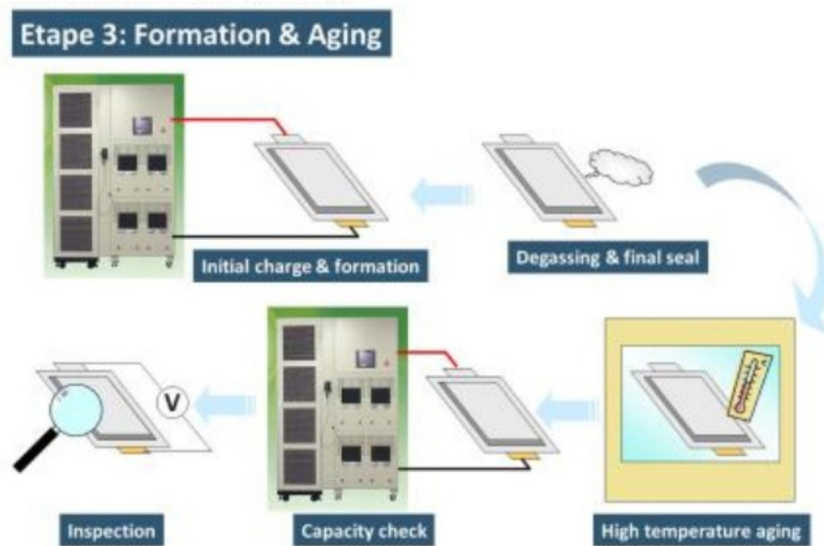


Figure 6: Formation et vieillissement du module. Source : Renault

3.4. Assemblage d'un pack batterie

Les cellules sont d'abord assemblées en série et /ou parallèle dans des modules, dont les caractéristiques sont diverses d'un fabricant à l'autre, et d'un véhicule à l'autre.

Ensuite les modules sont assemblés pour former un pack batterie de tension et capacité données, qui contient également toute la connectique (câbles, busbars, relais,...), des capteurs (de courant, de tension, de température,...), le contrôleur électronique BMS (Battery Management System), un disjoncteur, un éventuel système de refroidissement et un packaging

offrant une structure mécanique, protégeant notamment des chocs.

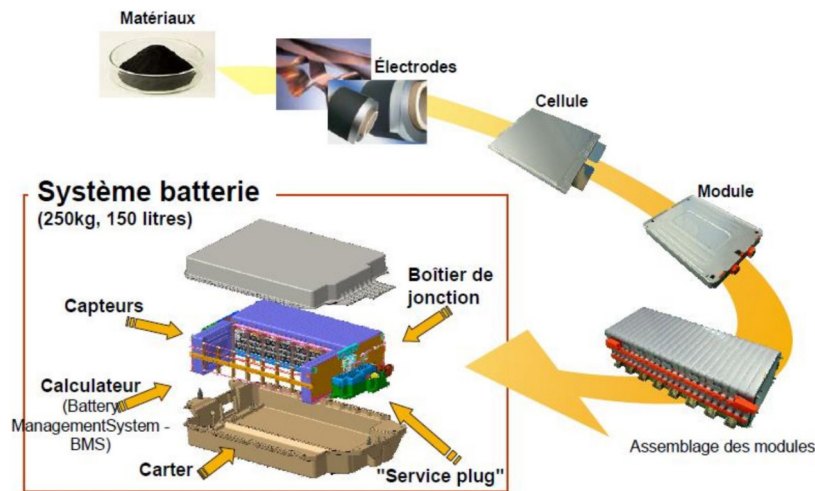


Figure 7: De la cellule Li-Ion au pack batterie. Source : Renault

3.4.1. Compromis puissance / énergie

Lors de la conception d'une cellule, c'est le design des composants de la cellule Li-ion qui permet d'atteindre un ratio puissance / énergie visé pour une application véhicule (électrique ou hybride). En particulier, l'épaisseur des électrodes influence le ratio puissance/énergie de la batterie (figure 6). Ainsi des électrodes épaisses augmentent le volume de stockage d'ions Li^+ et donc la densité d'énergie, en contrepartie elles diminuent leur vitesse de transfert dans l'électrolyte et donc la densité de puissance.

Pour un véhicule électrique pur, l'autonomie est directement reliée aux densités d'énergie. Les cellules

typées énergie sont donc privilégiées, sachant que la batterie est suffisamment grosse pour fournir assez de puissance (de décharge). Toutefois, la puissance de charge est un critère de plus en plus important à prendre en considération afin de proposer des charges toujours plus rapides.

Pour un véhicule hybride conventionnel (classique de type « mild » ou « full »), on privilégiera plutôt des cellules typées puissance pour permettre un boost et une récupération optimale, puisqu'il n'y a pas (ou presque pas) d'autonomie électrique à assurer.

Pour un véhicule hybride rechargeable, la cellule se rapprochera de celle d'un véhicule électrique pur, car l'autonomie est du premier ordre.

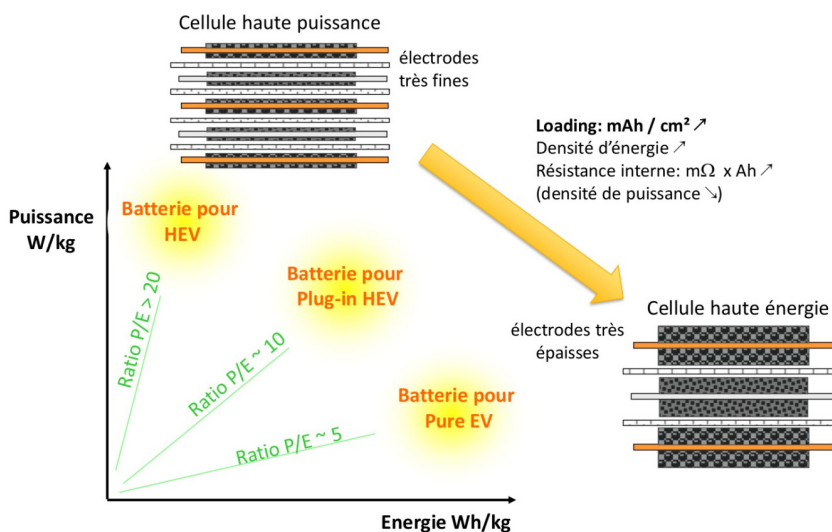


Figure 8: Cellules Li-ion typée Energie ou Puissance. Source : Renault

3.4.2. BMS

Le système de contrôle de la batterie (BMS battery management system) est un organe électronique qui communique en temps réel avec le superviseur du véhicule. Le BMS collecte des informations sur les caractéristiques de la batterie (tension, courant, température), calcule notamment la puissance disponible, estime l'état de charge et de santé. Le BMS informe donc le superviseur véhicule qui pilote les conditions d'utilisation de la batterie (charge, décharge, protection, mise en veille, refroidissement...) en fonction des paramètres d'entrée électriques et thermiques. Son rôle est ainsi critique pour garantir l'usage optimal en toute sécurité de la batterie lors de sollicitations électriques / thermiques sévères.

De plus, le BMS gère seul l'équilibrage de la batterie, c'est-à-dire le maintien au même état de charge (même tension nominale) de toutes les cellules, pour éviter toute dispersion néfaste au bon fonctionnement de la batterie dans le temps.

Note : le BMS est un abus de langage car il ne manage pas la batterie (à part pour l'équilibrage des cellules, réalisé en continu), il transmet des informations au superviseur véhicule qui manage véritablement la batterie.

3.5. Recyclage et émissions de CO₂

Cette partie traite uniquement des batteries de véhicules électriques. Contrairement aux batteries des téléphones portables, les batteries de véhicules électriques comportent une grande quantité de matériaux et la mise en décharge des véhicules est bien organisée, ce qui facilite le recyclage. Rajoutons que la directive européenne 2006/66/CE oblige les constructeurs automobile à s'assurer du recyclage d'au moins 50 % de la masse des batteries véhicules qu'ils produisent.

Le recyclage des batteries Li-ion des VE est possible mais pour l'instant peu développé, le coût des matériaux recyclés (Lithium, Nickel, Cobalt) suffisamment purs étant supérieur au coût des matériaux du marché des matières premières et la quantité de batteries lithium-ion en fin de vie peu significative.

Les tensions sur le marché du cobalt, le flot de batteries usagées à venir et les obligations environnementales des constructeurs amènent la filière à se développer. Parmi les très nombreux projets, en janvier 2020 commence le projet ReLieVe (Recycling Li-ion batteries for electric Vehicle) porté par Suez, Eramet et BASF.

Les trois acteurs correspondent chacun à une des étapes du recyclage : Suez pour la collecte et le démantèlement, Eramet pour le traitement et la séparation des matériaux et BASF pour leur intégration dans de nouvelles électrodes.

Par ailleurs, pour diminuer le coût des batteries de leurs véhicules électriques, les constructeurs s'intéressent à la possibilité de leur donner une nouvelle

vie en stockage stationnaire, une fois la capacité réduite de 20 à 30 % par le vieillissement à bord du véhicule.

Ce stockage stationnaire intéresse notamment le marché de la régulation de fréquence et la régulation de l'approvisionnement du réseau en électricité, ainsi que les sites isolés. Son développement constitue un élément de flexibilité du réseau afin d'assurer l'intégration des énergies renouvelables variables comme l'éolien ou le solaire photovoltaïque.

Diverses études donnent une estimation de la capacité du gisement des batteries de seconde vie pour les applications stationnaires, à horizon 2030, au terme d'une première vie embarquée dans un véhicule électrique. Par exemple, l'ADEME a réalisé en 2015 une étude de cas sur la seconde vie des batteries Lithium-ion dans des applications de stockage stationnaire résidentiel et massif estimant à environ 21 GWh cette capacité à l'horizon 2030 accessible en Europe pour la seconde vie. Pour comparaison, la centrale de turbinage et pompage de Grandmaison, la plus importante de France, a une capacité de stockage de 30 GWh sous forme d'énergie potentielle.

Au-delà du recyclage proprement dit, il faut également considérer le Cycle de Vie d'une batterie, qui englobe toutes les étapes, de la fabrication des matériaux précurseurs (extraits dans les mines ou issus du recyclage), jusqu'à son recyclage, en passant par sa fabrication, son utilisation sur véhicule, voire son éventuelle seconde utilisation pour une autre application - et tous les transports associés. Le véhicule électrique revendiquant être Zéro Emission lors de son utilisation, les émissions carbone connexes (notamment la fabrication de la batterie, la production d'électricité) doivent être évaluées afin de s'assurer du gain global de réduction des émissions de CO₂. Les estimations, difficiles à réaliser, ne sont pas toutes similaires selon les études, mais elles montrent qu'il faut veiller à ce que la fabrication de la batterie en amont ait une empreinte CO₂ minimale pour optimiser le bénéfice final. De surcroît, la production d'électricité dépend fortement du pays considéré, mais la tendance de produire de l'électricité décarbonée est forte et continue (grâce aux énergies renouvelables), et c'est un levier qui existe, contrairement au véhicule thermique très dépendant des énergies fossiles.

Enfin, les solutions tout électriques sont des solutions pertinentes du point de vue écologique mais également pour réduire la pollution locale, d'autant plus si elles sont très utilisées (comme sur les bus) de façon à amortir l'impact de la fabrication de la batterie (sur les gaz à effet de serre) par l'usage. La rentabilité économique de ces solutions s'accroît grâce aux aides à l'achat et à la réduction du coût des batteries. D'après une étude récente sur le transport routier français [18], pour le déplacement des personnes en particulier, les solutions les plus pertinentes pour réduire les émissions de CO₂ restent les transports en commun équipés d'une motorisation électrique ou hybride. Toutefois, les solutions de véhicules légers PHEV et les solutions individuelles tout électrique devraient permettre, d'ici à

2030, de limiter à 50 gCO₂ le transport d'une personne par km. Ceci représente environ 4 fois moins qu'un véhicule essence individuel de cœur de gamme actuel.

4. Caractéristiques actuelles des batteries

4.1. Performances

Voici les performances annoncées du véhicule électrique le plus vendu en France, la Renault Zoé R135 :

	Zoé R110 23 900€ - 6 000€ (aide Etat) + location de batterie
Moteur	110 ch / 80 kW
Batterie (énergie utile)	52 kWh
Autonomie (cycle WLTP ¹)	395 km
Recharge (de 0 à 80%, soit environ 315km)	Wallbox 7,4kW : 6h55 Borne publique 11kW : 4h30 Borne publique AC 22kW : 2h15 Borne publique charge rap. DC 50kW (optionnel) : 1h05
Masse estimée de la batterie	326 kg
Masse du véhicule	1500 kg

Caractéristiques de la Zoé R110

L'autonomie réelle est très proche du cycle WLTP, nouvelle référence internationale pour justement rendre compte d'une utilisation réelle, mixant trajets urbains, péri-urbains et autoroutiers.

Cependant, l'autonomie dépend de l'usage, c'est-à-dire du profil routier, du type de conduite, de la vitesse, mais surtout des conditions climatiques, à savoir le besoin de chauffer l'habitacle en hiver ou d'utiliser la climatisation en été.

L'autonomie sur autoroute est notamment significativement inférieure à l'autonomie WLTP, réduite d'environ 40% à 120-130km/h.

La durée de vie des batteries est normalement en adéquation avec la durée de vie du véhicule, afin qu'il ne soit pas nécessaire de remplacer la batterie au cours de l'utilisation du véhicule.

Selon que la batterie est louée ou vendue, la batterie est garantie afin que le client soit rassuré quant à la fiabilité de ces nouvelles technologies : remplacement

gratuite de la batterie si celle-ci est louée en cas de défaillance ou de diminution anormale de la capacité, garantie de 8 ans / 160 000 km si celle-ci est vendue avec le véhicule.

4.2. Vieillessement / Durée de vie

Le cyclage de charge et décharge de la batterie et le vieillissement calendaire affectent lentement les performances de celle-ci, en énergie et en puissance. Les courants de charge et de décharge, ainsi que la température ont une influence importante sur ce vieillissement, objet d'étude pour améliorer la durée de vie des cellules. Une température trop basse (inférieure à 0°C) diminue sensiblement les performances de la batterie car la résistance interne augmente fortement, et pourrait provoquer des mécanismes de vieillissement spécifiques si la gestion de la batterie n'est pas rigoureusement effectuée (limiter la puissance de charge aux températures extrêmement basses). Une température élevée (> 40 °C) augmente les performances mais active également les mécanismes de dégradation des électrodes et de l'électrolyte, d'où la nécessité d'un système de refroidissement pour maintenir la durée de vie.

L'électrode négative en graphite est particulièrement affectée par le vieillissement. La couche SEI (Solid Electrolyte Interface) devient plus épaisse et change de nature, sous l'effet du vieillissement, ce qui :

- consomme des ions lithium cyclables et diminue par conséquent l'énergie stockable par cellule,
- augmente la résistance interne et diminue alors la puissance maximale que peut, respectivement, fournir la batterie en roulage ou accepter en charge.

De manière générale, la spécificité des mécanismes de vieillissement mis en œuvre pour chaque technologie, mais aussi suivant l'usage véhicule, pose un problème complexe. En effet, il faut idéalement concevoir des batteries d'une durée de vie de 15 ans attendue pour les véhicules, quelles que soient les conditions d'utilisations, ce qui représente un challenge par rapport aux portables dont la durée de vie moyenne n'excède guère quelques années. Les programmes de recherche menés sur ces sujets, assortis de retours d'expérience, permettent de développer des modèles de prédiction et d'améliorer la durabilité des batteries [10]. Cependant l'estimation de l'état de santé de la batterie (SOH = State of Health), correspondant à la perte de capacité de la batterie, est un diagnostic difficile à réaliser directement par le calculateur batterie (BMS).

¹WLTP World harmonized Light vehicles Test Procedure est une procédure de test de roulage reproduisant de manière réaliste l'usage moyen d'un véhicule.

4.3. Sécurité

L'énergie embarquée dans une batterie Li-ion est très importante (une batterie de 50 kWh contient l'énergie chimique de 5L d'essence.) Les batteries Li-ion ont été à l'origine d'un certain nombre d'incidents d'ampleur, largement médiatisés :

- En 2013, l'incendie de batteries de Boeing 787 Dreamliner a été imputé à un court-circuit interne dans une cellule Li-ion provoquant un emballement thermique.
- En 2016, les explosions des batteries des Galaxy Note 7 ont été dues à un court-circuit entre les électrodes liées à une déformation mécanique de la batterie.
- Quelques véhicules électriques (Tesla) ont brûlé. N.B. selon les statistiques Tesla (statistiques alimentées par toutes ses voitures connectées) rapportées aux statistiques américaines, une Tesla brûle 9 fois moins qu'une voiture thermique, à kilométrage équivalent.

Les problèmes des batteries Li-ion embarquées peuvent avoir différentes causes et sont à prévenir dans tous les cas :

- d'un problème électrique : surcharge, court-circuit extérieur,
- d'un problème électrique interne : court-circuit interne provoqué par exemple par une impureté métallique (particule) immiscée lors du process de fabrication.
- d'un problème mécanique, type crash, lors d'un accident par exemple.
- d'un problème thermique, un échauffement trop important essentiellement, par exemple si la batterie au contact d'une source très chaude produite par exemple par un autre véhicule (thermique) brûlant à proximité immédiate.

Des tests sécuritaires, souvent destructifs, sont d'abord réalisés sur les cellules et les modules, pour caractériser leur résistance aux conditions abusives (court-circuit externe et interne, surcharge, écrasement, surchauffe). En fonction des résultats, des mesures préventives sont appliquées à la batterie pour éviter tout risque sécuritaire, quelles qu'en soient les causes. Ces mesures peuvent être d'ordre mécanique (par exemple protection contre le crash) ou électronique (par exemple empêcher la surcharge). Elles sont redondantes s'il le faut pour atteindre un niveau sécuritaire au moins équivalent à un véhicule thermique.

Des tests de validation sont également menés sur les véhicules électriques, crash-test compris, comme pour les véhicules thermiques, pour s'assurer que les mesures palliatives sont efficaces.

La modélisation des phénomènes d'emballement thermique dans les batteries et la simulation sont également des outils numériques en fort développement,

pour améliorer la sécurité des batteries via le design des cellules et l'intégration des packs [7].

La batterie est généralement intégrée dans une zone du véhicule suffisamment protégée pour qu'elle ne subisse pas de déformation importante en cas de choc (avant, arrière, latéral), même très violent. Ainsi la batterie, pas ou très peu impactée, ne présentera aucun risque, ni pour les occupants (pas de départ de feu), ni pour les secours intervenant (notamment maîtrise du risque électrique).

Les pompiers sont également formés pour intervenir sur ces véhicules, aux risques potentiellement différents des véhicules thermiques, afin qu'ils soient familiarisés et puissent par exemple éteindre un incendie (dans le cas où le véhicule électrique serait volontairement incendié ou pris dans un carambolage impliquant des véhicules thermiques en feu). Un autre exemple, pour certains véhicules, est de leur indiquer comment accéder au disjoncteur avant d'évacuer les occupants blessés.

4.4. Recharge

Exceptée la lente recharge domestique sur secteur 230 V (2,3 kW avec simple prise ou 3,6 kW avec prise green-up), la recharge à domicile se fait généralement par une prise spécifique dite « WallBox » de puissance 7,4 kW (monophasé) voire 11 kW (triphase). Le convertisseur AC/DC embarqué dans le véhicule électrique assure la conversion entre le courant alternatif d'alimentation et le courant continu de la batterie.

Les bornes publiques françaises et européennes proposent 11, 22, 43 kW (AC), 50 kW (DC), et désormais 175 kW (500 V) ou 350 kW (1000 V) (cf article sur les chargeurs) sur certaines station d'autoroutes, permettant des recharges de plus en plus rapides, sous réserves que la batterie puisse accepter de telles puissances (par exemple 80 % en 20 à 30 minutes). Ces bornes de charge rapide sont des bornes d'alimentation en courant continu (DC), le coûteux convertisseur AC/DC haute puissance étant alors intégré dans la borne.

La normalisation des chargeurs et leur déploiement en nombre sur l'ensemble des territoires français et européens est un enjeu majeur pour permettre l'essor des véhicules électriques. (cf. article sur les chargeurs).

A noter que l'échange de batteries (quick drop), un temps testé par Renault en Israël, a été abandonné à cause de sa complexité et de la difficulté à le standardiser pour les différents véhicules électriques.

4.5. Coût

La batterie de la Zoe est facturée 8100 euros au client. Bloomberg New Energy Finance estime le kWh de pack batterie à 176 \$, ce qui correspond à 8000 euros pour une batterie 50 kWh, un résultat similaire pour un pack batterie de 50kWh.

La batterie représente donc environ 25 % du prix de vente de la Zoé. Le prix de vente de la voiture comprenant conception, taxes, transport, publicité, bénéfices... le coût de la batterie représente entre 35 et

50 % du coût de fabrication d'un véhicule électrique à batterie. [9][8]

Le coût des batteries Li-ion a été estimé en 2019 à 127 \$ / kWh à l'échelle cellule et 176 \$ / kWh à l'échelle pack par Bloomberg New Energy Finance. Le coût diffère suivant la puissance des cellules notamment mais le coût moyen est l'indicateur suivi du marché des batteries. [1]

La baisse du coût du kWh Li-ion est de 20 % environ par an depuis 2010, d'après l'étude Bloomberg New

Energy Finance. Compte tenu de la diminution de la dépendance au Cobalt, des améliorations sur les process et des estimations sur le prix des matières premières, Bloomberg New Energy Finance estime que le coût pourrait passer sous les 100 \$/kWh en 2024, mais cela dépend évidemment aussi fortement du type de batterie considérée, petite (donc plus chère par kWh) ou plus grosse (potentiellement moins chère par kWh), et des performances attendues (densité d'énergie et de puissance).

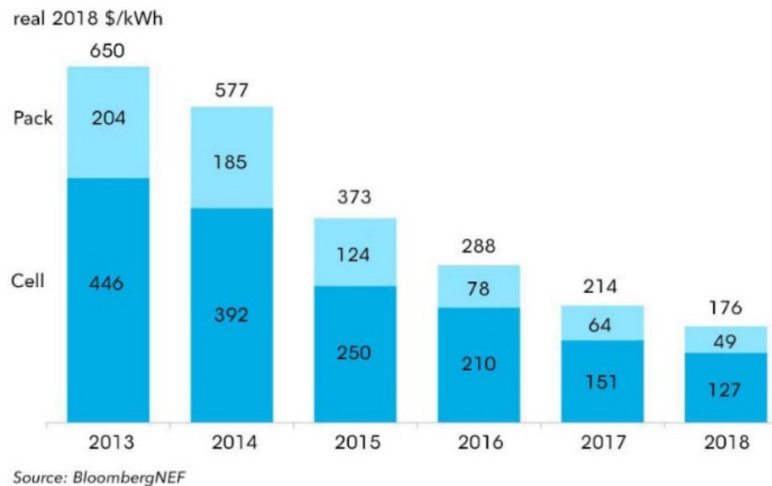


Figure 9: Enquête sur le prix des batteries Lithium Ion distinguant pack et cellules

La suite de l'évolution du coût du kWh de Li-Ion dépendra des innovations en cours (voir 5ème partie) et du coût de leur industrialisation.

4.6. Les fabricants de batteries (cellules) ou de voitures ?

Actuellement, excepté le constructeur américain Tesla (associé au japonais Panasonic), les fabricants de cellules sont essentiellement asiatiques.

Global EV battery market share in 2018

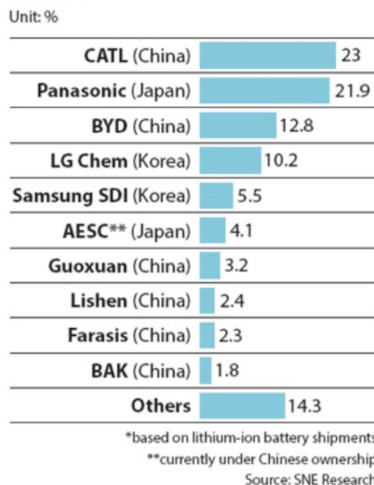


Figure 10: premiers fabricants de cellules Li-Ion pour véhicules électriques

- Les coréens tels LG Chem (qui possède aussi des usines en Chine et en Pologne), SAMSUNG (possédant une usine en Hongrie) ou SK
- Les chinois tels CATL et BYD (CATL a annoncé la construction prochaine d'une usine en Allemagne).
- Les japonais, historiquement pionniers, tel Panasonic (associé notamment au constructeur américain Tesla pour produire 30 GWh/an de cellules Li-ion dans une Gigafactory depuis 2017 aux États-Unis), AESC,... également implantés en Chine.
- D'autres outsiders, pas forcément asiatiques prétendent à devenir également majeurs, tel A123 (US-Chine), Total-SAFT (France), sans oublier le consortium européen qui est en train de se mettre en place, afin de promouvoir une filière européenne de batteries.

Tous ces fabricants annoncent de nouvelles constructions d'usine, principalement en Chine.

Pour ne pas dépendre durablement des fabricants asiatiques de cellules, et maintenir une industrie automobile européenne forte, la Commission Européenne a lancé fin 2017 une initiative en vue de développer en Europe une filière industrielle de fabrication de cellules de batteries. L'objectif ambitieux serait de produire 200 GWh/an à l'horizon 2025. Ce projet d'Alliance Européenne des Batterie intègre de nombreux acteurs, industriels et chercheurs, du

raffinage des matériaux à la production de cellules dans une logique d'écoconception, jusqu'au recyclage in fine. Un plan d'actions stratégique a été publié en avril 2018, intégrant des recommandations de positionnement technique, financier et politique [8].

Dans la continuité, l'Union Européenne a annoncé en décembre 2019 3,4 milliard d'euros d'aide publique pour le développement de la filière de R&D et production de batteries. L'Allemagne, la France, l'Italie, la Pologne, la Belgique, la Suède et la Finlande sont impliqués.

5. Innovations et perspectives

5.1. Les tendances technologiques futures

Comme évoqué dans le paragraphe 2.3, les technologies Li-ion sont diversifiées et en développement constant, afin de répondre toujours davantage au cahier des charges d'une batterie de véhicule électrique, en termes de performances

énergie/puissance, sécurité, durabilité, encombrement et coûts. Les efforts de recherche portent sur la nature des matériaux (matériaux d'électrodes et électrolytes en particulier), sur le design des électrodes (structuration, composition) sur le design de la cellule (empilement ou enroulement des électrodes avec des séparateurs de plus en plus fin, typage énergie ou puissance,...). mais également en optimisant les autres composants du Pack, comme le bac et le couvercle, ou les composants électriques/électroniques (relais, capteurs, calculateurs,...)

Dans les prochaines années et décennies, des progrès technologiques substantiels sont attendus pour les batteries au lithium embarquées dans les VE (voir Figure 11) : à court terme ces progrès concernent les cellules Li-ion mais on devrait assister à moyen terme à un saut technologique avec la commercialisation de batteries lithium tout solide (All Solid State Batterie dit ASSB), puis l'avènement des technologies lithium-Soufre Li-S voire Lithium-air.

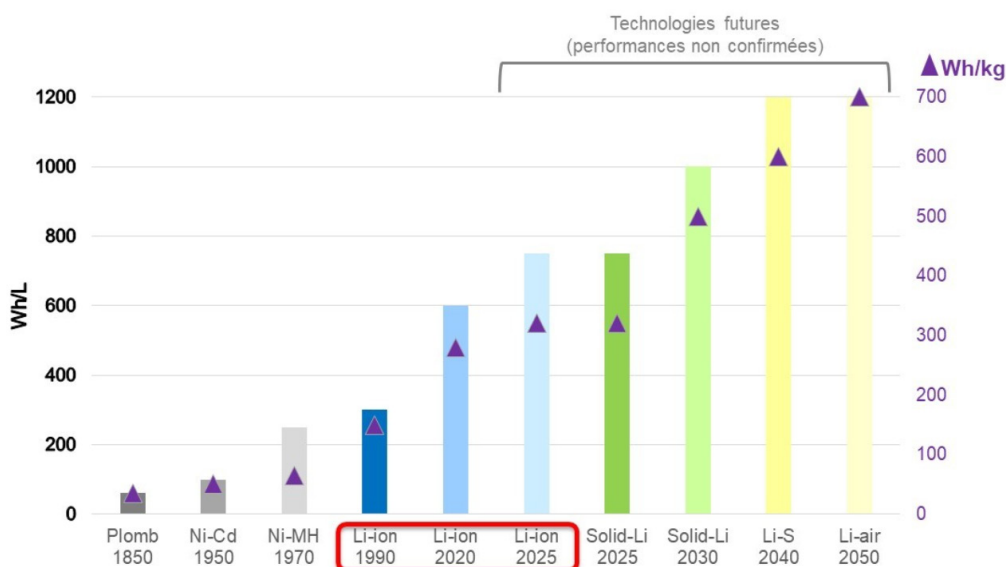


Figure 11: Perspectives d'évolution des densités d'énergie massique et volumique des cellules. Source : Renault

La feuille de route avancée par l'Europe, en 2018, est également présentée dans la Figure 12 :

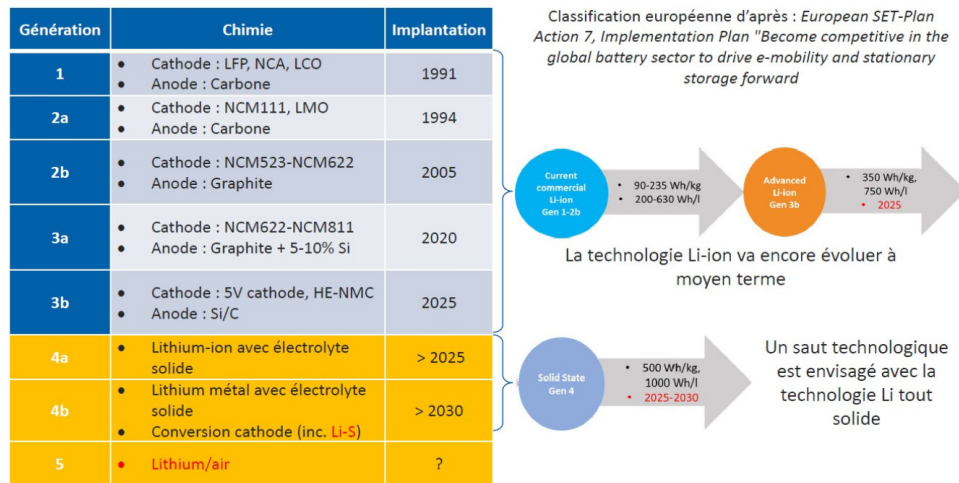


Figure 12: Feuille de route des technologies de batterie [11]

5.2. Perspectives autour des batteries Li-ion

Pour accroître la densité énergétique, une première option est d'augmenter la tension d'une cellule Li-ion à près de 5 V en utilisant des matériaux d'électrodes positives à très haut potentiel (les matériaux actuels n'excèdent guère 4.2V en potentiel maximum), comme les oxydes à structure 3D « spinelles 5 V » (LiNi_{0,5}Mn_{1,5}O₄). Toutefois ces matériaux posent la difficulté d'identifier un électrolyte stable pour le cyclage durable dans ces conditions.

Une seconde option consiste à accroître la quantité d'électricité que peut stocker la batterie par unité de masse, c'est-à-dire à augmenter la capacité faradique des électrodes (mAh/g d'électrode).

Du côté des électrodes positives, c'est ce qui motive le développement des matériaux d'électrode positive NMC en feuillets dits Ni-rich, où le remplacement progressif du Cobalt par du Nickel permet d'augmenter le nombre d'électrons échangés par unité de métaux de transition. A noter que les matériaux Ni-rich NMC (622) remplacent aujourd'hui les mélanges LMO/NMC(111) dans certains véhicules électriques récents, les premières batteries NMC(811) arrivent sur le marché tandis que la technologie NMC(9½½) est en développement...

Une autre piste explorée depuis plusieurs années devrait permettre d'accroître substantiellement les capacités massiques des cellules Li-ion : il s'agit d'introduire une sur-concentration en Li dans la structure oxydes 2D en feuillets des matériaux d'électrode positive pour augmenter la capacité du matériau (au-delà de 1 Li par MO₂). Ces matériaux notés "Li-rich NMC" ou "HE-NMC" ((HE = High Energy) présentent une capacité massique accrue de 200 à 300 mAh/g. Comme ils ne sont pas encore stables en cyclage, c'est une technologie prometteuse à échéance 2025.

Du côté des électrodes négatives, la formation d'alliages intermétalliques est la solution visée pour accroître significativement la capacité massique, au-delà des premiers alliages Si-C commercialisés à ce jour (cf.

paragraphe 2.3). En effet, de nombreux métaux peuvent former avec le lithium des alliages présentant des capacités spécifiques énormes et des potentiels très bas (il y a environ un facteur 10 entre le graphique à 372 mAh/g et le silicium). Mais ces métaux alliés subissent une forte expansion volumique durant le cyclage : la cyclabilité des cellules Li-ion est donc un problème à résoudre du fait de ces contraintes et de la reformation perpétuelle de la SEI. La piste privilégiée par les fabricants est d'introduire progressivement du silicium dans l'électrode de graphite (par exemple 5-10%), avant de passer plus tard à des électrodes à très fortes teneurs en silicium.

5.3. Les batteries Li tout solide

Une batterie lithium dite tout solide (cf. Figure 13) comprendrait un électrolyte tout solide assurant la conduction ionique des ions Li⁺, à la place de l'électrolyte liquide habituellement utilisé dans les batteries Li-ion.

Ce système aurait trois avantages :

- Assurer une sécurité intrinsèque inégalée, du fait d'une grande stabilité même dans les conditions les plus abusives (écrasement, court-circuit,...)
- Permettre l'utilisation d'une plus large gamme de matériaux actifs d'électrode, notamment les matériaux de cathode à haut potentiel (favorables à la densité d'énergie) ou du lithium métallique à l'anode (capacité massique/volumique inégalable)
- Pouvoir utiliser la batterie à des températures plus élevées qu'avec le Li-ion (limité actuellement à 50-60°C), sans impacter la durabilité. C'est-à-dire pouvoir se passer d'un système de refroidissement pouvant être coûteux et encombrant.

Une première étape dans l'introduction de batteries tout solide sur le marché pourrait être une batterie « tout solide Li-ion » à base d'électrolyte polymère et de carbone à l'anode, avant le lancement de batteries « tout solide Li-métal » à base d'électrolyte inorganique et de lithium métallique à l'anode.

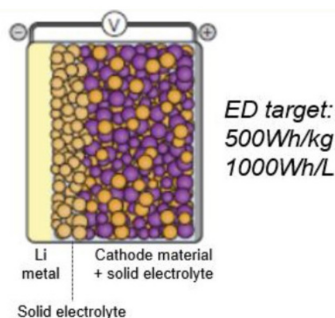


Figure 13: Représentation schématique d'une cellule de batterie Lithium tout solide [11]

Le développement et l'intégration d'électrolytes solides, pour réaliser des batteries Li tout solide, s'inscrivent dans une démarche d'industrialisation à moyen-long terme (2025-2030).

5.3.1. Matériaux

La technologie de batteries du fabricant Bolloré constitue l'exemple historique des batteries Li tout solide commercialisées depuis plusieurs années dans des véhicules électriques (Blue Car et Blue bus). Cette technologie associe du Li métallique à la négative, des matériaux d'insertion à l'électrode positive et un électrolyte polymérique solide (à base de polyéthylène glycol extrudé, noté PEO). Les principaux avantages sont une sécurité intrinsèque accrue (absence de solvant organique liquide inflammable) et un gain significatif en densité d'énergie massique et volumique, en passant du carbone graphite (372 mAh/g) au lithium métal (3860 mAh/g). Toutefois, ces batteries solides sont limitées en température de fonctionnement ($> 60\text{ }^{\circ}\text{C}$), pour assurer une conductivité ionique suffisante du PEO, ce qui contraint leur usage.

Suscitant une recherche foisonnante ces dernières années, les technologies Li tout solide recouvrent principalement trois classes de matériaux électrolytes (cf. Figure 14) :

- Les électrolytes organiques : complexe polymère + sel de lithium
- Les électrolytes inorganiques : familles des oxydes, des sulfures, ...
- Les électrolytes hybrides : organique/inorganique, inorganique/inorganique

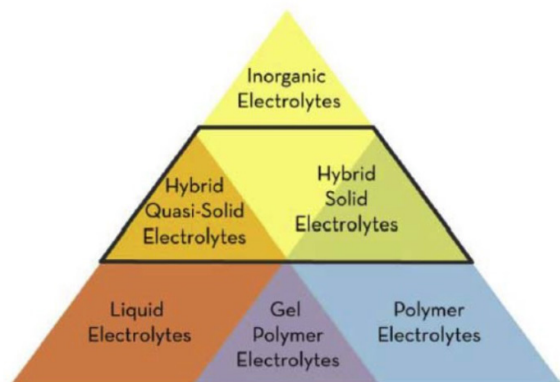


Figure 14: Électrolytes hybrides pour batteries Lithium-métal [17]

En raison des problématiques de performance, stabilité interfaciale et contraintes mécaniques, tous ces électrolytes font l'objet de recherches. Concernant les matériaux organiques, on peut noter récemment l'utilisation, au-delà du PEO, des polyesters, du polypropylène, des réseaux de polymères interpénétrés, des polyliquides ioniques ou encore le développement des électrolytes polymères conducteurs d'ion unique (« single ion conducting polymer electrolytes » ou SPE). Si ces matériaux ne posent pas de difficulté particulière de mise en œuvre, ils pêchent du côté de la conductivité ionique (cible $> 10^{-2}\text{ S/cm}$ à température ambiante) et, tout particulièrement, de la capacité à transporter les ions Li^+ . Cependant, de récents développements pour des polymères spécifiques (dont la composition n'est pas divulguée) montrent que des valeurs de conductivité seraient suffisantes. Dans la catégorie des matériaux inorganiques, trois classes principales émergent qui présentent de bonnes propriétés de conduction et transport des ions Li^+ :

- Les matériaux inorganiques amorphes (sulfures),
- Les matériaux inorganiques cristallins (perovskites, grenats, NASICON),
- Les céramiques vitreuses (LiPON).

Toutefois ces matériaux présentent généralement des difficultés d'intégration dans les batteries, aussi le contrôle de la microstructure reste un challenge. La nécessité d'un compromis entre stabilité interfaciale et propriétés de transport du Li^+ se dessine, et c'est une incitation majeure au développement des matériaux hybrides (tels que les matrices organiques chargées inorganiques).

5.3.2. Mise en œuvre

On ne saurait dresser un bref état des lieux sur les matériaux de batterie solide sans souligner le double challenge « matériaux » et « procédé » qui se présente pour les diverses solutions technologiques à l'étude (à base de matériaux polymères, inorganiques et hybrides).

Comme pour les batteries Li-ion de référence, la mise en œuvre d'une batterie Li tout solide comprend trois étapes (cf. Figure 15) : le mélange, la mise en forme et le compactage, avec des spécificités suivant la nature des matériaux de départ. Les variantes de procédés se déclinent en voie solvant (cas de référence), voie sèche à chaud (cas des électrolytes à matrice organique), et voie poudre (cas des électrolytes inorganiques).

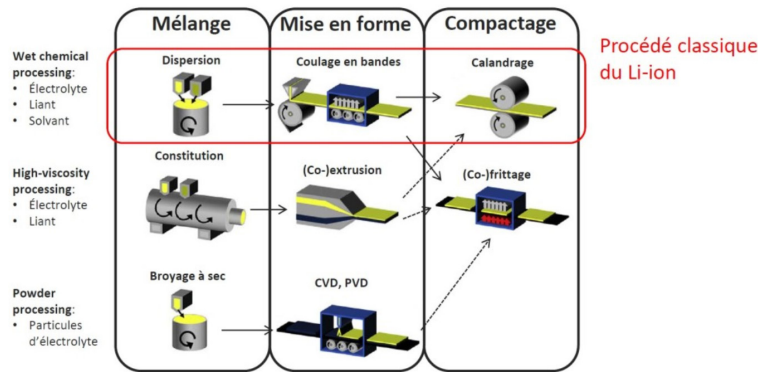


Figure 15: Fabrication de matériaux de batterie Li tout solide par comparaison au procédé Li-ion [12]

Une description détaillée d'un procédé de prototypage de cellules Li tout solide, illustré sur la Figure 16, fait ressortir l'enchaînement suivant :

- Préparation de la cathode seule (mélange matière active, additifs, électrolyte solide) du fait de l'utilisation du Li métal comme anode
- Séchage de la cathode (une salle anhydre est nécessaire pour certains électrolytes solides tels que le thiosulfate)
- Préparation de la membrane solide (ou approvisionnement externe)
- Pressage de la membrane solide sur la cathode ; assemblage en salle anhydre.

- En option : revêtement d'une couche supplémentaire destinée à servir de séparateur.
- Pour certains matériaux inorganiques, frittage à température très élevée.
- Formation de la cellule (sans formation de SEI).
- Cyclage et contrôle qualité final.

En comparaison au procédé de référence utilisé pour les technologies Li-ion, plusieurs étapes peuvent être supprimées, ce qui pourrait réduire les coûts. Mais, comme pour le Li-ion, il ressort que les différentes étapes de mise en œuvre des cellules solides doivent être conduites en salle anhydre, même pour la cathode, ce qui impose un investissement conséquent.

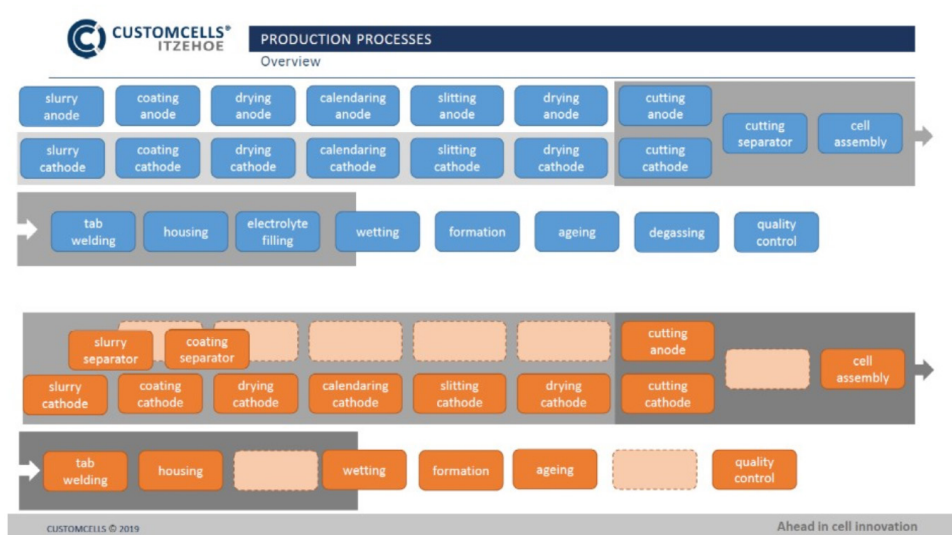


Figure 16: Comparaison des procédés de prototypage de cellules Li-ion (en haut) et Li tout solide (en bas) [16]

De surcroît, différentes variantes de design de cellule sont envisagées pour les matériaux inorganiques (cf. Figure 17) : l'assemblage direct « collecteur/ cathode

composite / électrolyte solide/ Li » est proposé dans le cas des sulfures, mais dans le cas des oxydes, le recours à une structure poreuse type « Gas Diffusion Layer »

venant englober les particules d'oxydes s'impose. En effet, ces dernières sont très denses et peu élastiques donc une mise en œuvre directe incluant une étape de pressage n'est pas envisageable.

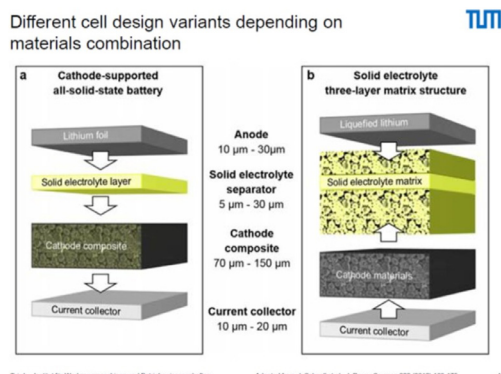
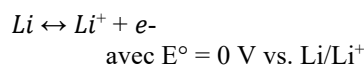


Figure 17: Variantes de design de cellules Li tout solide, en fonction de la nature des matériaux combinés [12]

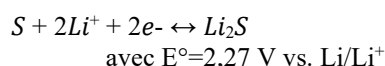
5.4. Les batteries Li-S

Les batteries Li-S sont considérées comme une technologie très prometteuse de stockage d'énergie en raison d'une énergie spécifique très élevée (théoriquement 5 fois plus élevée que le Li-ion), d'un faible coût dû à l'abondance du soufre, d'une faible toxicité et d'une grande sûreté de fonctionnement. Le principe est le suivant :

- Electrode négative Li :



- Electrode positive S :



La tension nominale de cellule vaut 2,1 V. L'électrolyte est habituellement un liquide de type éther (DioxOLane/1-2 DiMethoxyEthane). La courbe de charge / décharge est présentée sur la Figure 18.

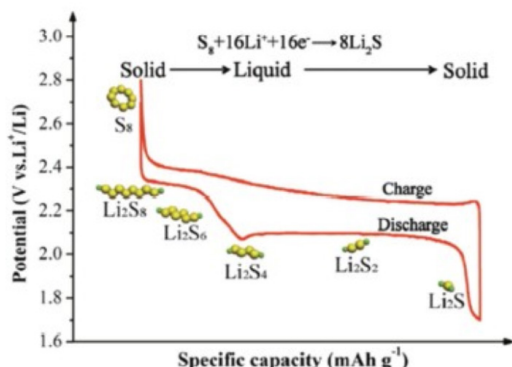


Figure 18: Profil de charge/décharge de batterie LiS (positive S8)[14]

Le profil de décharge à deux plateaux révèle un mécanisme complexe conduisant, à partir des espèces octacycliques S₈, à la formation d'intermédiaires polysulfures solubles et non solubles Li₂S_n (n>1) à la positive, jusqu'au composé final Li₂S.

Les limitations des batteries Li-S sont essentiellement dues aux propriétés intrinsèques du S et des intermédiaires générés lors du processus électrochimique :

- Faible conductivité du soufre élémentaire ($5 \cdot 10^{-30} \text{ S.cm}^{-1}$) et du produit final de la décharge Li₂S ($10^{-13} \text{ S.cm}^{-1}$),
- Forte expansion volumique lors des cycles de charge et décharge (+ 80 %),
- Migration vers la négative des polysulfures solubles formés dans l'électrolyte lors de la décharge à la positive, entraînant un phénomène d'autodécharge,
- Corrosion de l'anode et formation de dendrites de Li.

Pour dépasser ces verrous, de nombreux travaux de recherche sont menés. Récemment, des progrès techniques ont relancé l'intérêt des batteries Li-S notamment grâce à l'utilisation d'électrodes positives composites mettant en œuvre des matériaux carbonés mésoporeux, imprégnés de soufre élémentaire [14], de manière à rendre conductrices les électrodes positives. On peut citer également d'autres pistes d'étude :

- Pour piéger les polysulfures à la négative : confinement dans des matrices poreuses de C, structures creuses, rétention chimique, ...
- Développement d'une couche protectrice sur le lithium pour éviter les dendrites,
- Formulation d'électrolytes spécifiques avec pistes liquides ou solides.

Les systèmes Li-S ne sont pas commerciaux à ce jour mais en développement chez plusieurs fabricants (par exemple OXIS Energy, PolyPlus, Sion Power).

5.5. Les batteries Li-air

Le principe d'un système électrochimique métal-air est d'associer une électrode négative en métal (Zn, Al, Li, Mg, Ca, ...) et une électrode positive dite « cathode à réduction de l'oxygène », souvent réalisée en carbone mésoporeux. Ce dernier ne participe pas directement à la réaction électrochimique mais permet une plus grande surface de réaction, ainsi que la conduction électrique nécessaire au fonctionnement du système (voir Figure 19). La tension nominale est de 2,91 V.

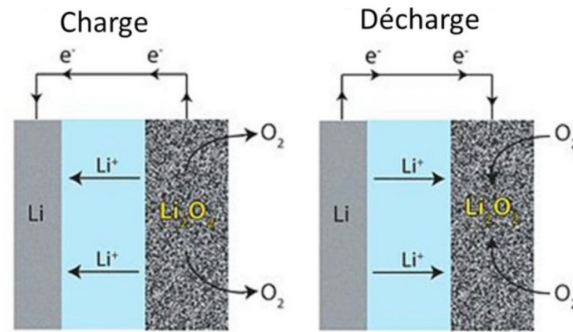


Figure 19: Principe de fonctionnement d'une batterie Lithium-air

Le principal avantage des systèmes métal-air est leur densité énergétique théorique élevée à l'état chargé, car l'oxygène n'est pas "embarqué" et provient de l'air extérieur. Dans le cas du lithium, il est possible d'obtenir théoriquement des densités d'énergies allant jusqu'à 11 kWh/kg (5 à 15 fois supérieur aux batteries Li-ion actuelles en excluant la masse de l'oxygène consommé).

Mais plusieurs verrous sont identifiés pour le système Li-air :

La négative en Li métallique présente des risques de corrosion, formation de dendrites, passivation, ...

La positive fonctionne idéalement en milieu aqueux, incompatible avec le lithium métal.

Les produits oxydés précipitent dans la cathode, ce qui altère la réversibilité du système,

La durée de vie n'est pas celle espérée.

Pour lever ces verrous, différentes approches sont mises en œuvre (cf figure 20) en jouant sur la nature de l'électrolyte: a) Aqueuse, b) Aprotique, c) Hybride, d) Tout solide, et en conséquence en adaptant la structure globale de la cellule Li-air.

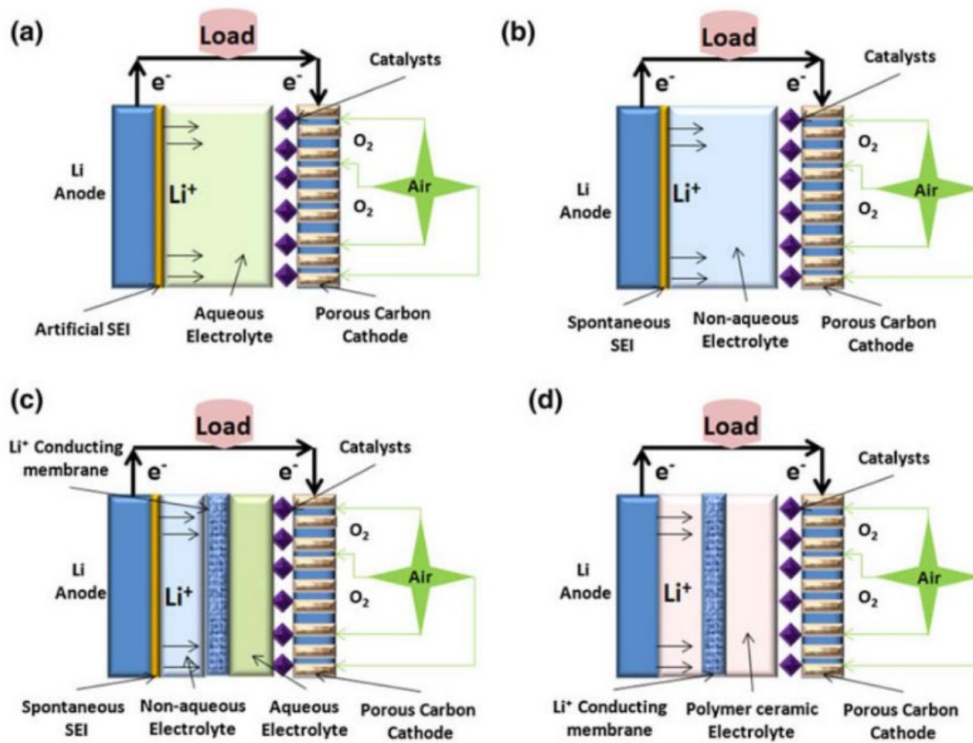


Figure 20: Différentes configurations de batterie Li-air [15]

A ce jour, les verrous ne sont pas levés et ces systèmes font l'objet de recherches exploratoires. Il reste par conséquent hasardeux de donner un horizon de temps pour leur commercialisation.

6. Conclusion

Les progrès sensibles réalisés ces dernières années par les batteries de véhicules électrifiés devraient se poursuivre et s'amplifier ces prochaines années, compte tenu du besoin des constructeurs automobiles en

technologies de stockage toujours plus performantes, et des mesures (financement...) déployées par les états pour promouvoir les industries de fabrication de cellules (en Asie notamment, mais également en Europe).

Au-delà des cellules Lithium, cœur de la batterie, dont les performances (énergie, puissance, durabilité) continuent d'être améliorées sans pour autant augmenter leur coût par kWh, les autres composants de la batterie (composants électriques, électroniques et mécaniques) sont également optimisés en termes de performance (capacité, poids) et de coût.

La feuille de route technologique de la prochaine décennie fait consensus, à l'échelle européenne au moins, toutefois nous ne sommes pas exempts de surprises en matière de recherche. Désormais, les efforts de recherche autour des matériaux, couplés à leur mise en œuvre, doivent intégrer les défis de l'écoconception et du recyclage pour minimiser l'empreinte carbone de la filière batterie. Pour relever l'ensemble de ces challenges dans le domaine du stockage de l'énergie, le message de la pluridisciplinarité reste plus que jamais d'actualité...

7. Bibliographie

- [1] Lithium-ion Battery Costs and Market, Claire Curry, Bloomberg New Energy Finance, juillet 2017, <https://data.bloomberglp.com/bnef/sites/14/2017/07/BNEF-Lithium-ion-battery-costs-and-market.pdf>
- [2] Who is winning the global lithium ion battery arms race ? <https://www.benchmarkminerals.com/who-is-winning-the-global-lithium-ion-battery-arms-race/>
- [3] Lithium-Ion battery cell production process, Heiner Heimes, Achim Kampker, Christoph Lienemann, Marc Locke, Christian Offermanns, Sarah Michaelis, Ehsan Rahimzei, RWTH Aachen University, février 2019
- [4] Le Monde, « Chimistes oubliés, idées copies... Imbroglia autour du Prix Nobel de chimie. » par David Larousserie, publié le 9/12/2019. https://www.lemonde.fr/sciences/article/2019/12/09/du-rififi-autour-du-prix-nobel-de-chimie_6022248_1650684.html
- [5] « Systèmes embarqués de l'énergie », Valérie Sauvant-Moynot, chap. 4 de l'ouvrage « Les Véhicules Hybrides. Des composants au système. » p187-272. Edité par François Badin en 2013 aux Editions Technip.
- [6] aBattReLife - Automotive battery recycling and second life, Pasquier M. (ADEME) 2015, 32 p.
- [7] Safety focused modeling of lithium-ion batteries: A review. S. Abada, G. Marlair, A. Lecocq, M. Petit, V. Sauvant-Moynot, F. Huet, Journal of Power Sources 306 (2016), p178-192.
- [8] The European Battery Alliance is moving up a gear, C. Mathieu, IFRI, May 2019.
- [9] "Electric vehicle battery second life applications in stationary storage – feasibility analysis in Europe". SAKOVICA Julija. Bruxelles: The Institute for Environmental Management and Land-use Planning, 2017, 95 p.
- [10] « Strategies to extend the lifespan of automotive batteries through battery modeling and system simulation. The MOBICUS Project. » S. Belaid, R. Mingant, M. Petit, J. Martin, J. Bernard. In 2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), pp. 1–9.
- [11] "Overview of battery cell technologies", M. Meus, European battery cell R&I workshop, 11-12/01/2018. <https://ec.europa.eu/research/index.cfm?pg=events&eventcode=230DABFD-90AB-8F7D-083EF5BD909DD025>
- [12] Integrated SET-plan, Action 7. "Become competitive in the global battery sector to drive mobility and stationary storage forward", 2018. https://setis.ec.europa.eu/sites/default/files/set_plan_batteries_implementation_plan.pdf
J. Schnell et al. J Power Sources 382 (2018), 160-175.
- [13] X. Ji, K.T. Lee, L.F. Nazar, A highly ordered nanostructured carbon-sulphur cathode for lithium-sulphur batteries, Nature Materials 8 (2009) 500-506
- [14] Feng Li, Advanced Materials (2017), 29, 1606823 DOI: 10.1002/adma.201606823
- [15] Journal of Applied Electrochemistry. 44 (2014), p 5.
- [16] Customcells, First All solid state Li battery in-hand conference, Itzehoe, 2019
- [17] Keller M., Varzi A., Passerini S. Hybrid electrolytes for lithium metal batteries, Journal of Power Sources, 2018, 392, 206-225. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2018.04.099.
- [18] IFP Energies Nouvelles 2018. Bilan transversal de l'impact de l'électrification par segment : PROJET E4T (Etude Economique, Energétique et Environnementale pour les technologies du transport routier français). ADEME. 21 pages. Cet ouvrage est disponible en ligne www.ademe.fr/mediatheque.

CHARGEURS DE BATTERIES POUR VE

CHRISTELLE SABER, NAJIB ROUHANA

Control Engineer PhD | Power Division - Control for Power Electronics & Electric Machines
Safran Electrical & Power - Établissement de Paris-Saclay - 78772 Magny-les-Hameaux

Résumé : La recharge d'un véhicule électrique (VE) constitue un enjeu stratégique pour les constructeurs automobiles et forme un réel défi à relever avant de pouvoir comparer ces véhicules à la simplicité d'usage du véhicule thermique. En effet, l'autonomie limitée, la durée de recharge de la batterie, le coût du déploiement d'une infrastructure de charge rapide, l'impact significatif sur les réseaux électriques et le coût élevé de la batterie sont à l'origine de plusieurs projets de recherche axés sur l'optimisation de la chaîne de recharge du VE. Nous pouvons distinguer deux types d'infrastructures de recharges : La charge quotidienne (infrastructure peu coûteuse, installée au domicile ou au travail) dite charge « lente » ou monophasée et la charge sur long trajet (borne de recharge rapide, déploiement à grande échelle). Deux types de chaînes de recharges peuvent être distingués : la recharge par induction (dite sans contact) et la recharge conductive (dite à cordon). Cet article s'intéressera uniquement aux chargeurs de batteries conductifs pour VE. Il présentera les enjeux liés à la recharge des VE et les différents types de chargeurs à cordon avec des exemples concrets de topologies de chargeurs. Les chargeurs étant intimement liés aux infrastructures de recharge (type de bornes de recharge) et aux normes en vigueur dans les pays de déploiement, une section de l'article sera dédiée à la présentation de ces technologies. La recharge sans contact sera traitée dans un prochain article.

Mots clés : chargeur, batterie, véhicule électrique

1. Introduction

Les premières générations de VE présentaient une autonomie allant de 120 à 150 km. Aujourd'hui les VE moyenne gamme annoncent 300 km d'autonomie. Quelle que soit la génération de VE, une infrastructure de recharge bien répartie s'avère indispensable pour pallier à leurs limitations d'usage et pour rassurer les utilisateurs. A savoir que le facteur psychologique chez les utilisateurs (c'est-à-dire la peur de se retrouver sans moyens de recharger) doit être pris en compte en analysant les chiffres de vente de VE. Les chargeurs AC/DC adaptés à la recharge monophasée à partir de prises de courants AC et / ou à la recharge triphasée sur bornes dédiées permettent l'amélioration de la disponibilité de la recharge pour les utilisateurs tout en réduisant les coûts d'investissement dans les infrastructures. Ainsi, certains constructeurs automobiles, comme Renault et BMW, ont développé leurs propres chargeurs AC/DC embarqués.

Par ailleurs, le type de charge, station rapide dédiée (triphasee) ou à domicile (monophasée), impacte la durée de recharge de la batterie. Le tableau ci-dessous fournit un exemple de durées et de puissances de recharge pour une batterie Lithium-ion de capacité 22 kWh rechargée en Europe.

Tableau 1 : Durées et puissances de recharge pour une batterie 22 kWh [1]

Durée de recharge (pour un état de charge à 100%)	Réseau électrique	Puissance de recharge (kW)	Niveau de tension du réseau électrique en Europe (V_{eff} V)	Niveau de courant absorbé au réseau (I_{eff} A)
6 - 8 h	AC 1~	3,7	230	16
3 - 4 h	AC 1~	7,4	230	32
2 - 2h30	AC 3~	11	400	16
1 - 1h30	AC 3~	22	400	32
20 - 30 min	AC 3~	43	400	63
20 - 30 min	DC	50	400 dc	100 dc

L'autonomie étant au centre des débats concernant les VE, il existe diverses solutions qui permettent l'amélioration de l'autonomie d'un VE. A cet effet, soit la capacité de la batterie peut être augmentée soit la charge peut être facilitée en réduisant la durée de la recharge. La réduction du temps de charge peut être assurée par l'augmentation de la puissance de charge. Ceci a conduit au déploiement de plus en plus accru de bornes de recharges dites rapides en référence à des puissances de charge élevées.

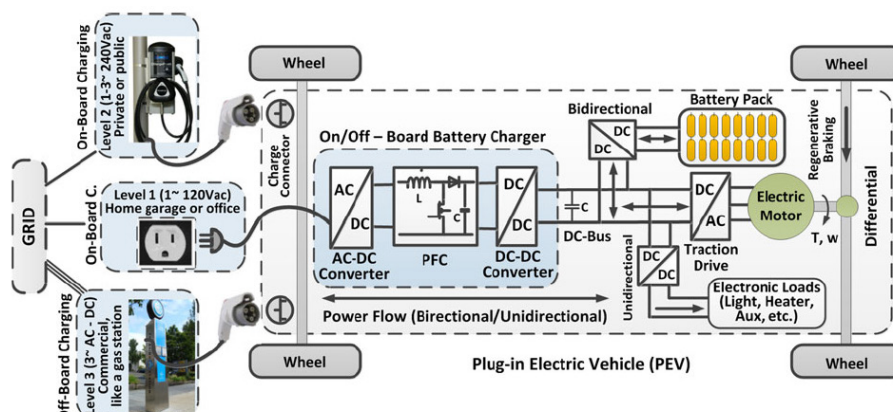


Figure 1 : Exemples de chaînes de recharge de VE [2]

En effet, comme déjà précisé, les chargeurs de batteries pour les véhicules électriques sont soit embarqués à bord du véhicule, soit présents au niveau des bornes de recharge [2]. Ces derniers ne sont pas contraints par le volume ni par le poids. Cependant, cette solution conduit à un coût élevé de l'infrastructure à travers le déploiement d'un grand nombre de bornes capables d'assurer la disponibilité de la charge pour les utilisateurs de VE.

Les infrastructures de charge rapide étant encore limitées, une autre solution consiste à embarquer le chargeur dans le véhicule afin d'assurer la conversion AC-DC de l'énergie à partir des prises de courant. Cette solution permet d'augmenter la disponibilité de la charge pour les utilisateurs (Fig. 1).

En conséquence, les structures embarquées permettant la conversion AC-DC de l'énergie à partir des prises de courant sont, depuis une quinzaine d'années, au centre des préoccupations des constructeurs automobiles. De plus, les contraintes industrielles liées au coût, au volume et à la sécurité constituent des enjeux majeurs pour leur conception. De ce fait, les chargeurs embarqués peuvent être soit autonomes, soit intégrés à la chaîne de traction à travers la réutilisation d'un ou de plusieurs éléments de la chaîne de propulsion électrique [3]. Le chargeur intégré permet la réduction du coût, du poids et du volume du convertisseur mais présente des contraintes supplémentaires liées, par exemple, à la compatibilité électromagnétique (CEM).

2. Etat de l'art des chargeurs de batteries conductifs pour VE

Cette section s'intéressera aux chargeurs à cordon. Des types, des topologies et des exemples de chargeurs seront présentés.

La figure 2 montre une vue macroscopique de l'ensemble des convertisseurs d'électronique de puissance pouvant être embarqués à bord des VE. Un chargeur de batterie embarqué doit assurer les fonctions suivantes :

- Interfaçage entre le réseau électrique alternatif (AC) triphasé et une batterie embarquée dans le VE : Conversion AC/DC ;
- Adaptation, pendant la recharge, du niveau de tension redressée au niveau de tension de la batterie embarquée : Conversion DC/DC ;
- Qualité du courant absorbé au réseau électrique: correction du facteur de puissance (PFC) ;
- Respect des normes de Compatibilité Electromagnétique (CEM) hautes fréquences afin d'éviter de perturber d'autres appareils connectés au réseau électrique mais également afin d'assurer la sécurité des personnes pendant la recharge: filtrage CEM et, selon les topologies retenues, isolation galvanique.

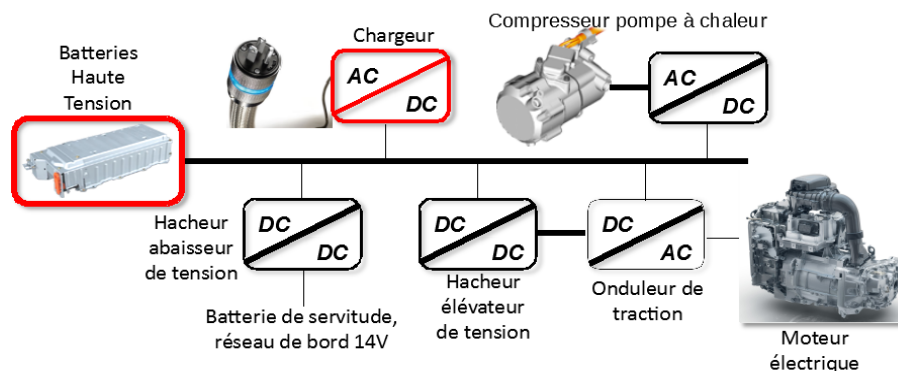


Figure 2 : Exemple de réseau électrique automobile et ses principaux convertisseurs d'électronique de puissance.

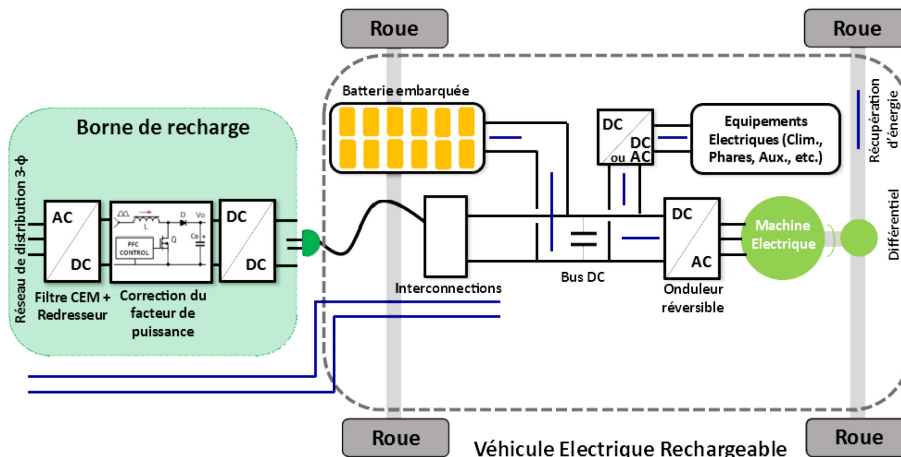


Figure 3 : Exemple de chargeur externe au VE - intégré à la borne de recharge.

2.1. Types de chargeurs

Des synoptiques permettant d'illustrer les différents types de chargeurs sont données page suivante :

- Chargeur externe au VE : intégré à la borne de recharge (Fig. 3)
- Chargeur embarqué à bord du VE mais indépendant de la chaîne de traction, dit autonome (Fig. 4)
- Chargeur embarqué à bord du VE et intégré à la chaîne de traction (Fig. 5)

Les chargeurs intégrés peuvent réutiliser tout, ou une partie, des constituants de la chaîne de traction pour effectuer la recharge. Par exemple, la puissance de la chaîne de traction de la Renault ZOE 2ème génération est de 80 kW avec une batterie embarquée et capacité 40 kWh, ce qui permet d'envisager une recharge conséquente en 30 min en utilisant les composants de l'onduleur de traction. L'arbre ci-dessous, issu d'une revue sur les chargeurs embarqués intégrés effectuée dans le cadre d'une thèse CIFRE avec Renault S.A.S., énumère les différents moyens d'exploiter la chaîne de traction pour la recharge. Cette classification est basée sur l'étude de 67 publications dont des topologies brevetées, des articles de journaux et des articles de conférences.

La réutilisation de l'électronique de puissance embarquée et/ou les enroulements de la machine électrique peut engendrer des problèmes d'interférences CEM avec d'autres équipements connectés sur le réseau électrique et aussi avec les dispositifs de protection domestiques. Ceci peut remettre en cause la disponibilité de la charge du VE. En effet, si les composantes hautes fréquences des courants de fuite sont trop élevées, deux choses peuvent se produire : l'aveuglement ou le déclenchement intempestif des dispositifs de protection, comme le disjoncteur différentiel. Tout événement qui peut provoquer l'aveuglement d'un disjoncteur différentiel pose un risque de sécurité élevé pour l'utilisateur. Par conséquent, la norme de sécurité CEI 61851-21 spécifie que le courant de fuite ne doit pas dépasser 3,5 mA RMS.

Ainsi, la réduction des émissions conduites vers le réseau, et plus particulièrement celles des courants de mode commun, dans une gamme de fréquences importante [150 kHz – 30 MHz] est souvent réalisée par isolation galvanique à travers l'utilisation de topologies à base de transformateurs de puissance. Vu les niveaux de puissances de recharge, l'isolation galvanique a un impact sur le coût et sur le volume du chargeur. Lorsque le chargeur n'est pas isolé, les constructeurs ont recours au filtrage passif et actif dans le but de limiter les perturbations générées par le chargeur.

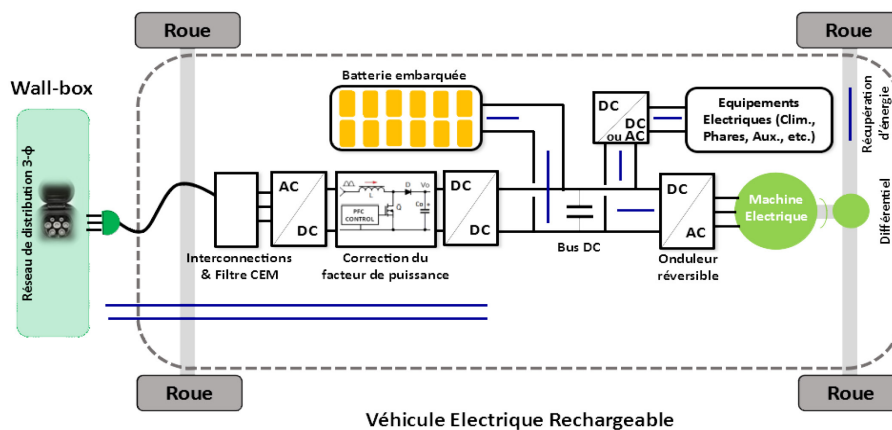


Figure 4 : Exemple de chargeur de batterie embarqué à bord du VE.

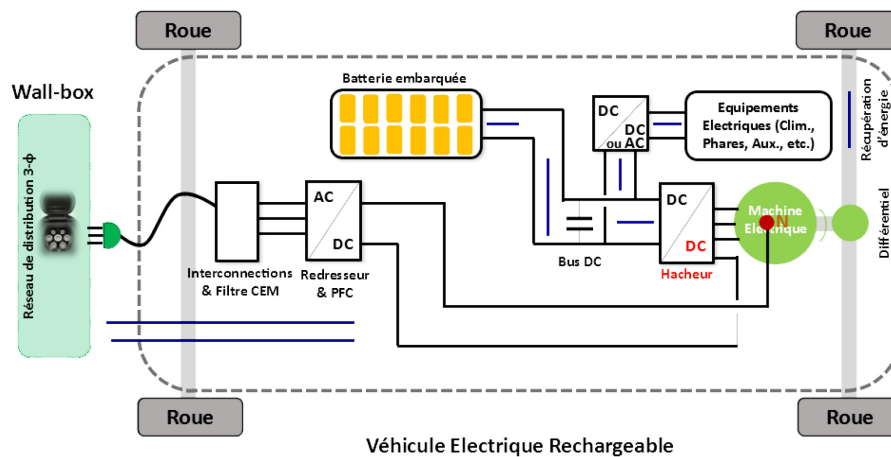


Figure 5 : Exemple de chargeur embarqué à bord du VE et intégré à la chaîne de traction (Renault ZOE).

Le filtrage CEM passif le long du chemin de propagation a toujours été la solution préférée des concepteurs d'électronique de puissance. Une fois le prototype construit, une série de mesures des niveaux d'émissions hautes fréquences (150 kHz - 30 MHz) est effectuée et comparée aux niveaux recommandés par la norme (CEI 61000-6-3: compatibilité électromagnétique partie 6-3, normes génériques – émission standard pour les environnements résidentiels, commerciaux et industriels légers). Les niveaux d'atténuations nécessaires sont utilisés pour concevoir un filtre CEM d'entrée / sortie pour le convertisseur déjà conçu. Cependant, comme la réduction des émissions conduites n'a pas été prise en compte lors du processus de conception, les niveaux d'atténuation nécessaires sont souvent élevés. En outre, les normes définissent la valeur maximale de courants de fuite (CEI 61851-21: Système de charge conductive pour véhicules électriques, partie 21, véhicule électrique exigences pour la connexion à une alimentation en courant alternatif ou continu) qui limite la valeur maximale des condensateurs de filtrage des courants de mode commun. Par conséquent, afin d'atteindre les niveaux

d'atténuation élevés requis avec cette limitation, les valeurs des inductances de filtrage augmentent et conduisent à un filtre volumineux et coûteux généralement composé de plusieurs étapes de filtrage (Fig.7).

Par ailleurs, deux normes internationales sur la compatibilité électromagnétique, couvrant la gamme d'harmoniques allant jusqu'à 2 kHz, sont applicables dans le cas des chargeurs de VE. D'une part, la CEI 61000-3-2 (classe A) définit les limites des émissions de courants harmoniques pour les équipements qui absorbent des courants d'entrée jusqu'à 16 A_{RMS} par phase, et destinés à être connectés aux réseaux de distribution basse tension. D'autre part, la CEI 61000-3-12 complète la norme précédente en définissant les limites des courants harmoniques pour des courants d'entrée allant de 16 A_{RMS} à 75 A_{RMS} par phase. Pour un constructeur automobile, les chargeurs embarqués sont limités par leur taille, leur poids et surtout leur coût. Cela conduit à un certain nombre de limitations telles qu'une faible inductance de filtrage, un nombre réduit de capteurs ainsi que la réutilisation de parties du groupe motopropulseur.

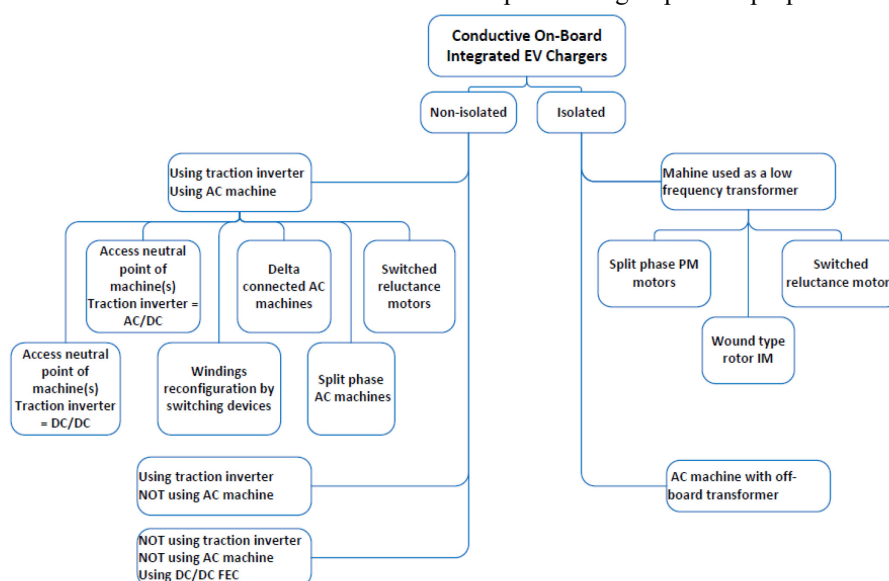


Figure 6 : Classification des chargeurs embarqués et intégrés à la chaîne de traction [4]

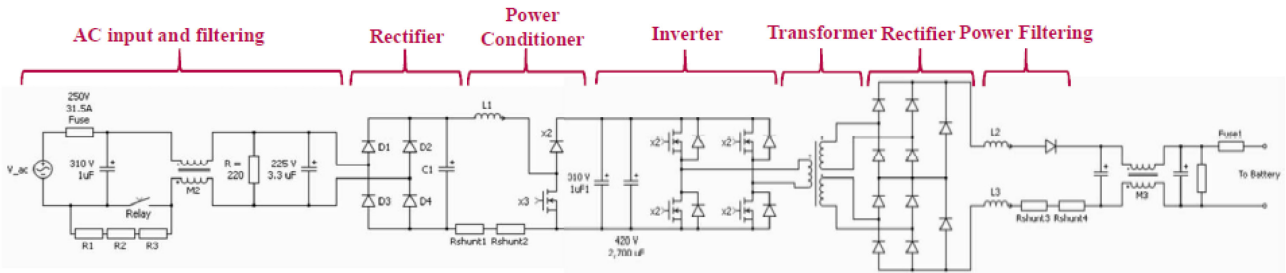


Figure 7 : Nissan Leaf : topologie du chargeur isolé

Avec le large déploiement des VE, les normes précitées sont soumises à une évolution future couvrant une bande de fréquences plus large et des limites harmoniques plus strictes. Par conséquent, les topologies de chargeurs de batterie doivent être pensées pour améliorer considérablement la qualité du courant tiré du réseau.

d'entrée et de correction du facteur de puissance de type élévateur de tension, autrement dit Boost, suivi d'un onduleur. La sortie de l'onduleur est caractérisée par une isolation galvanique, sous forme d'un transformateur à deux enroulements secondaires, pour isoler l'étage primaire connecté au réseau de la sortie du chargeur. Chaque enroulement secondaire alimente un pont redresseur à base de diodes. Les tensions en sortie de ces redresseurs sont additionnées pour former la tension continue DC imposée en sortie du chargeur et adaptée à la tension de la batterie.

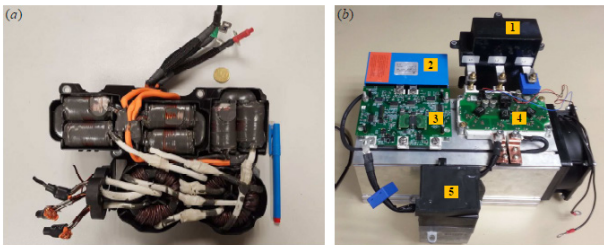


Figure 8 : (a) Inductances de filtrage du chargeur de la Renault ZOE. (b) 1- Condensateur de filtrage de mode différentiel, 2- Condensateur du bus DC, 3- Onduleur de traction triphasé, 4- Redresseur actif triphasé, 5- Inductance de filtrage supplémentaire.

2.2. Exemples de chargeurs de batteries pour VE

Dans cette section nous présenterons quelques exemples de chargeurs à cordon embarqués à bord de VE commercialisés. Les VE étant commercialisés dans divers pays, leurs chargeurs doivent souvent s'adapter à différents niveaux de tensions des réseaux électriques des pays en question. C'est la raison pour laquelle les chargeurs peuvent inclure deux types de fonctionnalités : abaisseur et élévateur de tension.

2.2.1. Nissan Leaf : Chargeur embarqué autonome et isolé du réseau

Dans le cas de la Nissan Leaf, le chargeur autonome embarqué est isolé (isolation galvanique) du réseau électrique [8].



Figure 9 : (a) Nissan Leaf 2013 (b) Carter du chargeur

La Fig.8 montre le carter du chargeur et la fig. 9 la topologie associée à ce convertisseur de puissance. Ce dernier est composé d'un étage d'entrée, connecté au réseau électrique alternatif monophasé, capable d'assurer les fonctions de redressement de la tension

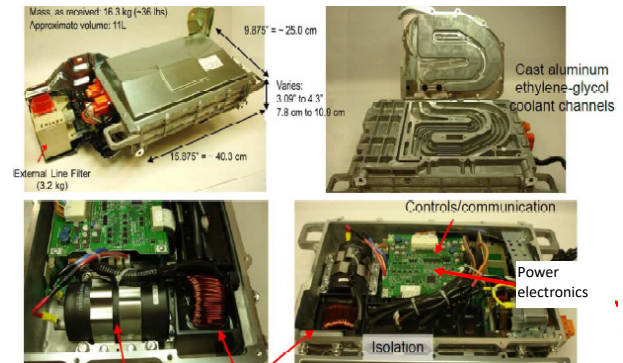


Figure 10 : Composants du chargeur embarqué de la Nissan Leaf [5]

La Fig.10 présente les constituants du chargeur capable d'assurer une charge monophasée lente allant de 3,6 kW à 6,6 kW. Un autre convertisseur DC/DC séparé et complètement autonome est placé à bord du VE et utilisé pour la charge rapide de 50 kW à l'aide d'une prise de courant de type CHAdeMO.

2.2.2. BMW i3 : Chargeur embarqué et isolé du réseau

Le véhicule électrique BMW i3 est équipé d'un chargeur embarqué isolé du réseau électrique.



Figure 11 : (a) BMW i3 2016. (b) Carter du chargeur

Le carter donnant une indication de volume, les dispositions internes des constituants du chargeur et les technologies employées sont illustrés à la Fig.12. Ce chargeur est adapté à une charge de puissance 3,7 kW -

7,4 kW ou 11 kW. Un chargeur rapide DC/DC (50 kW) est vendu en option avec le VE.

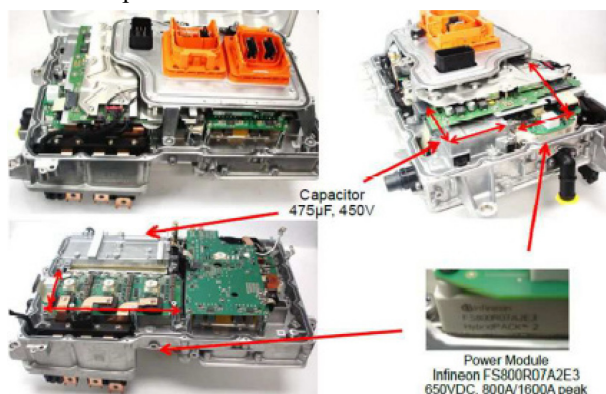


Figure 12 : Composants du chargeur de la BMW i3 [6]

2.2.3. BYD: Chargeur embarqué, intégré à la chaîne de traction et non-isolé du réseau

Il s'agit d'un chargeur intégré à la chaîne de traction sans isolation galvanique du réseau électrique par Build Your Dreams (BYD) [9]. Il équipe le VE «e6» de BYD illustré à la Fig.13 (a). Il réutilise l'onduleur de tension bidirectionnel de la chaîne de traction en tant que redresseur triphasé assurant la correction du facteur de puissance de type élévateur de tension, Boost PFC, pendant la charge.

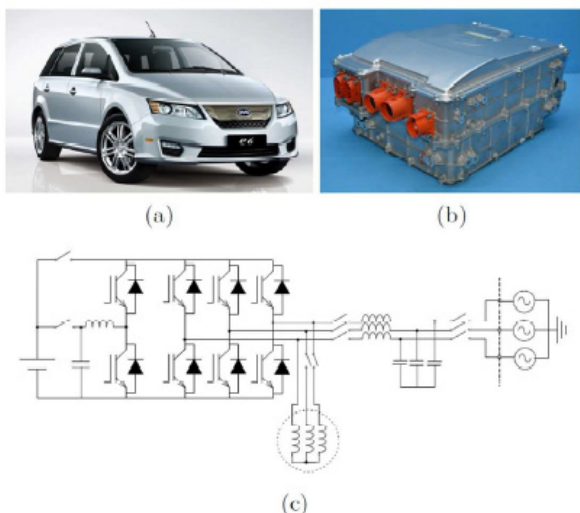


Figure 13 : (a) BYD e6 2015. (b) Carter du chargeur. (c) Topologie du chargeur [7]

Cependant, les enroulements statoriques de la machine électrique ne sont pas utilisés pendant la recharge mais plutôt déconnectés à l'aide de relais (Fig.13 (c)). Étant donné que le chargeur doit être connecté à des réseaux électriques avec une large plage de tensions d'entrée, un convertisseur DC/DC abaisseur de tension, dit Buck, est présent en sortie du PFC, pour garantir des capacités d'abaissement de tension en cas de besoin.

2.2.4. SOFRACI: Chargeur embarqué, intégré à la chaîne de traction et non-isolé du réseau

SOFRACI est synonyme d'un onduleur à fort rendement énergétique avec un chargeur intégré. Il s'agit d'un projet mis en place par le fournisseur automobile Français Valéo [11].

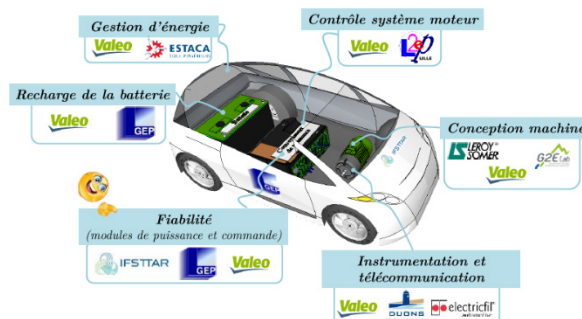


Figure 14 : Partenaires du projet Sofraci

Ce projet vise à développer un système de conversion de puissance qui permet la propulsion et la recharge d'un véhicule électrique tout en optimisant l'utilisation de tous les éléments du groupe motopropulseur. Le système proposé utilise les enroulements statoriques de la machine synchrone à aimants permanents pendant la recharge et ne nécessite aucun type de reconfiguration (absence de relais) entre les opérations de traction et de recharge.

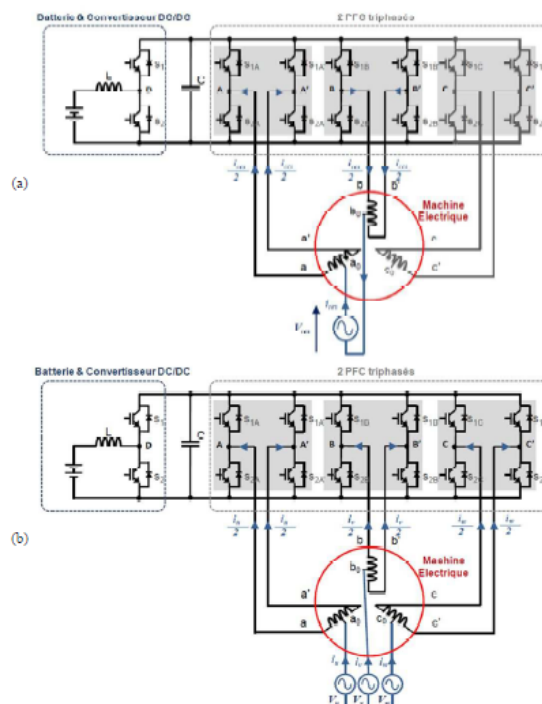


Figure 15 : Topologie du chargeur issu du projet SOFRACI. (a) Configuration en charge monophasée. (b) Configuration en charge triphasée [10]

De plus, la structure présentée à la Fig.15 convient à tous les types de réseaux d'alimentation (monophasés et triphasés). Afin de recharger la batterie, il est possible d'utiliser la structure de l'électronique de puissance comme convertisseur AC/DC pour redresser les courants et les tensions du secteur. Dans ce mode de

fonctionnement, les enroulements de la machine électrique sont utilisés comme inductances de filtrage. Le convertisseur abaisseur de tension de type DC/DC, Buck, adapte le niveau de tension en sortie du redresseur à celui des batteries.

2.2.5. Renault ZOE : Chargeur embarqué, intégré à la chaîne de traction et non-isolé

La Renault ZOE est équipée du chargeur nommé Caméléon [12]. Il s'agit d'un chargeur embarqué, intégré à sa chaîne de traction et ne présentant pas d'isolation galvanique vis-à-vis du réseau électrique. Il utilise à la fois l'onduleur de traction et les enroulements de la machine électrique pendant la recharge. Il est dit Caméléon en raison de sa capacité à s'adapter à la fois à une recharge monophasée lente à domicile (3,7 kW et 7,4 kW) et à une recharge triphasée rapide (11 kW, 22 kW et 43 kW) en utilisant des bornes de recharge publiques sans avoir recours à des relais pour la gestion de la reconfiguration.

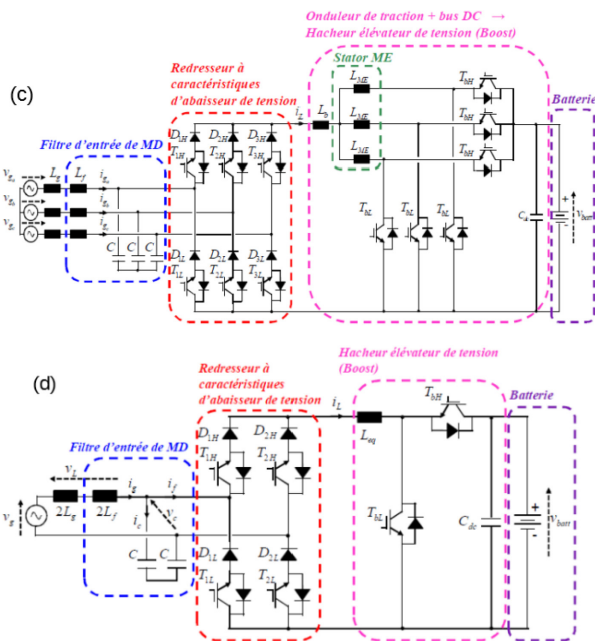


Figure 16 : (a) Renault Zoe ZE 2013. (b) Carter du chargeur dit Caméléon. (c) Topologie du chargeur pour une recharge de type triphasée. (d) Topologie du chargeur pour une recharge de type monophasée.

La topologie du chargeur et son carter mécanique sont illustrés à la Fig.16. La topologie du chargeur est constituée d'un redresseur triphasé commandé, unidirectionnel en courant dont le fonctionnement permet d'abaisser la tension suivie, pour simplifier, d'un hacheur élévateur de tension. La structure globale du

chargeur (Fig.16 (c)) utilise les enroulements statoriques de la machine électrique et l'onduleur de traction en tant que hacheur élévateur de tension afin d'adapter le niveau de tension du réseau d'alimentation auquel le système est connecté à celui de la batterie suivant l'état de charge de cette dernière. L'étage d'entrée est un redresseur présentant finalement les mêmes fonctionnalités qu'un hacheur abaisseur. Afin d'éviter tout risque lié au développement d'un couple au niveau de la machine électrique à l'arrêt, les bras d'onduleur, configurés pour un fonctionnement en hacheur élévateur de tension, ne sont pas entrelacés et reçoivent des commandes identiques. Ainsi, pour une charge monophasée, la topologie équivalente est celle présentée à la Fig.16 (d). L'inductance équivalente L_{eq} est définie par la mise en parallèle des enroulements de la machine associés aux trois bras du Boost.

3. Infrastructure et bornes de recharge

La norme SAE J1772 définit six niveaux de recharge dont trois sont employés actuellement en Amérique du Nord (Tableau II).

À l'heure actuelle, seules les normes CHAdeMO et SAE J1772 « Combo » prévoient une recharge rapide. Parallèlement, le constructeur Tesla utilise un système de recharge rapide en DC réservé aux voitures de sa marque et appelé « Supercharger ».

Tableau 2 : Niveaux de recharge [13]

	Niveau 1	Niveau 2	Recharge rapide
Tension	120 V	208 ou 240 V	de 200 à 450 V
Type de courant	CA	CA	CC
Puissance utile	1,4 kW	7,2 kW	50 kW
Puissance maximale	1,9 kW	19,2 kW	150 kW
Temps de recharge^a	12 h ^a	3 h ^a	20 min ^b
Connecteur	J1772	J1772	J1772 "Combo", CHAdeMO et "Supercharger"

a. temps de recharge d'une batterie de 16 kWh complètement déchargée, à la puissance de charge utile
 b. temps de recharge à 80% de la pleine charge, soit 12 kWh. La recharge rapide ne peut être soutenue jusqu'à la pleine charge.

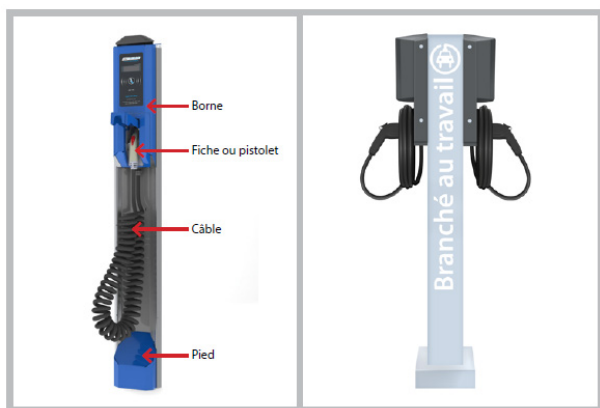


Figure 17 : borne de recharge ; borne double

Les trois niveaux de recharges les plus utilisés sont caractérisés par :

- 1) **Charge de niveau 1** : méthode de recharge AC la plus lente.

Tous les VE sont équipés d'un chargeur AC/DC embarqué de niveau 1 qu'il suffit de brancher à une prise de courant ordinaire (Une prise CSA 5-20R (dérivation de 20 A) est requise si celle-ci est réservée à la recharge de VE).

La recharge de niveau 1 ne nécessite pas de borne de recharge à proprement parler. Elle exige un câble de charge de niveau 1 (CSA 5-15R) [13].

- 2) **Charge de niveau 2** : méthode de recharge AC plus rapide que le niveau 1

Ce niveau se base également sur l'emploi du chargeur AC/DC embarqué dans le VE mais conçu pour des puissances plus élevées.

Tesla et Renault offrent, par exemple, des chargeurs embarqués de 10 à 20 kW et de 22 à 43 kW, respectivement. A savoir que la durée de recharge ne dépend pas uniquement des caractéristiques du chargeur mais également de la puissance de la borne [13].

La recharge de niveau 2 nécessite une borne de recharge fixe alimentée par un circuit de dérivation distinct à 208 ou à 240 V. Tous les véhicules électriques vendus en Amérique du Nord intègrent un socle de recharge SAE J1772 (Fig.18 & 19), à l'exception des Tesla qui nécessitent un adaptateur [13].



Figure 18 : prise mobile J1772 et J1772 « Combo » [13]



Figure 19 : socle de recharge J1772 et J1772 « Combo » [13]

- 3) **Charge de niveau 3** : charge rapide en DC avec chargeur externe au VE

Les principales différences que présente la recharge en DC par rapport à la recharge AC sont l'utilisation d'un chargeur dans la borne au lieu du convertisseur embarqué dans le VE et la puissance de recharge supérieure. La borne fait passer un courant continu directement dans la batterie du véhicule et doit donc adapter la tension et l'intensité du courant de charge aux caractéristiques propres du VE. La recharge rapide en DC est encadrée par les normes nord-américaine SAE J1772 « Combo » et japonaise JEVS G105-1993. Les bornes de recharge rapide en DC sont habituellement compatibles avec ces deux normes. Tous les constructeurs automobiles adhèrent à l'une de ces normes, à l'exception de Tesla qui a mis au point une borne plus performante, mais qui offre des adaptateurs CHAdeMO sur demande (Fig. 20).

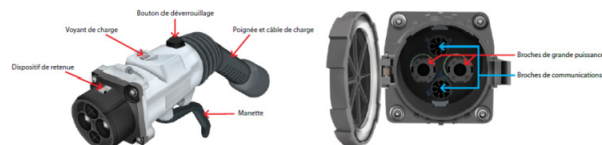


Figure 20 : prise et socle CHAdeMO [13]

La configuration de la prise mobile et du socle de recharge du VE (qui forment ensemble le connecteur) ainsi que le protocole de communications entre le VE et la borne diffèrent selon la norme, mais les principes sont les mêmes. Par exemple, les deux types de connecteur sont équipés de deux broches de puissance (positive et négative), d'une broche de continuité des masses, d'une broche de détection de connexion et d'une broche de communication.

La puissance de recharge étant gérée par un appareil externe, celui-ci doit prendre en compte certains paramètres de la batterie installée dans la voiture (état de charge, état de santé, niveau de tension, etc.). Le protocole de communications régit le partage de données telles que les plages de tension et le courant admissible dans la batterie, et le chargeur incorporé à la borne suit les valeurs de consigne de tension et de courant provenant du VE.

La puissance maximale de recharge prévue par la norme CHAdeMO est de 62 kW, soit 125 A à 500 V en DC, tandis que la norme J1772 « Combo » prévoit une puissance maximale de 100 kW, soit 200 A à 500 V. En pratique, très peu de batteries atteignent les 500 V et les bornes de recharge combinent habituellement les deux connecteurs normalisés et limitent la puissance nominale à 50 kW. Quant aux bornes « Supercharger » de Tesla, elles peuvent atteindre 120 kW, et le

constructeur annonce des puissances encore plus élevées à venir (Fig.21 et 22) [13].

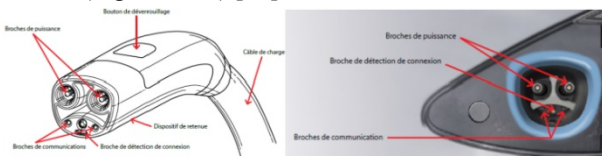


Figure 21 : prise et socle d'un Supercharger de Tesla [13]

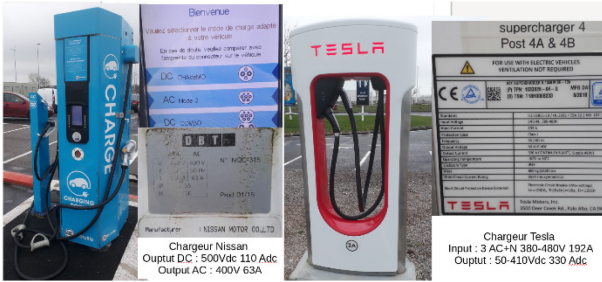


Figure 22 : Chargeurs présents sur les parking Eurotunnel

La majorité des batteries de VE ont une tension nominale d'environ 350 V qui n'exploite pas le plein potentiel des bornes de recharge rapide.

Le tableau 3 ci-dessous montre une équivalence entre les niveaux de recharge aux US et en Europe pour les différents niveaux de tension.

Une borne de recharge (Fig.17) se présente généralement sous la forme d'un appareil fixe raccordé

directement à un tableau de distribution électrique ou, parfois, branché sur une prise de courant. La borne comprend un ou plusieurs câbles de charge munis d'une prise mobile qui rappelle un pistolet à essence et s'utilise d'une manière analogue : il suffit de la brancher au socle de recharge du VE pour recharger la batterie. La borne est équipée de voyants qui indiquent si le VE est branché et s'il est en recharge. Elle peut aussi comprendre un bouton qui commande ou arrête la recharge. Certaines bornes intègrent des fonctionnalités additionnelles : compteur d'énergie fournie, système de paiement électronique, contrôle d'accès par carte, accès Internet, etc.

Pour la sécurité des utilisateurs, les bornes de recharge intègrent un dispositif de surveillance de courants de fuites qui réduit les risques d'électrisation. Par ailleurs, l'utilisateur n'est pas exposé à des tensions ou à des courants dangereux, puisque les broches de la prise mobile ne sont mises sous tension qu'une fois celle-ci soit correctement insérée dans le socle de recharge du VE et une fois la communication établie entre le véhicule et la borne de recharge. En outre, le connecteur est muni de joints d'étanchéité qui protègent les éléments sous tension des intempéries. Enfin, un dispositif supplémentaire empêche tout débranchement accidentel par traction sur le câble. Des exemples de prises et de socles conformes aux normes susmentionnées sont donnés aux Fig. 18 à 21.

Tableau 3 : Puissance de charge et type d'interface avec le réseau électrique [2]

Power Level Types	Charger Location	Typical Use	Energy Supply Interface	Expected Power Level	Charging Time	Vehicle Technology
Level 1 (Opportunity) 120 Vac (US) 230 Vac (EU)	On-board 1-phase	Charging at home or office	Convenience outlet	1.4kW (12A) 1.9kW (20A)	4–11 hours 11–36 hours	PHEVs (5-15kWh) EVs (16-50kWh)
Level 2 (Primary) 240 Vac (US) 400 Vac (EU)	On-board 1- or 3-phase	Charging at private or public outlets	Dedicated EVSE	4kW (17A) 8kW (32 A) 19.2kW (80A)	1–4 hours 2–6 hours 2–3 hours	PHEVs (5-15 kWh) EVs (16-30kWh) EVs (3-50kWh)
Level 3 (Fast) (208-600 Vac or Vdc)	Off-board 3-phase	Commercial, analogous to a filling station	Dedicated EVSE	50kW 100kW	0.4–1 hour 0.2–0.5 hour	EVs (20-50kWh)

Tableau 4 : Caractéristiques de recharge de certains VE et PHEV [2]

	Battery Type and Energy	All-Electric Range	Connector Type	Level 1 Charging		Level 2 Charging		DC Fast Charging	
				Demand	Charge Time	Demand	Charge Time	Demand	Charge Time
Toyota Prius PHEV(2012)	Li-Ion 4.4kWh	14 miles	SAE J1772	1.4kW (120V)	3 hours	3.8kW (240V)	2.5 hours	N/A	N/A
Chevrolet Volt PHEV	Li-Ion 16kWh	40 miles	SAE J1772	0.96–1.4 kW	5–8 hours	3.8kW	2–3 hours	N/A	N/A
Mitsubishi i-MiEV EV	Li-Ion 16kWh	96 miles	SAE J1772 JARI/TEPCO	1.5kW	7 hours	3kW	14 hours	50kW	30 minutes
Nissan Leaf EV	Li-Ion 24kWh	100 miles	SAE J1772 JARI/TEPCO	1.8kW	12–16 hours	3.3kW	6–8 hours	50 + kW	15-30 minutes
Tesla Roadster EV	Li-Ion 53kWh	245 miles	SAE J1772	1.8kW	30+ hours	9.6–16.8 kW	4–12 hours	N/A	N/A

4. Perspectives et technologies futures

Nous avons constaté (Fig.7) que le filtrage passif et l'isolation galvanique (lorsque cette dernière est employée) constitue la majeure partie du poids et du volume du chargeur. Afin de réduire la taille des composants passifs volumineux, une augmentation de la fréquence de découpage s'avère nécessaire.

Les premières générations de VE avaient recours aux IGBT à base de Silicium et présentaient des fréquences de découpage relativement faibles (dizaine de kHz). Avec l'émergence des composants dits Grand Gap, notamment le Carbure de Silicium (SiC) et le Nitrure de Gallium (GaN), capables d'assurer des commutations à des fréquences plus élevées (centaines de kHz et quelques MHz respectivement), des études sont menées pour intégrer ces composants (le SiC dans un premier temps et le GaN une fois suffisamment mature) dans les futures générations de chargeurs.

Par ailleurs, les tendances actuelles consistent à explorer l'augmentation de la puissance de recharge, embarquée ou sur chargeur externe, pour réduire davantage les durées de recharge. L'augmentation de la puissance peut être réalisée soit à travers l'augmentation des niveaux de courants, soit par l'augmentation du niveau de tension de la batterie. Aujourd'hui les niveaux de tension des batteries sont en moyenne autour des 350 V. L'Institut français de recherche partenariale publique-privée et de formation dédié aux mobilités durables, VEDECOM, étudie les impacts de l'augmentation de la tension du bus DC (des niveaux s'élevant à 800Vdc sont étudiés) à bord des VE. Un exemple de thèse lancée à ce sujet est référencé plus bas : [14].

Porsche commercialise depuis peu un Taycan électrique à batterie 800V annonçant une charge rapide sur chargeur spéciaux (pour l'instant disponibles seulement dans les centres Porsche) à 270 kW, soit 100 km d'autonomie supplémentaire en 5 mn de charge.

Les chargeurs du réseau Ionity permettent de charger également jusqu'à 350 KW, en 800VDC. Pour profiter des chargeurs 800V, les constructeurs de véhicules à batteries 350V réfléchissent à un réagencement de 2 « sous-batteries » (parallèle→série) pour passer en 700V. D'autre part, les constructeurs de véhicules 800V (véhicules haut de gamme ayant moins de contraintes de coût) hésitent entre dévolteur embarqué ou réagencement de 2 « sous-batteries » (série→parallèle) pour pouvoir utiliser les chargeurs de batteries 400V.

La réduction des durées de recharge et l'augmentation de l'autonomie peuvent également s'effectuer à travers l'augmentation de la capacité des batteries haute tension embarqués, soit en embarquant plus de cellules soit en travaillant les technologies de cellules afin d'améliorer leurs capacités. L'article consacré aux batteries traite ces divers aspects.

5. Conclusion

Avec le large déploiement de véhicules purement électriques et hybrides rechargeables, les niveaux d'harmoniques et des émissions de courants de mode commun autorisés ont tendance à devenir plus strictes. Les futures normes CEM vont combler l'écart entre les émissions actuelles à basses fréquences et à hautes fréquences en couvrant la bande de fréquence de 2 kHz à 150 kHz. Ainsi, l'intégration de ces limitations dans le processus de conception des chargeurs sera inévitable.

Les niveaux de puissances de charges, embarqués ou via des chargeurs externes DC, vont continuer d'augmenter jusqu'au jour où les avancées technologiques permettront de rendre les véhicules électriques aussi simples d'usage que les véhicules thermiques.

La possibilité de charge rapide et sa bonne distribution sur le territoire augmenterait l'attractivité du véhicule électrique en réduisant son besoin d'autonomie et donc son coût, la batterie représentant actuellement de 30 à 50 % du coût de fabrication d'un véhicule.

Références

- [1] C. Saber, « Analysis and optimization of the conducted emissions of an on-board charger for electric vehicles, » Thèse CIFRE soutenue à l'Université Paris Saclay et préparée à l'École Normale Supérieure de Paris Saclay (ENS Cahan) en collaboration avec Renault S.A.S., HAL Id: tel-01646796, Nov. 2017.
- [2] M. Yilmaz, and P. T. Krein, « Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles, » in IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 28, DOI: 10.1109/TPEL.2012.2212917, No. 5, pp. 2151-2169, May 2013.
- [3] S. Haghbin, S. Lundmark, M. Alaküla, and O. Carlson, "Grid-connected integrated battery chargers in vehicle applications: review and new solutions," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 2, pp. 459-473, Février 2013.
- [4] N. Sakr, D. Sadarnac, and A. Gascher, « A review of on-board integrated chargers for electric vehicles, » 16th European Conference on Power Electronics and Applications, DOI: 10.1109/EPE.2014.6910865, pp. 1-10, Août 2014.
- [5] T. Burress, « Benchmarking EV and HEV Technologies, » DOE Vehicle Technologies Office 2014 Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting, Oak Ridge National Laboratory, Projet ID: APE006, Juin 2014.
- [6] T. Burress, « Benchmarking EV and HEV Technologies, » DOE Vehicle Technologies Office 2015 Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting, Oak Ridge National Laboratory, Projet ID: EDT006, Juin 2016.

- [7] N. Sakr, « Fast on-board integrated chargers for electric vehicles, » Thèse CIFRE soutenue à l'Université Paris Saclay et préparée à Centrale-Supélec en collaboration avec Renault S.A.S., Gif-sur-Yvette, Mai 2016.
- [8] K. Yoshimoto, « Electric power converter with transformer, » Nissan Motor Co., Brevet US 8 917 053 B2, Dec. 2014.
- [9] Shenzhen Byd Auto R&D Company Ltd., « Charging/discharging control system of electric vehicle, » Brevet CN202455130 U, Sept. 2012.
- [10] S. Lacroix, « Modélisation et commande d'une chaîne de conversion pour véhicule électrique intégrant la fonction de charge des batteries, » Thèse soutenue à l'Université Paris Sud, Mai 2013.
- [11] L. De Sousa, and B. Bouchez, « Combined electric device for powering and charging, » Valeo, Patent WO2010057892 A1, 2010.
- [12] S. Loudot, B. Briane, O. Ploix, and A. Villeneuve, « Fast charging device for an electric vehicle » Renault, Brevet WO2010103063 A1, Sept. 2010.
- [13] Hydro Québec, « Bornes de recharge pour véhicules électriques - Guide technique d'installation », 2ème édition, Août 2015.
- [14] D. Oustad, « Etude de l'intérêt de la montée en tension du bus DC pour minimiser les pertes dans l'onduleur d'un véhicule électrique », thèse soutenue à l'Université Paris Saclay et préparée à l'Ecole Normale Supérieure de Paris Saclay, Mars 2018.
- [15] A. Kolli, « Analyse d'une architecture de puissance dédiée aux modes traction-recharge dans un véhicule électrique. Optimisation de la commande et fonctionnement en mode dégradé », thèse préparée et soutenue à l'Université Paris-Sud 11, Janvier 2014.

ESTIMATION DE L'INDUCTANCE D'UNE BOBINE DROITE CYLINDRIQUE

Jean-Charles JACOB Agrégé de physique en classe préparatoire MPSI, Lycée Saint Exupéry Mantes La Jolie
 Dominique JACOB Agrégé de génie Electrique, IUT GEII Poitiers

Résumé : L'estimation de l'inductance d'une bobine droite ayant un noyau magnétique cylindrique nécessite le recours à des méthodes numériques. Ici on tente d'établir une formule analytique en utilisant le potentiel scalaire magnétique. Des mesures expérimentales étayent la modélisation.

1. Objectif ET position de l'étude

Pour calculer l'inductance d'une bobine droite sans noyau magnétique, Nagaoka a proposé en 1909 une méthode empirique [1]. Pour tenir compte de la présence du noyau magnétique il faut déterminer la réluctance de l'entrefer entre les pôles. Le colonel McLyman propose pour cela une relation empirique [2]. On va étendre cette relation, sans modéliser la répartition exacte du champ magnétique dans l'espace mais en ayant recours au potentiel scalaire magnétique crée par les pôles [3]. Il faut seulement prendre en compte la géométrie des pôles qui sont des cylindres. Les calculs restent simples et l'accord avec la réalité semble acceptable.

1.1. Bobine sur un circuit magnétique fermé

Une bobine est constituée par des spires enroulées sur un circuit magnétique qui doit normalement être fermé (cf. figure 1) pour assurer la fermeture des lignes de champ.

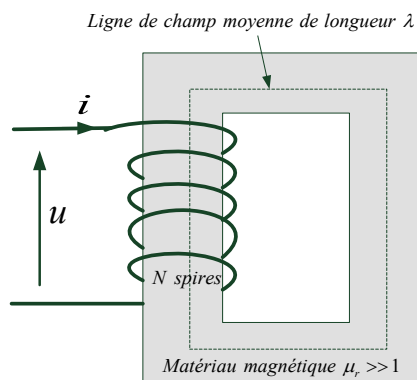


figure 1

On note :

- N : le nombre de spire
- S : la surface d'une spire
- i : le courant dans la bobine
- ϕ : le flux dans une spire
- B : le champ magnétique crée par la bobine en un point de l'espace
- $\mu = \mu_0 \mu_r$: la perméabilité magnétique du matériau en un point du circuit magnétique (μ_0 est la

perméabilité du vide et μ_r la perméabilité relative du matériau)

λ : longueur du circuit magnétique fermé (longueur moyenne des lignes de champ)

L'inductance L est définie par $N \cdot \phi = L \cdot i$ avec

$$\phi = \iint_{\text{Surfacespire}} \vec{B} \cdot \vec{dS}$$

Si le champ magnétique est uniforme sur une section droite du circuit magnétique, l'application du théorème d'Ampère sur la ligne de champ moyenne conduit à la loi d'Hopkinson : $N \cdot i = \mathfrak{R} \cdot \phi$

$\mathfrak{R} = \frac{\lambda}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S}$ est la réluctance du circuit magnétique, elle ne dépend que du circuit magnétique.

Compte tenu de $N \cdot \phi = L \cdot i$ et $N \cdot i = \mathfrak{R} \cdot \phi$ il vient

$$L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot S}{\lambda}$$

1.2. Bobine droite

La bobine droite est un solénoïde bobiné sur un matériau magnétique rectiligne (cf. figure 2). Le circuit magnétique est ouvert, on l'utilise pour la réception des ondes radio et est alors nommé : cadre ferrite. Pour réaliser un circuit accordé il importe de connaître l'inductance de cette bobine.

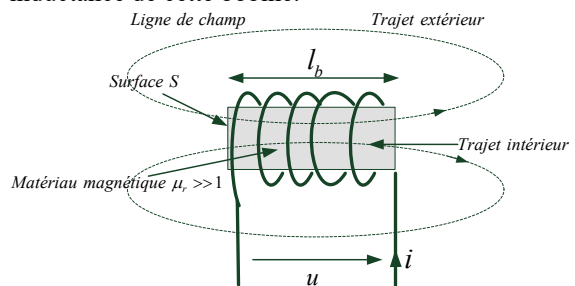


figure 2

Les lignes de champ définissent le circuit magnétique. Il existe une portion du circuit magnétique à l'intérieur de la bobine. Sur cette portion du circuit magnétique, de longueur l_b et de section S le champ est uniforme. Cette longueur du circuit magnétique possède donc la réluctance $\mathfrak{R} = \frac{l_b}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S_{int}}$

La portion de circuit magnétique à l'extérieur est indéfinie. On ne peut pas définir sa longueur ni sa surface mais on peut attribuer la réluctance \mathfrak{R}_{ext} à

cette partie du circuit magnétique. L'inductance de la bobine est alors $L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}_{ext_{int}}}$.

Pour un solénoïde de longueur infinie le champ magnétique φ_{ext} est nul à l'extérieur, ainsi le flux φ_{ext} à l'extérieur est nul : $\varphi_{ext} = 0$. Alors si on considère une partie de longueur l_b et possédant N spires on a : $N.i = \mathfrak{R}_{int} \cdot \varphi + \mathfrak{R}_{ext} \varphi_{ext} = \mathfrak{R}_{int} \cdot \varphi$ d'où l'inductance d'une longueur l_b de bobine comportant N spires sur cette longueur : $L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}_{int} \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot S}{l_b}}$

Pour une bobine « longue », on respecte $\sqrt{S} \ll l_b$ et on peut négliger les effets de bord alors on peut appliquer, avec une bonne approximation, la relation obtenue pour un solénoïde de longueur infinie : $L = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot S}{l_b}$ à cette bobine droite « longue ».

L'inductance est directement proportionnelle à la perméabilité magnétique relative μ_r du matériau qui est mal connue. On ne connaît en général que son ordre de grandeur, $100 \ll \mu_r \ll 1000$ pour la ferrite et $\mu_r \rightarrow \approx 10^5$ pour le mu-métal. On sait toujours que $\mu_r \gg 1$

Pour une bobine « longue », l'inductance est : $L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}_{ext_{int}} \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot S}{l_b} \frac{N^2}{\mathfrak{R}_{int}}}$ avec $\mathfrak{R} \frac{l_b}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S_{int}}$. C'est-à-dire que, pour une bobine « longue » la réductance du trajet des lignes de champ à l'extérieur de la bobine est négligeable : $\mathfrak{R}_{ext} \ll \mathfrak{R}_{int}$

Mais si la longueur l_b de la bobine et la longueur l_n du noyau magnétique ne sont pas égales, la répartition du champ magnétique est différente, il existe un champ magnétique non nul à l'extérieur de la bobine, cette relation n'est plus applicable. L'inductance dépend de la répartition du champ magnétique dans l'espace donc dépend aussi de la position de la bobine par rapport au centre du noyau.

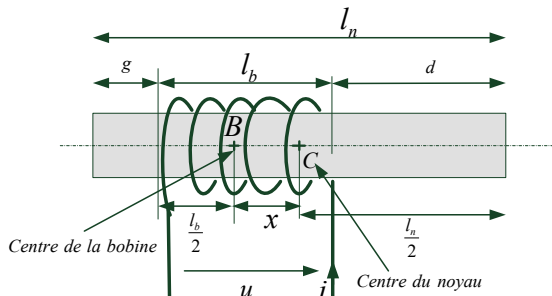


figure 3

On propose ici une modélisation qui permet d'estimer l'inductance d'une telle bobine (cf. figure 3). Naturellement il s'agit d'une estimation de l'ordre de grandeur uniquement car on ne prend pas en compte la répartition exacte du champ magnétique dans l'espace.

La position de la bobine sur le noyau est définie par la distance entre le centre B de la bobine et le centre C du noyau. On note $x = BC$ (cf. figure 3).

On a les relations géométriques suivantes :

$$d + l_b + g = l_n \text{ et } g + \frac{l_b}{2} + x + \frac{l_n}{2} = l_n \text{ d'où : } d = \frac{l_n - l_b}{2} + x \text{ et } g = \frac{l_n - l_b}{2} - x$$

Le noyau reste à l'intérieur de la totalité de la bobine si $x < \frac{l_n - l_b}{2}$

La réductance associée aux lignes de champ à l'extérieur de la bobine et entre les pôles dépend de x et notée $\mathfrak{R}(x)$

1.3. Modélisation de la répartition des lignes de champ

Pour estimer l'inductance il faut modéliser la répartition du champ magnétique créé par la bobine.

Comme on a vu, à l'intérieur de la bobine, de longueur l_b et de section S le champ est uniforme. Cette longueur du circuit magnétique possède donc la réductance $\mathfrak{R} \frac{l_b}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S_{int}}$

Il existe des lignes de champ dont la géométrie ne dépend pas de la position relative du noyau par rapport à la bobine. Ce sont les lignes qui sortent par les pôles à l'extrémité du noyau, ces lignes créent le flux axial φ_a et la réductance entre les deux faces du noyau est notée \mathfrak{R}_a .

Il existe aussi des lignes de champs qui sortent radialement du noyau magnétique, ces lignes créent le flux axial φ_r et la réductance entre les deux faces du noyau est notée $\mathfrak{R}(x)$.

La modélisation est celle de la figure 4.

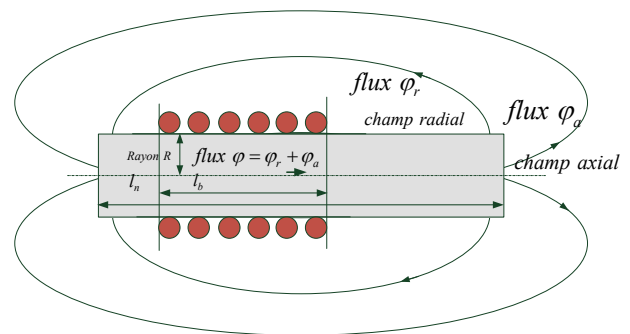


figure 4

Selon cette modélisation on ne considère pas de lignes de champ qui sortent axialement rentrent radialement dans le noyau. Ainsi le flux total dans la bobine est $\varphi = \varphi_r + \varphi_a$. Les deux réductances $\mathfrak{R}(x)$ et \mathfrak{R}_a sont en parallèles.

Cette modélisation est valide uniquement quand le bobinage est centré sur le noyau (cas $x = 0$)

car alors par raison de symétrie les lignes de champs qui « sortent » axialement du pôle Nord « rentrent » axialement par le pôle Sud et de même pour les lignes de champs « radiales » (cf. figure 4 avec $x = 0$).

Les lignes de champ du flux axial φ_a passent dans la totalité du noyau dont la réluctance est $\mathfrak{R}_B = \frac{l_n}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S}$ et ensuite se referment par l'extérieur

du barreau magnétique dont la réluctance est \mathfrak{R}_a .

Les lignes de champ du flux radial φ_r passent dans seulement une partie du noyau. On nomme \mathfrak{R}_0 la réluctance de cette portion du noyau magnétique, forcément on a : $\mathfrak{R}_0 < \mathfrak{R}_B$. En posant $\mathfrak{R}_1 = \mathfrak{R}_B - \mathfrak{R}_0$ qui est la réluctance de la partie complémentaire du noyau, cela conduit au schéma équivalent électrique de la figure 5.

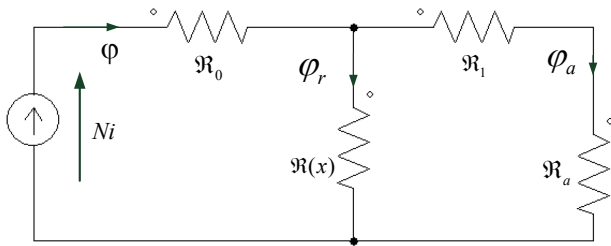


figure 5

1.4. Discussion sur la ligne de champ « moyenne » et la valeur de \mathfrak{R}_0

Si on suppose le champ magnétique réparti uniformément sur la surface radiale, la ligne de champ radial de longueur « moyenne » possède la longueur $l = l_b + \frac{d}{2} + \frac{g}{2}$ à l'intérieur du noyau. La réluctance

de ce trajet est $\mathfrak{R}_0 = \frac{l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S}$ et ensuite les lignes de

champ du flux radial se referment par l'extérieur du barreau magnétique dont la réluctance est $\mathfrak{R}(x)$.

L'inductance propre de la bobine est

$$L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}} \text{ avec } \mathfrak{R} = \mathfrak{R}_0 + \frac{(\mathfrak{R}_a + \mathfrak{R}_1) \cdot \mathfrak{R}(x)}{\mathfrak{R}_1 + \mathfrak{R}_a + \mathfrak{R}(x)} \text{ (cf.}$$

figure 5).

La réluctance du noyau à l'intérieur du

$$\text{bobinage est : } \mathfrak{R}_{\text{int}} = \frac{l_b}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S} = \frac{l_b}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \pi \cdot R^2}$$

$$\text{Et } \mathfrak{R}_0 = \frac{l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S} \text{ avec } l = l_b + \frac{d}{2} + \frac{g}{2} \text{ et}$$

$$d = \frac{l_n - l_b}{2} + x \text{ et } g = \frac{l_n - l_b}{2} - x, \text{ soit } l = \frac{l_n + l_b}{2}$$

De plus la réluctance totale du noyau magnétique est : $\mathfrak{R}_B = \frac{l_n}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S}$

On aboutit alors aux réluctances suivantes :

$$\mathfrak{R}_0 = \frac{l}{l_n} \mathfrak{R}_B = \frac{l_n + l_b}{2 \cdot l_n} \cdot \mathfrak{R}_B \text{ et}$$

$$\mathfrak{R}_1 = \mathfrak{R}_B - \mathfrak{R}_0 = \mathfrak{R}_B - \frac{l_n + l_b}{2 \cdot l_n} \mathfrak{R}_B = \frac{l_n - l_b}{2 \cdot l_n} \mathfrak{R}_B$$

On observe alors que, quand la longueur du noyau augmente, la réluctance équivalente de la bobine

$$\mathfrak{R} = \mathfrak{R}_0 + \frac{(\mathfrak{R}_a + \mathfrak{R}_1) \cdot \mathfrak{R}(x)}{\mathfrak{R}_1 + \mathfrak{R}_a + \mathfrak{R}(x)} \text{ augmente comme}$$

$$\mathfrak{R}_0 = \frac{l_n + l_b}{2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot S} \text{ et donc l'inductance de la bobine}$$

$$L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}} \text{ diminue. Et on sait que physiquement,}$$

l'inductance augmente asymptotiquement vers une valeur maximale quand la longueur du noyau augmente. Ce modèle est donc en contradiction avec l'expérience quand la longueur du noyau est grande par rapport à la longueur du bobinage.

Cependant on imagine que la réluctance \mathfrak{R}_0 doit varier quand la longueur du noyau augmente car le trajet des lignes de champ dans le noyau varie (il nous semble un peu plus long). C'est pourquoi on pourra utiliser ce modèle seulement si l_n et l_b sont du même ordre de grandeur, soit si $l_n - l_b < \approx l_b$.

D'autre part, si la longueur du noyau est grande devant la longueur du bobinage, la réluctance extérieure $\mathfrak{R}_{\text{ext}}$ tend vers 0, et l'inductance de la

$$\text{bobine tend vers } L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}_{\text{int}} + \mathfrak{R}_{\text{ext}}} \rightarrow \frac{N^2}{\mathfrak{R}_{\text{int}}}$$

$$\text{Ainsi la réluctance } \mathfrak{R} = \mathfrak{R}_0 + \frac{(\mathfrak{R}_a + \mathfrak{R}_1) \cdot \mathfrak{R}(x)}{\mathfrak{R}_1 + \mathfrak{R}_a + \mathfrak{R}(x)}$$

tend vers $\mathfrak{R}_{\text{int}}$. On aboutit à : $\mathfrak{R}_0 \xrightarrow{l_n \rightarrow \infty} \mathfrak{R}_{\text{int}}$. On

a donc $\mathfrak{R}_0 \approx \mathfrak{R}_{\text{int}}$ si $l_n \gg l_b$ mais comme on n'a pas d'information rigoureuse sur la variation de \mathfrak{R}_0 en fonction de l_n , on imposera $\mathfrak{R}_0 \approx \mathfrak{R}_{\text{int}}$ dès que $l_n - l_b \gg \approx l_b$.

Pour estimer $\mathfrak{R}(x)$ et \mathfrak{R}_a on va modéliser la répartition du champ entre les pôles grâce au potentiel

scalaire magnétique comme il a été présenté dans la référence [1].

2. Réductance entre les pôles de la bobine droite

2.1. Potentiel scalaire magnétique et réductance d'un entrefer

Un pôle, dont le centre est situé au point O , d'un circuit magnétique qui crée le flux Φ dans le vide est une « charge magnétique ». Ce flux est reparti dans tout l'espace et donc crée le champ magnétique

$B = \frac{\Phi}{4.\pi.r^2}$ au point M tel que $r = OM$. On peut

définir le potentiel scalaire magnétique Ω dû à une source de flux Φ par la relation $\Omega = \frac{\Phi}{4.\pi.r}$ et alors

le champ magnétique est $\vec{B} = -\overrightarrow{grad}(\Omega)$

Cette modélisation donne un moyen de calcul simple du champ magnétique dans le vide en un point situé à l'extérieur et assez loin de la source de flux. On a appliqué ceci pour l'estimation de la réductance d'un entrefer.

Un élément de surface dS , situé au point P , d'un pôle où il existe le champ magnétique $\vec{B}_{(P)}$ orthogonal à la surface (c'est toujours le cas si le pôle est un matériau magnétique ayant une grande perméabilité) peut être modélisé par une charge magnétique infinitésimale $d\Phi = B_{(P)}.dS$ qui crée, au point M

tel que $r = PM$ le potentiel scalaire $d\Omega = \frac{d\Phi}{4.\pi.r} = \frac{B_{(P)}.dS}{4.\pi.PM}$

La réductance d'un entrefer entre deux pôles Nord et Sud est, par définition

$$\mathfrak{R}_{(x)}.\varphi = \int_{\text{pole Nord}}^{\text{pole Sud}} \frac{\vec{B}.d\vec{M}}{\mu_0} \quad \text{où } \varphi = \iint_{\text{Surface du pôle}} \vec{B}.d\vec{S}$$

Comme $\vec{B} = -\overrightarrow{grad}(\Omega)$ il vient :

$$\vec{B}_{(M)}.d\vec{M} = -\overrightarrow{grad}(B).d\vec{M} = -d\Omega \quad \text{d'où :}$$

$$\mathfrak{R}(x) = \frac{1}{\varphi} \int_{\text{Pole Nord}}^{\text{Pole Sud}} \frac{\vec{B}_{(M)}.d\vec{M}}{\mu_0} = \frac{1}{\varphi} \int_{\text{Pole sud}}^{\text{Pole Nord}} \frac{d\Omega}{\mu_0} = \frac{\Delta\Omega}{\mu_0.\varphi}$$

$\Delta\Omega = \Omega(\text{Nord}) - \Omega(\text{Sud})$ est la différence de potentiel magnétique entre le pôle Nord et le pôle Sud.

On approxime le potentiel d'un pôle par le potentiel du point O situé au centre de ce pôle.

$$\Omega(O) = \iint_{\substack{P \in \text{Surface} \\ \text{des poles}}} \frac{B_{(P)}.dS}{4.\pi.PO} \quad \text{Il faut effectuer}$$

l'intégration en tenant compte de **tous** les pôles.

2.2. Réductance pour le champ axial

Ici on ne considère que le champ magnétique axial donc créé sur le disque qui forme l'extrémité du noyau magnétique cylindrique. La répartition du champ magnétique est supposée uniforme sur le disque qui constitue le pôle. Chaque pôle ayant la surface S apparaît alors comme une surface uniformément chargée avec la densité de charge $\frac{\varphi}{S} = B$. Les pôles sont des disques de rayon R ayant la surface $S = \pi.R^2$ et distants de la longueur l_n .

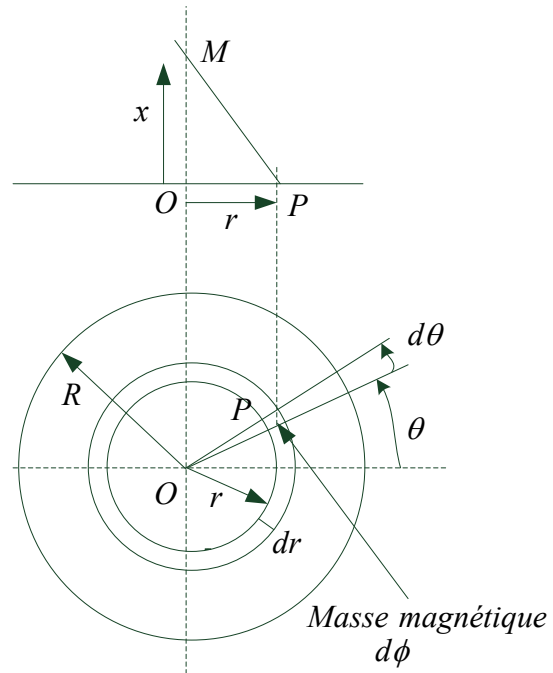


figure 6

Soit un pôle de surface $S = \pi.R^2$ uniformément chargé avec la densité $B = \frac{\varphi}{S}$. On cherche le potentiel en un point M situé sur l'axe du pôle à la distance $OM = x$ du centre O . Chaque point P de la surface du pôle est repéré en coordonnées cylindriques par ses coordonnées (r, θ) .

On présente, figure 6, la position des points considérés.

Chaque élément de surface situé au point P a la surface $dS = r.d\theta.dr$ et porte la charge

$$d\phi = B.dS = B.r.d\theta.dr = \frac{\varphi}{\pi.R^2}r.d\theta.dr$$

Au point M cette charge $d\phi$ placée au point P crée le potentiel $d\Omega(M) = \frac{d\phi}{4.\pi.PM}$ avec

$$PM = \sqrt{r^2 + x^2} \quad \text{et} \quad d\phi = \frac{\varphi}{\pi.R^2}r.d\theta.dr \Rightarrow$$

$$d\Omega(M) = \frac{\varphi \cdot r \cdot d\theta \cdot dr}{4 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \sqrt{r^2 + x^2}} \Rightarrow$$

$$\Omega(M) = \int_{r=0}^R \left[\int_{\theta=0}^{2\pi} \frac{\varphi \cdot r}{4 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \sqrt{r^2 + x^2}} d\theta \right] dr$$

$$= \int_{r=0}^R \frac{2 \cdot \pi \cdot \varphi \cdot r}{4 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \sqrt{r^2 + x^2}} dr = \frac{\varphi}{2 \cdot \pi \cdot R^2} [\sqrt{r^2 + x^2}]_0^R$$

$\Omega(M) = \frac{\varphi}{2\pi \cdot R^2} [\sqrt{r^2 + x^2}]_0^R = \frac{\varphi}{2\pi \cdot R^2} (\sqrt{R^2 + x^2} - x)$
 pour un point de l'axe tel que $OM = x$.

Pour $x = 0$ on obtient le potentiel au centre du pôle : $\Omega(O) = \frac{\varphi}{2\pi \cdot R}$

La réductance est celle entre les deux disques parallèles placées à la distance l_n et chargées uniformément, le pôle Nord (de centre N) avec la densité surfacique $B(Nord) = \frac{\varphi}{S}$ et le pôle Sud (de centre S) avec la densité surfacique $B(Sud) = -\frac{\varphi}{S}$, cf. figure 7.

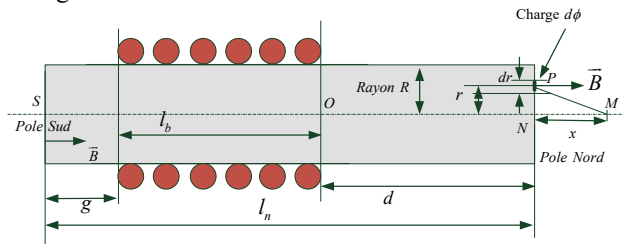


figure 7

Ainsi en superposant les contributions des deux pôles on obtient le potentiel d'un point M situé sur l'axe à la distance $NM = x$ du centre du pôle Nord et $SM = l_n + x$ du centre du pôle Sud

$$\Omega(M) = \frac{\varphi}{2\pi \cdot R^2} (\sqrt{R^2 + x^2} - x)$$

$$- \frac{\varphi}{2\pi \cdot R^2} [\sqrt{R^2 + (l_n + x)^2} - l_n - x]$$

Pour $x = 0$ on obtient le potentiel du centre du pôle Nord :

$$\Omega(N) = \frac{\varphi}{2\pi \cdot R^2} (\sqrt{R^2}) - \frac{\varphi}{2\pi \cdot R^2} [\sqrt{R^2 + l_n^2} - l_n]$$

$$= \frac{\varphi}{2\pi \cdot R^2} [R + l_n - \sqrt{R^2 + l_n^2}]$$

Pour $x = -l_n$ on obtient le potentiel du centre du pôle Sud qui est égal et opposé à celui du pôle Nord. La différence de potentiel est :

$$\Delta\Omega = \Omega(N) - \Omega(S) = 2 \cdot \Omega(N)$$

$$= \frac{\varphi}{\pi \cdot R^2} [R + l_n - \sqrt{R^2 + l_n^2}]$$

D'où la réductance pour le champ axial

$$\mathfrak{R}_a = \frac{\Delta\Omega}{\mu_0 \cdot \varphi}$$

$$\mathfrak{R}_a = \frac{1}{\mu_0 \cdot \pi \cdot R^2} [R + l_n - \sqrt{R^2 + l_n^2}] \text{ ou}$$

$$\mathfrak{R}_a = \frac{1}{\mu_0 \cdot \pi \cdot R} \left[1 + \frac{l_n}{R} - \sqrt{1 + \left(\frac{l_n}{R}\right)^2} \right]$$

2.3. Réductance pour le champ radial réparti uniformément

Dans cette partie on ne considère que le champ magnétique radial. On suppose aussi que la répartition du champ magnétique est uniforme sur la face latérale du cylindre qui constitue le pôle. Chaque pôle ayant la surface S apparaît alors comme un cylindre uniformément chargé latéralement avec la densité de charge $\frac{\varphi}{S} = B$. Les pôles sont des cylindres

de rayon R et de longueur d donc ayant la surface $S = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot d$.

Chaque point A de la surface latérale du pôle est repéré en coordonnées cylindriques par ses coordonnées (R, θ, x) (cf. figure 9), le centre est O et l'axe est celui de la bobine.

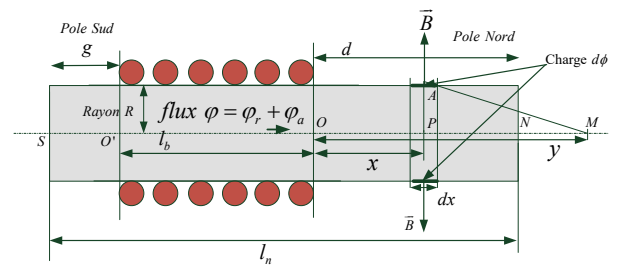


figure 8

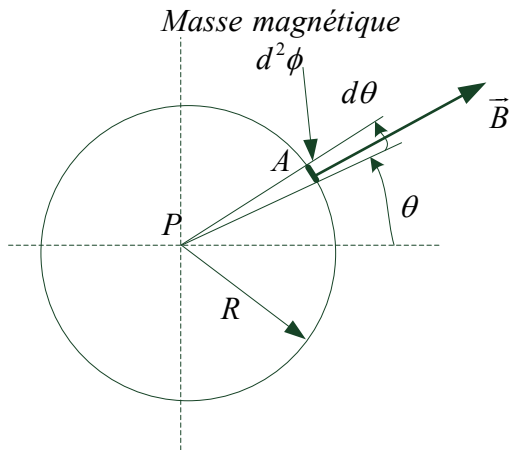


figure 9

Chaque élément de surface $dS = R.d\theta.dx$ situé au point A porte la charge $d^2\phi = B.dS = B.R.d\theta.dx = \frac{\varphi}{2.\pi.R.d} R.d\theta.dx = \frac{\varphi}{2.\pi.d} d\theta.dx$

Cette charge $d\phi$ placée au point A, crée au point M tel que $OM = y$, le potentiel

$$d^2\Omega(M) = \frac{d^2\phi}{4.\pi.AM} \quad \text{avec}$$

$$AM = \sqrt{R^2 + (y-x)^2} \quad (\text{cf. figure 9})$$

\Rightarrow

$$d^2\Omega(M) = \frac{d^2\phi}{4.\pi.AM} = \frac{\varphi}{2.\pi.d.4.\pi.\sqrt{R^2 + (y-x)^2}} d\theta.dx$$

Le potentiel d'un point M est dû aux charges du pôle Nord et à celle du pôle Sud.

$$\Omega(M) = \Omega_{Nord}(M) + \Omega_{Sud}(M)$$

On calcule d'abord le potentiel $\Omega_{Nord}(M)$ dû au pôle Nord uniquement en intégrant sur la surface du pôle Nord.

\Rightarrow

$$\begin{aligned} \Omega_{Nord}(M) &= \int_{x=0}^d \left[\int_{\theta=0}^{2.\pi} \frac{\varphi}{2.\pi.d.4.\pi.\sqrt{R^2 + (y-x)^2}} d\theta \right] dx \\ &= \int_{x=0}^d \frac{\varphi}{d.4.\pi.\sqrt{R^2 + (y-x)^2}} dx \end{aligned}$$

On effectue le changement de variable $x' = y - x$

$$\Rightarrow dx' = -dx$$

Pour $x = 0$ on a $x' = y$ et pour $x = d$ on a

$$\begin{aligned} \Omega_{Nord}(M) &= -\frac{\varphi}{4.\pi.d} \int_{x'=y}^{y-d} \frac{dx'}{\sqrt{R^2 + x'^2}} \\ x' = y - d & \\ &= \frac{\varphi}{4.\pi.d} [\ln(x' + \sqrt{R^2 + x'^2})]_{y-d}^y \end{aligned}$$

$$\Omega_{Nord}(M) = \frac{\varphi}{4.\pi.d} \ln\left(\frac{y + \sqrt{R^2 + y^2}}{y - d + \sqrt{R^2 + (y-d)^2}}\right)$$

Le potentiel du pôle Nord est celui du point N (cf. figure 9) pour lequel $y = ON = d$

$$\begin{aligned} \Omega_{Nord}(N) &= \frac{\varphi}{4.\pi.d} \ln\left(\frac{d + \sqrt{R^2 + d^2}}{d - d + \sqrt{R^2 + (d-d)^2}}\right) \\ &= \frac{\varphi}{4.\pi.d} \ln\left(\frac{d + \sqrt{R^2 + d^2}}{R}\right) \end{aligned}$$

Pour obtenir le potentiel $\Omega_{Sud}(M)$ créée au point M par le pôle Sud il faut intégrer sur la surface du pôle Sud. Le pôle Sud est un cylindre de longueur g avec $-l_b - g < x < -l_b$

$$\begin{aligned} \Omega_{Sud}(M) &= \int_{x=-l_b-g}^{-l_b} \left[\int_{\theta=0}^{2.\pi} \frac{-\varphi}{2.\pi.g.4.\pi.\sqrt{R^2 + (y-x)^2}} d\theta \right] dx \\ &= - \int_{x=-l_b-g}^{-l_b} \frac{\varphi}{g.4.\pi.\sqrt{R^2 + (y-x)^2}} dx \end{aligned}$$

On effectue le changement de variable $x' = y - x$

$$\Rightarrow dx' = -dx$$

Pour $x = -l_b - g$ on a $x' = y + l_b + g$ et pour $x = -l_b$ on a $x' = y + l_b$

$$\begin{aligned} \Omega_{Sud}(M) &= \frac{\varphi}{4.\pi.g} \int_{x'=y+l_b+g}^{y+l_b} \frac{dx'}{\sqrt{R^2 + x'^2}} \\ &= \frac{-\varphi}{4.\pi.g} [\ln(x' + \sqrt{R^2 + x'^2})]_{y+l_b}^{y+l_b+g} \end{aligned}$$

$$\Omega_{Sud}(M) = \frac{-\varphi}{4.\pi.g} \ln\left(\frac{y+l_b+g + \sqrt{R^2 + (y+l_b+g)^2}}{y+l_b + \sqrt{R^2 + (y+l_b)^2}}\right)$$

Pour le pôle situé au point N (cf. figure 9) pour lequel $y = ON = d$ il vient :

$$\Omega_{Sud}(N) = \frac{-\varphi}{4.\pi.g} \ln\left(\frac{d+l_b+g + \sqrt{R^2 + (d+l_b+g)^2}}{d+l_b + \sqrt{R^2 + (d+l_b)^2}}\right)$$

Et on a la relation géométrique $d + l_b + g = l_n$ (cf. figure 3).

\Rightarrow

$$\Omega_{Sud}(N) = \frac{-\varphi}{4.\pi.g} \ln\left(\frac{l_n + \sqrt{R^2 + l_n^2}}{l_n - g + \sqrt{R^2 + (l_n - g)^2}}\right)$$

Le potentiel du pôle Nord qui est un cylindre de longueur d et portant la charge φ est alors :

$$\Omega(N) = \Omega_{Nord}(N) + \Omega_{Sud}(N)$$

$$\Omega(N) = \frac{\varphi}{4\pi \cdot d} \ln\left(\frac{d + \sqrt{R^2 + d^2}}{R}\right) - \frac{\varphi}{4\pi \cdot g} \ln\left(\frac{l_n + \sqrt{R^2 + l_n^2}}{l_n - g + \sqrt{R^2 + (l_n - g)^2}}\right)$$

Le pôle Sud est un cylindre de longueur g et portant la charge $-\varphi$ ainsi on obtient le potentiel du pôle Sud par la même relation en remplaçant d par g et φ par $-\varphi$.

$$\Omega(S) = -\frac{\varphi}{4\pi \cdot g} \ln\left(\frac{g + \sqrt{R^2 + g^2}}{R}\right) + \frac{\varphi}{4\pi \cdot d} \ln\left(\frac{l_n + \sqrt{R^2 + l_n^2}}{l_n - d + \sqrt{R^2 + (l_n - d)^2}}\right)$$

$$\Delta\Omega = \Omega(N) - \Omega(S) = \frac{\varphi}{4\pi \cdot d} \ln\left(\frac{d + \sqrt{R^2 + d^2}}{R}\right) - \frac{\varphi}{4\pi \cdot g} \ln\left(\frac{l_n + \sqrt{R^2 + l_n^2}}{l_n - g + \sqrt{R^2 + (l_n - g)^2}}\right)$$

$$+ \frac{\varphi}{4\pi \cdot g} \ln\left(\frac{g + \sqrt{R^2 + g^2}}{R}\right) - \frac{\varphi}{4\pi \cdot d} \ln\left(\frac{l_n + \sqrt{R^2 + l_n^2}}{l_n - d + \sqrt{R^2 + (l_n - d)^2}}\right)$$

$$\frac{4\pi \cdot \Delta\Omega}{\varphi} = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{d + \sqrt{R^2 + d^2}}{R}\right) - \frac{1}{g} \ln\left(\frac{l_n + \sqrt{R^2 + l_n^2}}{l_n - g + \sqrt{R^2 + (l_n - g)^2}}\right)$$

$$+ \frac{1}{g} \ln\left(\frac{g + \sqrt{R^2 + g^2}}{R}\right) - \frac{1}{d} \ln\left(\frac{l_n + \sqrt{R^2 + l_n^2}}{l_n - d + \sqrt{R^2 + (l_n - d)^2}}\right)$$

$$\frac{4\pi \cdot \Delta\Omega}{\varphi} = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{(d + \sqrt{R^2 + d^2})(l_n - d + \sqrt{R^2 + (l_n - d)^2})}{R \cdot (l_n + \sqrt{R^2 + l_n^2})}\right)$$

$$+ \frac{1}{g} \ln\left(\frac{(g + \sqrt{R^2 + g^2})(l_n - g + \sqrt{R^2 + (l_n - g)^2})}{R \cdot (l_n + \sqrt{R^2 + l_n^2})}\right)$$

D'où la réluctance

$$\mathfrak{R}(x) = \frac{\Omega(N) - \Omega(S)}{\mu_0 \cdot \varphi} = \frac{\Delta\Omega}{\mu_0 \cdot \varphi}$$

$$\mathfrak{R}(x) = \frac{\Delta\Omega}{\mu_0 \cdot \varphi} = \frac{1}{4\pi \cdot \mu_0 \cdot d} \ln\left(\frac{(d + \sqrt{R^2 + d^2})(l_n - d + \sqrt{R^2 + (l_n - d)^2})}{R \cdot (l_n + \sqrt{R^2 + l_n^2})}\right)$$

$$+ \frac{1}{4\pi \cdot \mu_0 \cdot g} \ln\left(\frac{(g + \sqrt{R^2 + g^2})(l_n - g + \sqrt{R^2 + (l_n - g)^2})}{R \cdot (l_n + \sqrt{R^2 + l_n^2})}\right)$$

avec $d = \frac{l_n - l_b}{2} + x$ et $g = \frac{l_n - l_b}{2} - x$

Cette relation fait apparaître la longueur des pôles hors du bobinage dans un logarithme comme celle du col McLyman dans la référence [2].

Cas d'une bobine longue au bobinage centré sur le noyau magnétique

La bobine longue est caractérisée par $\frac{R}{l_n} \ll 1$

Le bobinage centré sur le noyau correspond à $x = 0$. On note alors $d = g = \frac{l_n - l_b}{2} = \Delta$

Dans ce cas l'hypothèse de séparation des lignes de champs axiales et radiales est valide car il existe un plan de symétrie (cf. figure 4).

En utilisant $d = g = \Delta$ l'expression de la réluctance radiale devient :

$$\mathfrak{R}(\Delta) = \frac{1}{2\pi \cdot \mu_0 \cdot \Delta} \ln\left(\frac{(\Delta + \sqrt{R^2 + \Delta^2})(l_n - \Delta + \sqrt{R^2 + (l_n - \Delta)^2})}{R \cdot (l_n + \sqrt{R^2 + l_n^2})}\right)$$

On effectue un développement limité au premier ordre avec $\frac{R}{l_n} \ll 1$:

$$\Rightarrow l_n + \sqrt{R^2 + l_n^2} = l_n \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{R}{l_n}\right)^2}\right) \approx l_n \cdot \left(1 + 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{R}{l_n}\right)^2\right) \approx 2l_n$$

$$\Rightarrow \mathfrak{R}(\Delta) = \frac{1}{2\pi \cdot \mu_0 \cdot \Delta} \ln\left(\frac{(\Delta + \sqrt{R^2 + \Delta^2})(l_n - \Delta + \sqrt{R^2 + (l_n - \Delta)^2})}{2Rl_n}\right)$$

D'autre part, la réluctance axiale de la bobine longue est (cf. § 2.2) :

$$\mathfrak{R}_a = \frac{1}{\mu_0 \cdot \pi \cdot R} \left[1 + \frac{l_n}{R} - \sqrt{1 + \left(\frac{l_n}{R}\right)^2}\right] \text{ et compte}$$

tenu de $\frac{R}{l_n} \ll 1$ et en se limitant au premier ordre il

$$\text{vient : } \mathfrak{R}_a \approx \frac{1}{\mu_0 \cdot \pi \cdot R}$$

2.3.1. Cas où le bobinage et le noyau ont des dimensions voisines

Dans ce cas la surface latérale est réduite, on peut penser, a priori, que la réluctance « radiale » devient infinie.

$l_n \gg l_b$ alors $\Delta = \frac{l_n - l_b}{2}$ est faible. On étudie le cas extrême $\Delta \ll R \ll l_n$

On effectue un développement limité au premier ordre de $\mathfrak{R}(\Delta)$ compte tenu de $\frac{\Delta}{R} \ll 1$ et $\frac{\Delta}{l_n} \ll 1$

et $\frac{R}{l_n} \ll 1$

$$\mathfrak{R}(\Delta) = \frac{1}{2\pi \cdot \mu_0 \cdot \Delta} \ln\left(\frac{(\Delta + \sqrt{R^2 + \Delta^2})(l_n - \Delta + \sqrt{R^2 + (l_n - \Delta)^2})}{2Rl_n}\right)$$

On a :

$$\Delta + \sqrt{R^2 + \Delta^2} = R \cdot \left(\frac{\Delta}{R} + \sqrt{1 + \frac{\Delta^2}{R^2}}\right) \approx R \cdot \left(\frac{\Delta}{R} + 1 + \frac{\Delta^2}{2R^2}\right) \approx R + \Delta$$

$$\begin{aligned}
& l_n - \Delta + \sqrt{R^2 + (l_n - \Delta)^2} \\
&= (l_n - \Delta) \left(1 + \sqrt{1 + \frac{R^2}{(l_n - \Delta)^2}}\right) \\
&\approx (l_n - \Delta) \left(1 + 1 + \frac{R^2}{2(l_n - \Delta)^2}\right) \approx 2(l_n - \Delta) \\
\mathfrak{R}(\Delta) &= \frac{1}{2\pi \cdot \mu_0 \cdot \Delta} \ln\left(\frac{2 \cdot (R + \Delta)(l_n - \Delta)}{2 \cdot R \cdot l_n}\right) \\
(R + \Delta)(l_n - \Delta) &= R \cdot l_n \left(1 + \frac{\Delta}{R}\right) \left(1 + \frac{\Delta}{l_n}\right) \\
&= R \cdot l_n \left(1 + \frac{\Delta}{R} + \frac{\Delta}{l_n} + \frac{\Delta^2}{R \cdot l_n}\right) \approx R \cdot l_n \left(1 + \frac{\Delta}{R}\right) \\
\mathfrak{R}(\Delta) &\approx \frac{1}{2\pi \cdot \mu_0 \cdot \Delta} \ln\left(1 + \frac{\Delta}{R}\right) \approx \frac{1}{2\pi \cdot \mu_0 \cdot \Delta} \frac{\Delta}{R} \approx \frac{1}{2\pi \cdot \mu_0 \cdot R}
\end{aligned}$$

La réductance radiale ne devient pas infinie quand la surface latérale tend vers zéro, elle tend vers

$$\mathfrak{R}(\Delta \rightarrow 0) \approx \frac{1}{2\pi \cdot \mu_0 \cdot R}$$

2.3.2. Cas où le bobinage est court devant la longueur du noyau

Dans ce cas le noyau déborde largement de part et d'autre du bobinage.

$$l_n \gg l_b \text{ soit } \Delta = \frac{l_n - l_b}{2} \approx \frac{l_n}{2} \text{ et pour une}$$

bobine longue on aussi : $R \ll \Delta \approx \frac{l_n}{2}$

$$\mathfrak{R}(\Delta) = \frac{1}{2\pi \cdot \mu_0 \cdot \Delta} \ln\left(\frac{(\Delta + \sqrt{R^2 + \Delta^2})(l_n - \Delta + \sqrt{R^2 + (l_n - \Delta)^2})}{2 \cdot R \cdot l_n}\right)$$

On a :

$$\Delta + \sqrt{R^2 + \Delta^2} = \Delta \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \frac{R^2}{\Delta^2}}\right) \approx \Delta \cdot \left(1 + 1 + \frac{R^2}{2\Delta^2}\right) \approx 2\Delta$$

$$l_n - \Delta + \sqrt{R^2 + (l_n - \Delta)^2} = \frac{l_n}{2} + \sqrt{R^2 + \left(\frac{l_n}{2}\right)^2} \approx l_n$$

⇒

$$\mathfrak{R}(\Delta) = \frac{1}{2\pi \cdot \mu_0 \cdot \Delta} \ln\left(\frac{2 \cdot \Delta \cdot l_n}{2 \cdot R \cdot l_n}\right) = \frac{1}{2\pi \cdot \mu_0 \cdot \Delta} \ln\left(\frac{\Delta}{R}\right)$$

$$\text{Si } \Delta \rightarrow \infty \text{ alors } \mathfrak{R}(\Delta) = \frac{1}{2\pi \cdot \mu_0 \cdot \Delta} \ln\left(\frac{\Delta}{R}\right) \rightarrow 0$$

Ce résultat est banal, si la surface latérale augmente infiniment alors la réductance devient nulle. On retrouve que pour une bobine infinie, la réductance \mathfrak{R}_{ext} du trajet extérieur au bobinage des lignes de champ est nulle. L'inductance de la bobine ne dépend que de la réductance du noyau situé à l'intérieur du

bobinage. Ce qui étaye le choix de $\mathfrak{R}_0 \approx \mathfrak{R}_{int} = \frac{l_b}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S}$ dans le modèle de la figure 5.

2.4. Cas d'une bobine longue où le bobinage recouvre la totalité du noyau

Quand le bobinage recouvre la totalité du noyau on a : $l_n = l_b = l$ et, a priori, il n'y a pas de champ radial mais on a vu (cf. § 2.3.1) que la réductance associée à ce champ radial résiduel n'est pas infinie selon notre modélisation qui suppose l'uniformité du champ sur la surface radiale et sur la surface axiale!

La réductance du trajet des lignes de champ extérieur au bobinage est la réductance équivalente à l'association en parallèle de la réductance axiale \mathfrak{R}_a et de la réductance radiale quand la surface latérale tend vers zéro, $\mathfrak{R}(\Delta \rightarrow 0) \approx \frac{1}{2\pi \cdot \mu_0 \cdot R}$

$$\text{Soit } \mathfrak{R}_{ext} = \frac{\mathfrak{R}_a \cdot \mathfrak{R}(\Delta \rightarrow 0)}{\mathfrak{R}_a + \mathfrak{R}(\Delta \rightarrow 0)}$$

$$\mathfrak{R}_a = \frac{1}{\mu_0 \cdot \pi \cdot R} \left[1 + \frac{l}{R} - \sqrt{1 + \left(\frac{l}{R}\right)^2}\right]$$

$$= \frac{l}{\mu_0 \cdot \pi \cdot R^2} \left[1 + \frac{R}{l} - \sqrt{1 + \left(\frac{R}{l}\right)^2}\right]$$

Une bobine « longue » est définie par : $\frac{R}{l} \ll 1$

D'où, en effectuant un développement limité au premier ordre :

$$\begin{aligned}
\mathfrak{R}_a &= \frac{l}{\mu_0 \cdot \pi \cdot R^2} \left[1 + \frac{R}{l} - \sqrt{1 + \left(\frac{R}{l}\right)^2}\right] \approx \frac{l}{\mu_0 \cdot \pi \cdot R^2} \left[1 + \frac{R}{l} - 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{R}{l}\right)^2\right] \\
&\approx \frac{l}{\mu_0 \cdot \pi \cdot R^2} \left(\frac{R}{l}\right) \approx \frac{1}{\mu_0 \cdot \pi \cdot R}
\end{aligned}$$

La réductance ne dépend que du rayon et ne dépend pas de la longueur de la bobine.

On obtient la réductance extérieure :

$$\mathfrak{R}_{ext} = \frac{\mathfrak{R}_a \cdot \mathfrak{R}(\Delta \rightarrow 0)}{\mathfrak{R}_a + \mathfrak{R}(\Delta \rightarrow 0)} \text{ avec } \mathfrak{R}_a \approx \frac{1}{\mu_0 \cdot \pi \cdot R} \text{ et}$$

$$\mathfrak{R}(\Delta \rightarrow 0) \approx \frac{1}{2\pi \cdot \mu_0 \cdot R} \Rightarrow$$

$$\mathfrak{R}_{ext} = \frac{1}{\mu_0 \cdot 3 \cdot \pi \cdot R} = \frac{l}{\mu_0 \cdot 3 \cdot \pi \cdot R^2} \left[\frac{R}{l}\right]$$

D'autre part, la réductance du noyau est :

$$\mathfrak{R}_{int} = \frac{l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \pi \cdot R^2} \text{ soit } \frac{\mathfrak{R}_{ext}}{\mathfrak{R}_{int}} \approx \mu_r \frac{R}{3l}$$

Cette relation permet d'estimer simplement la réductance à l'extérieur du bobinage et l'inductance de la bobine qui est alors :

$$L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}_{int} + \mathfrak{R}_{ext}} = \frac{N^2}{\mathfrak{R}_{int} \left(1 + \frac{\mathfrak{R}_{ext}}{\mathfrak{R}_{int}}\right)} \approx \frac{N^2}{\mathfrak{R}_{int} \left(1 + \mu_r \frac{R}{3l}\right)}$$

$$\approx \frac{\mu_0 \mu_r N^2 \pi R^2}{l \left(1 + \mu_r \frac{R}{3l}\right)} \approx \frac{\mu_0 \mu_r N^2 \pi R^2}{l + \frac{\mu_r R}{3}}$$

Pour une bobine « infinie » de longueur l et de section $S = \pi.R^2$ l'inductance est : $L = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 .S}{l}$.

On voit que l'on peut employer cette même relation en corrigeant la longueur de la bobine selon la relation : $l' \approx l + \frac{\mu_r .R}{3}$ et alors : $L = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 .S}{l'}$

Une bobine de longueur l et de section $S = \pi.R^2$ peut être considérée comme « infinie » si elle respecte la relation : $\mu_r .R \ll 3.l$. Cette condition n'est en général pas respectée pour un noyau en matériau magnétique pour lequel μ_r peut atteindre 10^5 .

2.5. Les relations pour l'estimation de l'Inductance de la bobine droite

On rappelle ici toutes les relations utiles à la détermination de l'inductance de la bobine droite

Le calcul est effectué à partir des quantités suivantes :

x : Distance entre le centre de la bobine et le centre du noyau.

l_n : Longueur du noyau magnétique

l_b : Longueur de la bobine

R : Rayon de la bobine et du noyau magnétique

μ_r : Perméabilité magnétique relative du noyau

N : Nombre de spires de la bobine

$\mu_0 = 4.\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$: perméabilité magnétique du vide

Les calculs sont les suivants :

$d = \frac{l_n - l_b}{2} + x$: Longueur du noyau hors de la bobine côté Sud

$g = \frac{l_n - l_b}{2} - x$: Longueur du noyau hors de la bobine côté Nord

Réductance « radiale » $\mathfrak{R}(x)$:

$$\mathfrak{R}(x) = \frac{1}{4.\pi.\mu_0.d} \ln\left(\frac{(d + \sqrt{R^2 + d^2})(l_n - d + \sqrt{R^2 + (l_n - d)^2})}{R.(l_n + \sqrt{R^2 + l_n^2})}\right)$$

$$+ \frac{1}{4.\pi.\mu_0.g} \ln\left(\frac{(g + \sqrt{R^2 + g^2})(l_n - g + \sqrt{R^2 + (l_n - g)^2})}{R.(l_n + \sqrt{R^2 + l_n^2})}\right)$$

$\mathfrak{R}_a = \frac{1}{\mu_0.\pi.R} \left[1 + \frac{l_n}{R} - \sqrt{1 + \left(\frac{l_n}{R}\right)^2}\right]$: Réductance

« axiale »

$\mathfrak{R}_B = \frac{l_n}{\mu_0.\mu_r.S}$ Réductance du noyau circuit

magnétique

$\mathfrak{R}_{int} = \frac{l_b}{\mu_0.\mu_r.S}$ Réductance du noyau à l'intérieur du bobinage

l'intérieur du bobinage

$\mathfrak{R}_0 \approx \mathfrak{R}_{int}$: Réductance pour le flux radial si le noyau est long.

le noyau est long.

ou $\mathfrak{R}_0 \approx \frac{l_n + l_b}{2.l_n} \mathfrak{R}_B$ pour une bobine avec

$l_n - l_b \ll l_b$ si le noyau assez court.

$\mathfrak{R}_1 = \mathfrak{R}_B - \mathfrak{R}_0$: Complément de réductance pour le flux axial (cf. figure 5)

$\mathfrak{R} = \mathfrak{R}_0 + \frac{(\mathfrak{R}_a + \mathfrak{R}_1).\mathfrak{R}(x)}{\mathfrak{R}_1 + \mathfrak{R}_a + \mathfrak{R}(x)}$: Réductance

équivalent du circuit magnétique de la bobine

$L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}}$: Inductance de la bobine

Ceci fournit une estimation de l'inductance selon ce modèle qui simplifie la répartition du champ magnétique.

3. Mesures expérimentales

3.1. Constitution de la bobine de test

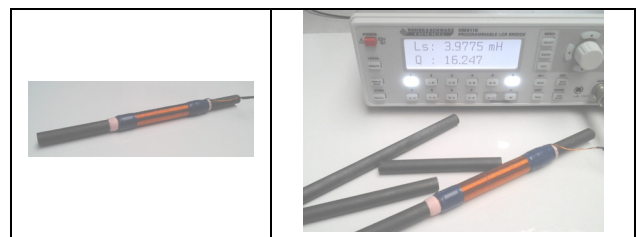


figure 10

Sur un barreau de ferrite de longueur $l_n = 200 \text{ mm}$ et de rayon $R = 5 \text{ mm}$ on a bobiné $N = 220 \text{ spires}$ avec du fil de diamètre $d_{fil} = 0,4 \text{ mm}$. La longueur du bobinage à spires

jointives est de $l_b = 90 \text{ mm}$. On est donc dans le cas $l_n - l_b \approx l_b$.

Le matériau magnétique (ferrite de récupération) a une perméabilité relative mal connue $100 < \mu_r < 1000$ (valeur habituelle pour les ferrites utilisées en réception radio). On devra donc ajuster cette valeur lors des mesures.

La bobine est présentée en photo sur la figure 10.

On a mesuré l'inductance des bobines avec un pont de mesure en veillant à rester dans des conditions linéaires.

Modèle avec noyau « court » : influence de la longueur du noyau

Le modèle utilise les relations résumées au paragraphe 2.5 avec $\mathcal{R}_0 \approx \frac{l_n + l_b}{2.l_n} . \mathcal{R}_B$. On estime que

la réductance \mathcal{R}_0 (cf. figure 5) augmente avec la longueur du noyau.

On dispose de 5 noyaux de longueur :

$l_n = 90 \text{ mm}, 108 \text{ mm}, 200 \text{ mm}, 300 \text{ mm}, 400 \text{ mm}$

On a mesuré l'inductance avec chaque noyau et la bobine de longueur $l_b = 90 \text{ mm}$ en position centrale, $x = 0$.

On obtient :

$L = 1,51 \text{ mH}, 2,04 \text{ mH}, 3,87 \text{ mH}, 4,9 \text{ mH}, 5,3 \text{ mH}$

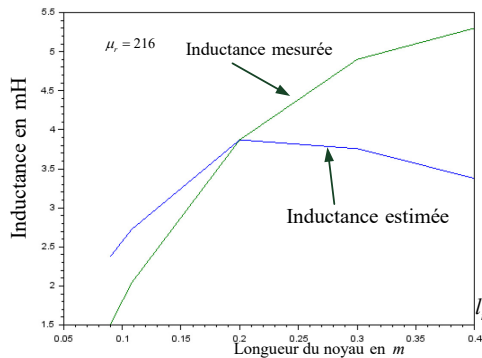


figure 11

On présente, figure 11, les courbes mesurées et estimées par les relations du paragraphe 2.5, avec

$\mathcal{R}_0 \approx \frac{l_n + l_b}{2.l_n} . \mathcal{R}_B$ en ajustant la perméabilité relative

du matériau magnétique à la valeur $\mu_r \approx 216$ pour que l'estimation corresponde à la valeur mesurée pour la longueur $l_n = 200 \text{ mm}$. On constate, comme prévu, que le modèle ne convient pas du tout quand la longueur du noyau augmente. L'inductance estimée diminue au lieu de tendre asymptotiquement vers une

valeur maximale. La réductance \mathcal{R}_0 du modèle de la figure 5 augmente trop quand la longueur du noyau augmente. Le choix de la ligne de champ moyenne pour le modèle est inadéquat si la longueur du noyau est grande car la répartition du champ magnétique sur la surface latérale n'est pas uniforme.

3.2. Modèle avec noyau « court » : influence de la position de la bobine sur le noyau

Pour le noyau de longueur $l_n = 200 \text{ mm}$ on a déplacé la bobine par rapport au centre de la quantité x , (cf. figure 3). L'évolution de l'inductance mesurée et estimée est donnée figure 12 pour le modèle avec

$$\mathcal{R}_0 \approx \frac{l_n + l_b}{2.l_n} . \mathcal{R}_B$$

Pour l'estimation on a conservé la valeur $\mu_r \approx 216$ issue des mesures précédentes.

On constate que l'estimation de l'inductance est compatible avec les mesures.

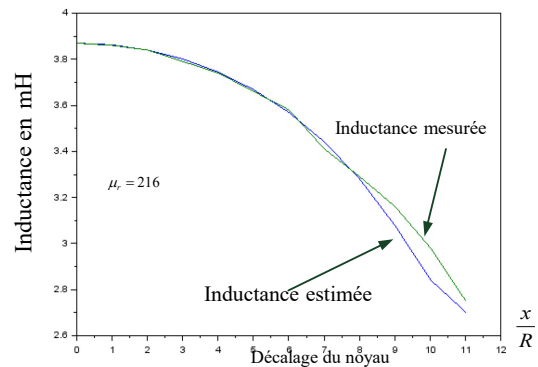


figure 12

L'erreur de modélisation augmente si le décalage du noyau augmente mais elle reste acceptable. Ce modèle est utilisable pour tenir compte de la position du noyau dans le bobinage.

3.3. Modèle avec noyau long, influence de la longueur du noyau

Le modèle précédent n'est pas applicable pour les noyaux longs car le champ magnétique diminue quand on s'éloigne du bobinage et le barycentre du champ magnétique reste proche de l'extrémité du bobinage. Il convient de choisir \mathcal{R}_0 plus faible. La ligne de champ moyenne reste proche de l'extrémité du bobinage on utilise donc le modèle qui impose

$$\mathcal{R}_0 \approx \mathcal{R}_{\text{int}} = \frac{l_b}{\mu_0 \mu_r . S}$$

On compare, figure 13 les valeurs mesurées et estimées pour les 5 longueurs de noyaux disponibles comme au paragraphe 3.3.

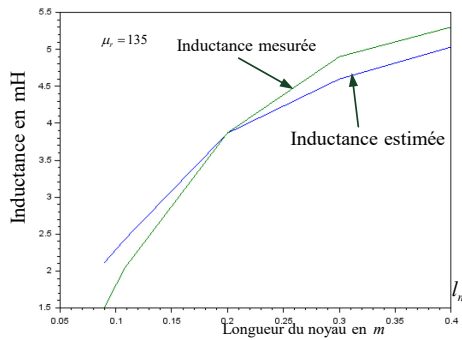


figure 13

Pour obtenir un accord entre les mesures et les estimations on a dû ajuster la perméabilité relative du matériau à $\mu_r = 133$ alors qu'avec le modèle à noyau court il avait fallu choisir $\mu_r = 216$. Ces valeurs sont bien dans l'ordre de grandeur attendu pour caractériser le noyau en ferrite mais ne sont pas compatibles. On ne peut pas conclure sur la validité du modèle pour tenir compte de la longueur du noyau car on ne connaît pas la valeur exacte de la perméabilité relative du matériau. Néanmoins le modèle avec noyau long respecte qualitativement l'expérience. L'inductance augmente quand la longueur du noyau augmente et de plus pour ce modèle chaque paramètre a une réalité physique

$\mathcal{R}_0 \approx \mathcal{R}_{int}$ est la réactance du noyau à l'intérieur du bobinage et $\mathcal{R}_1 = \mathcal{R}_B - \mathcal{R}_{int}$ où \mathcal{R}_B est la réactance totale du noyau. Ce modèle est donc préférable mais on a présenté

le modèle à noyau court qui, a priori, semblait plus réaliste pour tenir compte du parcours des lignes de champ latéral dans le noyau.

3.4. *Modèle avec noyau long, influence de la position de la bobine sur le noyau*

Comme au paragraphe 3.2 on compare sur la figure 14 les valeurs estimées et mesurées de l'inductance en fonction du décalage du bobinage sur le noyau magnétique. On garde l'ajustement $\mu_r = 133$ obtenu précédemment et on constate alors que le modèle semble bien adapté pour estimer l'influence du décalage sur l'inductance.

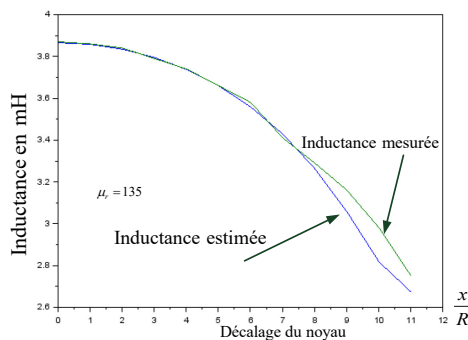


figure 14

4. Conclusion

La modélisation présentée reste simple ce qui est indispensable pour obtenir des résultats exploitables. Les calculs peuvent être conduits avec des étudiants de classes préparatoires scientifiques. Le modèle repose sur des données physiques aisées à obtenir : la géométrie de la bobine et la perméabilité relative du matériau, et non pas sur l'emploi d'abaques ou de formules parfois empiriques.

Le modèle permet mal d'estimer l'inductance en fonction de la longueur du noyau magnétique car il a fallu pour cela ajuster la valeur de la perméabilité relative du matériau. Par contre il semble adapté pour estimer la variation de l'inductance en fonction du décalage entre le centre du noyau et le centre du bobinage.

Le modèle est critiquable car on considère que le champ magnétique est uniforme sur la surface latérale du cylindre alors que l'on sait que le champ diminue quand on s'éloigne du bobinage. Ce modèle est donc applicable uniquement si la longueur du noyau n'est pas trop grande par rapport à la longueur du bobinage.

De plus le nombre de tests est trop faible pour conclure sur la validité de ce modèle qui a surtout un intérêt qualitatif.

Pour améliorer le modèle il est envisageable de modéliser la répartition du champ magnétique sur la surface latérale du noyau magnétique.

Bibliographie :

- [1] H Nagaoka « The inductance coefficients of solenoids » Journal of the college of science, Imperial University Tokyo Vol 27 article 6 Japan 1909
- [2] Colonel W T McLyman « Transformer and inductor design handbook » Edition Marcel Dekker, Inc 1978 ISBN 0-8247-5393-3 (equation 1.37)
- [3] Christian Carimalo « Cours d'électromagnétisme » page 191 : le potentiel scalaire magnétique. <http://physique-univ.fr/onewebmedia/Electromag-c7-site.pdf>

ECLAIRAGE VEHICULES (BANC DE TEST)

A.SIVERT⁽¹⁾, B.VACOSSIN⁽¹⁾, F.BETIN⁽¹⁾

⁽¹⁾Laboratoire des Technologies innovantes (LTI), équipe Énergie Électrique et Systèmes Associés (EESA)
Université de Picardie Jules Verne, Institut Universitaire de Technologie de l'Aisne GEII, 02880 SOISSONS.

Résumé : L'intensité des éclairages avant des véhicules, s'est considérablement améliorée grâce aux leds mais les normes imposent de plus en plus de tests de vérification contre l'éblouissement. Par ailleurs, grâce à la concentration des faisceaux lumineux, des éclairages matriciels permettent de réaliser des phares adaptatifs (« adaptive front lighting system ») et d'obtenir plus d'éclairage sans provoquer de gênes « glare free high beam ».

Nous proposons dans cet article de répondre aux questions suivant que doit se poser un technicien désireux réaliser un banc d'essai pour l'éclairage de véhicules

- Quelles sont les exigences de certifications des éclairages pour les véhicules ?
- Quelles sont les différences d'éclairage entre les véhicules ?
- Quelles sont les capteurs, les méthodes et les appareils de mesure ?

1. Introduction

De nombreux sites internet proposent des tests consommateurs sur les éclairages mais les tests de performances des éclairages réalisés par les constructeurs ne sont pas fournis aux consommateurs. De même les valeurs d'éclairage sont rarement fournies par les services commerciaux des constructeurs rendant alors difficile la justification des différences de prix entre les technologies.

Par ailleurs, les changements de technologies permettent aux nouveaux systèmes d'atteindre un éclairage 10 fois plus puissant comparés aux systèmes précédents.

A titre d'exemple, pour les vélos, pour lesquels les normes sont moins exigeantes et qui présentent des accrochages non fixes, il existe depuis quelques années, des éclairages de vélo qui peuvent éclairer plus fort qu'un éclairage standard de voiture.

Depuis 2017, des étudiants de départements Génie Électrique font chaque année des mesures sur 20 éclairages avant et arrière de vélo pour la FUB (Fédération française des Usagers de la Bicyclette) afin que les cyclistes puissent faire un choix pertinent entre les différentes solutions présentées dans le commerce.

Dans cet article nous proposons un état de l'art sur les mesures d'éclairage afin que des étudiants d'IUT mesures-physiques, génie électrique et informatique puissent tester la conformité d'un éclairage de manière pertinente.

2. Les normes sur les feux de croisement [20]

Les normes sur l'éclairage sont peu explicites. Chaque pays pouvant avoir des exigences supplémentaires par rapport aux standards communs, on se retrouve pour chaque type de véhicules (4 roues, 3 roues et 2 roues) avec des règles différentes.

Ces normes imposent entre autre que l'éclairage se fasse sans éblouissement. On rappelle qu'alors qu'une

variation d'environ 20 lux suffit pour générer un éblouissement [12], l'éclairage nocturne urbain produit une lumière de 10 à 30 lux.

Les contraintes sur l'éblouissement ont aussi des conséquences sur les panneaux de signalisation. En effet, tous les panneaux de signalisation en Europe doivent posséder une réflectance de classes 1 ou 2 qui correspond à un coefficient de réflexion de respectivement 50 ou 180 cd.lux⁻¹.m⁻². Tous les panneaux renvoient donc une luminance [15] correspondante à l'équation suivante :

$$L_{\text{min}} = R_{\text{reflexion}} \cdot E(\text{lux}) \cdot \text{Surface}(\text{m}^2)$$

Pour fixer les idées, on gardera en tête qu'un panneau de classe 1 de 1 m² qui reçoit 0,7 lux renvoie 35 Candelas (soit 35 bougies). A titre de comparaison, un sol bitumeux a un rapport de réflexion de 0,01 et un mur blanc 0,04 cd.lux⁻¹.m⁻².

2.1. Feux de croisement voitures

La norme ECER112 [1, 2] caractérise les valeurs minimales et maximales en lux que doivent produire les feux de croisement sur un mur, à une distance et à une hauteur du phare fixées.

L'inclinaison des phares de voitures est fonction de leur hauteur (tableau1). On peut observer sur la figure 1 que, pour une hauteur < à 0,8m, le bon réglage de l'inclinaison d'un phare se situe entre -1% à -1,5%.

Hauteur du phare	inclinaison
inférieure à 0,8m	-1% à -1,5%
entre 0,8 et 1m	-1% à -2%
supérieure à 1m	-1,5% à -2%

Tableau 1 : inclinaison du phare en fonction de sa hauteur

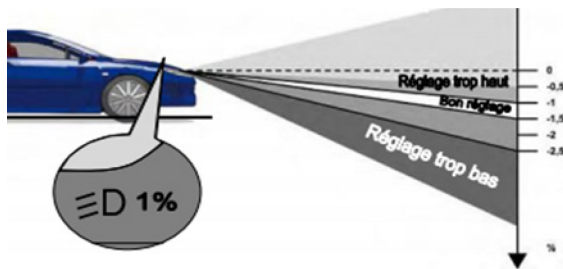


Figure 1. Réglage d'un phare dont la hauteur est < à 0,8m.

Le calcul de la distance du faisceau au sol se fait à l'aide de la relation suivante.

$$distance_F = \frac{hauteur_{phare}}{pente} = \frac{0,8m}{0,01} = 80m \quad (2)$$

Cette distance est importante car elle correspond à un temps de réaction de 4s pour un véhicule roulant à 20 m/s (72 km/h).

La répartition spatiale de l'éclairage est elle aussi très importante. On définit une « ligne de coupure » horizontale (figure 2) pour analyser les différentes zones d'éclairage.

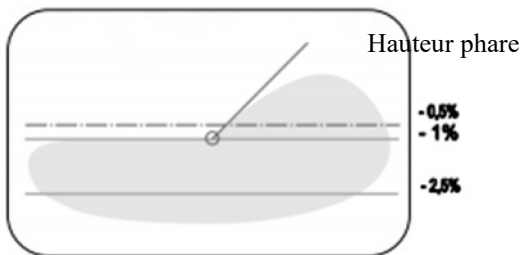


Figure 2. Position des feux de croisement dans un régleoscope (beam setter) qui est en général à 1 m du phare.

Ainsi, le phare de croisement doit éclairer entre 25 m et 50 m sans éblouir à gauche. Mais à droite, il est possible d'observer l'horizon à plus de 75 m pour bien voir le bas-côté comme on peut l'observer (figure 3).

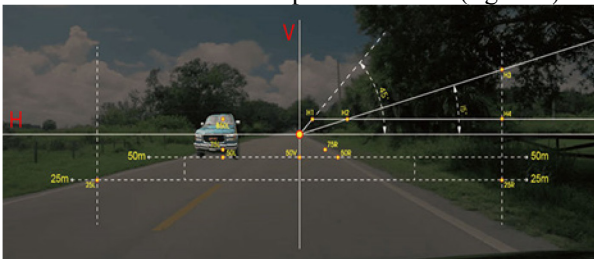


Figure 3. Horizon et points à surveiller de l'éclairage.

Les exigences normatives sont alors différentes pour les différents points d'éclairage (voir tableau 2 pour la norme ECER112 sur les feux de croisement).

Test point on screen	Required illumination (unit: lux)
Headlight for right-side-driving cars	Class B
Pt B50 L	≤ 1
Pt 75 R	≥ 12
Pt 75 L	≥ 12
Pt 50 L	≤ 15
Pt 50 R	≥ 3
Pt 50 V	≥ 06
Pt 25 L	≥ 02
Pt 25 R	≥ 02
Zone III	≥ 0.7
Zone IV	≥ 0.3
Zone I	≤ 2E*

Tableau 2 : valeur des points et zones d'éclairage.

Par exemple pour le point B50L il ne faut pas dépasser 1 lux pour éviter l'éblouissement alors qu'il n'y a pas d'exigence maximale pour le point 75R.

Théoriquement, l'éclairage diminue en fonction du carré de la distance. Le rapport entre une mesure à une certaine distance d_1 et une autre distance d_2 est donné par la relation suivante :

$$E_2(lux) = E_1(distance_1) \cdot \left(\frac{distance_1}{distance_2} \right)^2 \quad (3)$$

Par conséquent, la vérification des points de mesure peut se faire à une distance relativement courte par exemple à 3.5 m, pour en déduire l'éclairage à 25m, 50m, 75m. Un exemple de mise en œuvre de ce test est donné figure 4.



Figure 4. Test d'un éclairage voiture pour vérifier tous les points ECER112 avec des luxemètres à 3.5 m [6]

A partir de l'éclairage distribué sur un mur à une distance fixée (figure 4) et pour 6 points de mesure du tableau 2 une vue de dessus est estimée informatiquement (figure 5).

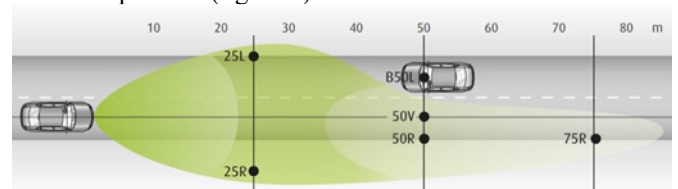


Figure 5. Point de test vue de dessus ECER112.

Une régression linéaire basée sur les points de mesures matricielles du mur, permet d'obtenir la représentation de la distributivité de l'éclairage (figure 6).

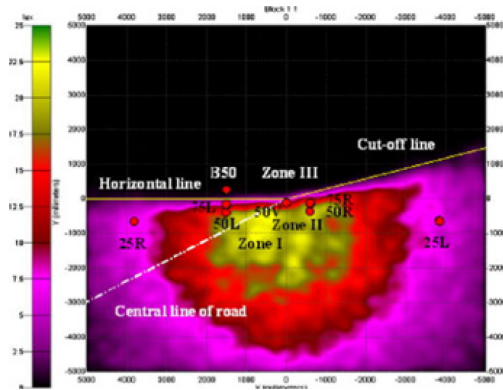


Figure 6. Estimation de la distributivité de l'éclairage à 25m [10]

A partir de la surface éclairée et du nombre de lux nécessaires dans les zones demandées, le nombre de lumens peut être déterminé.

$$\phi(\text{lumen}) = E(\text{lux}) \cdot \text{Surface}(\text{m}^2) \quad (4)$$

Pour une diffusion d'éclairage rond, avec la variable θ correspondant à la moitié de l'angle de diffusion, l'équation précédente est adaptée de la manière suivante

$$\phi(\text{lumen}) = E(\text{lux}) \cdot \pi \cdot (\tan \theta \cdot \text{distance})^2 \quad (5)$$

A partir d'une matrice de mesures sur un mur, on peut aussi calculer la cartographie de la lumière sur le sol (figure 7).

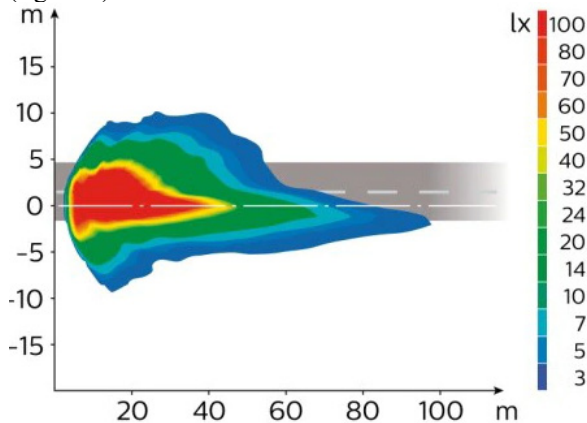


Figure 7. Estimation de la cartographie de réflecteur H7 d'une voiture sur le sol vue de dessus

Sur cette cartographie, on constate que l'éclairage est bien supérieur à ce qui est demandé pour satisfaire l'utilisateur sans éblouissement.

L'éclairage au sol est très variable en fonction de la technologie utilisée (ex : lampes halogènes 40 lm/W, leds 100 lm/W et lasers 170 lm/W). De même les consommations de ces éclairages sont très dépendantes des technologies utilisées (halogènes de voiture 110 W, leds 60 W et lasers 40 W).

2.2. Eclairages avant de motos

Pour les motos, la norme ECE113R de la distribution du flux d'éclairage est bien plus simple que pour celle des voitures [4, 5]. L'inclinaison du phare doit être de -1,5% avec un point à 50 m et un nombre de lux à 25 m supérieur à 3 lux. Le nombre de lumens demandé en feux de croisement est seulement de 5. La valeur au

point 50V est 2 fois moindre que celle demandée pour une voiture et le rapport entre la zone A et la zone B n'est de 2 (figure 8). Evidemment pour satisfaire les usagers, ce coefficient est en réalité supérieur à 40.

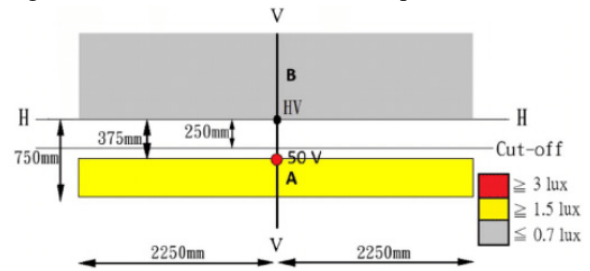


Figure 8. Horizon et Points à surveiller de l'éclairage de croisement d'une moto à 25 m avec HV hauteur du phare.

En fonction de l'angle de l'éclairage, la distance maximale sera bien de 50 m, comme on peut l'observer sur la figure 9. Les angles du faisceau vertical et du faisceau horizontal sont déterminés par les équations suivantes (6) :

$$\theta_{F \text{ vertical}} = A \tan\left(\frac{\text{hauteur}}{25\text{m}}\right) - A \tan\left(\frac{\text{hauteur}}{50\text{m}}\right) = 0,85^\circ$$

$$\theta_{F \text{ horizontal}} = A \tan\left(\frac{\text{largeur}}{25\text{m}}\right) = 10^\circ \quad (6)$$

Cet écart entre les deux angles implique qu'un faisceau parabolique rond est très mal adapté sur une moto qui nécessite des angles vertical et horizontal bien différents.

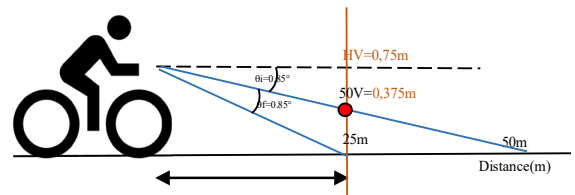


Figure 9. Vue de côté de l'éclairage moto en feu de croisement

En plein phare, la zone entre HV et 50V doit correspondre aux valeurs de la figure suivante. Le nombre de lumens minimum est de 37,5.

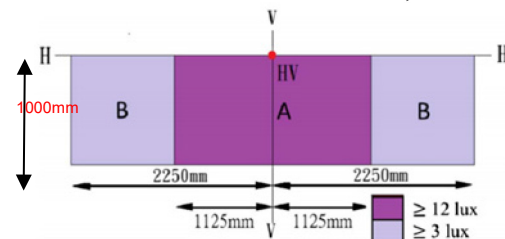


Figure 10. Zone demandant d'éclairage en plein phare d'une moto à 25m par rapport à HV (hauteur verticale)

On peut observer sur la figure 11, que l'angle du faisceau d'éclairage sera différent en plein phare.

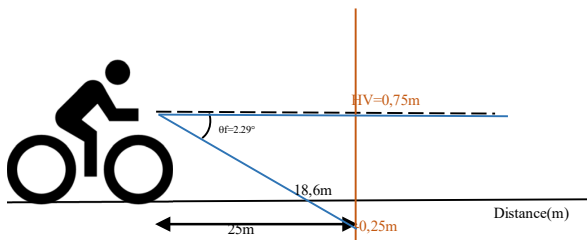


Figure 11. Vue de côté de l'éclairage moto en plein phare

Pour respecter les normes, il est donc préférable de réaliser un faisceau lumineux carré homogène, ce qui n'est pas si facile sans avoir trop de perte dans l'optique [4].

2.3. Eclairage avant pour les vélos

En France, un vélo peut avoir le même éclairage qu'une moto. En Allemagne une norme STVZO impose un maximum de lux dans la zone d'éblouissement et un minimum pour la hauteur verticale HV (figure 12) :

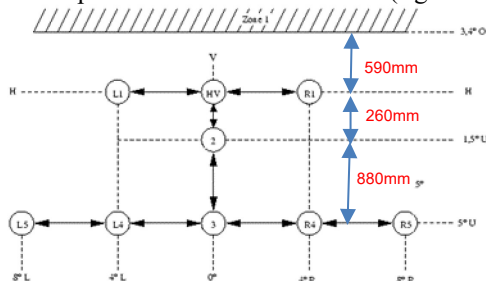


Figure 12. Horizon et points à surveiller de l'éclairage de croisement d'un vélo à 10 m avec HV hauteur du phare [6]

La valeur en lux des points dépend de la tension d'alimentation de la batterie ou de la dynamo. Les valeurs des points sont symétriques par rapport à la verticale pour un éclairage supérieur à 42 lumens. Ce qui est 10 fois plus important que la norme des motos.

	Aire m ²	-4°	0
>3,4°		<0,7 lux	
0°	0,08=HV	>10 lux	HV>20 lux
-1,5°			Zone2>10lux
-6,5°	0.1=HV2_3	>0,8 lux	>2,5 lux

Tableau 3 : valeur des points et zones d'éclairage à 10 m pour un éclairage supérieur à 42 lumen STVZO

La figure 13, donne un exemple de valeurs obtenues sur un mur vertical à 10 m, pour un éclairage satisfaisant à la norme STVZO. On peut remarquer qu'entre la ligne d'horizon et la zone 1, il y a un flou important sur la valeur qui permettrait d'éblouir ou pas (Pour rappel, cette valeur n'est pas acceptée pour les motos). Pour un vélo, la position du phare peut être à 1m du sol (hauteur du guidon à 1m du sol). Mais la hauteur peut être aussi à 50 cm du sol (hauteur d'un garde-boue d'une petite roue de 20 pouces de certains vélos souvent pliants).

La valeur requise par la STVZO doit être inférieure à 2 lux dans la zone 1 alors pour une moto et une voiture, la zone 1 doit être inférieure à 0,7 lux à 25 m, donc, 4,38 lux à 10 m.

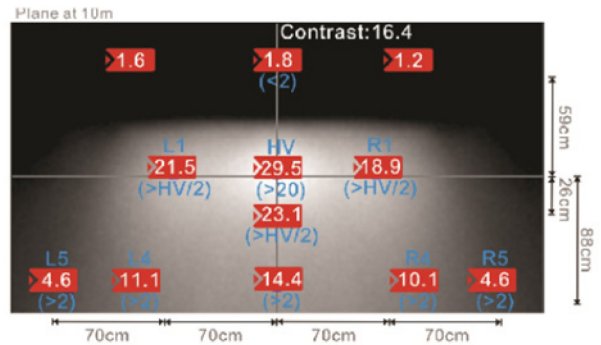


Figure 13. Exemple de valeur d'un éclairage de vélo à 10 m certifiée STVZO avec 0,7 Watt [13]

Concernant l'angle du réflecteur des vélos, on constate que, comme pour les motos, il est très large par rapport à sa hauteur. Sur la vue de côté (figure 14) qui donne une distance d'éclairage à 10 m, le point HV2 à 1,5° atteint le sol à 28,6 m ce qui donne une valeur minimale de 2,4 lux à cette distance.

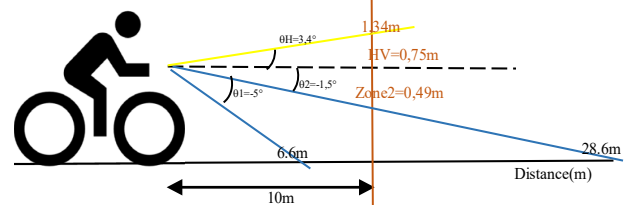


Figure 14. Vue de côté de l'éclairage vélo de feux de croisement de la STVZO pour une hauteur de 0,75m

Évidemment, avec une puissance de 10 W, il est possible de faire beaucoup mieux en respectant, la norme STVZO comme on peut l'observer sur la figure suivante (ces valeurs étant prises à 1m, doivent être divisés par 100 pour la distance de 10m (équation 3)).

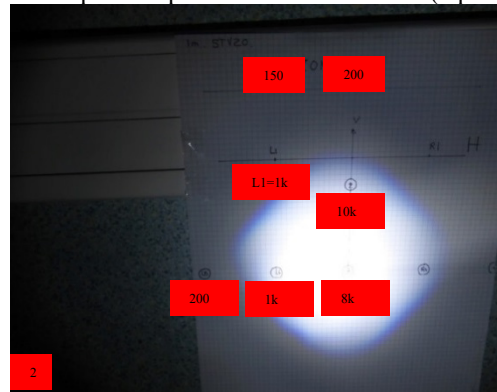


Figure 15. Valeur d'un éclairage de vélo à 1m avec 10 Watt avec une focale pour un carré de 17cmx17cm et d'un halo de 40 cm de diamètre.

On remarquera aussi qu'en vélo, un éclairage sur la tête peut être aussi utilisé. L'inclinaison sera variable en fonction du mouvement de la tête ce qui peut être préjudiciable pour l'éblouissement. Par contre, ce type d'éclairage permet dans les virages d'éclairer la bonne direction du vélo et d'avoir plus d'inclinaison car la hauteur de la tête est bien plus grande que celle du guidon.

Les différences entre les normes sont étudiées figure 16. On peut observer avec la même échelle et la même

ligne d'horizon, sur un mur à 1 m les zones et les points d'éclairage pour les différents véhicules.

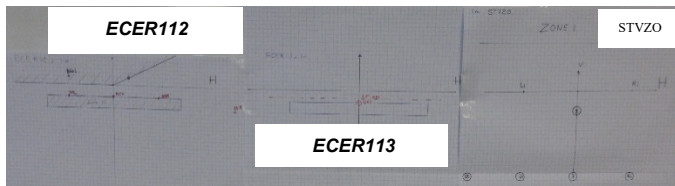


Figure 16. Zones et points d'éclairage pour les feux de croisement voiture, moto et SVZO à une distance de 1m sur feuille de 5x5m

En conclusion, la norme STVZO impose une optique composée d'un miroir convexe ou de lentilles ellipsoïdes qui sont relativement chères par comparaison aux éclairages motos avec inclinaison avec réflecteurs paraboliques simples ou lentilles cylindriques convexes.

3. Norme éclairage arrière de voiture

Les normes éclairages pour l'éclairage arrière des voitures sont définies par ECER07 correspondant les valeurs de la figure suivante à 10 m.

Stop lamps

		H						
		20°	10°	5°	0°	5°	10°	20°
V	UP							
	10°			12		12		
	5°	6	12		42		12	6
	0°		21	54	60 cd	54	21	
	5°	6	12		42		12	6
	10°			12		12		
DOWN								

Tail lamps

		H						
		20°	10°	5°	0°	5°	10°	20°
V	UP							
	10°			0.8		0.8		
	5°	0.4	0.8		2.8		0.8	0.4
	0°		1.4	3.6	4 cd	3.6	1.4	
	5°	0.4	0.8		2.8		0.8	0.4
	10°			0.8		0.8		
DOWN								

Figure 17. Intensité lumineuse minimale de l'éclairage arrière d'un véhicule à moteur [3]

La relation entre les candelas et les lux, en fonction du demi-angle d'éclairage est donnée par la relation suivante :

$$E(lux) = \frac{\text{intensité}(Cd) \cdot 2 \cdot (1 - \cos \theta)}{(distance \cdot \tan \theta)^2} \quad (9)$$

Or, la fonction $\frac{2 \cdot (1 - \cos \theta)}{(distance \cdot \tan \theta)^2}$ est proche de 1 pour les valeurs faibles d'angle d'éclairage (figure 18).

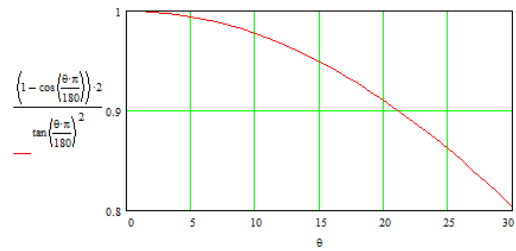


Figure 18. Fonction de la variation de lux par rapport au demi angle d'éclairage.

Pour l'éclairage arrière d'une voiture, il faut au minimum 4 cd à 10 m donc 0,04 lux à 10 m et 4 lux à 1 m. Pour les feux stop que l'on doit voir le jour, il faut 0,6 lux à 10 m, donc 60 lux à 1 m.

Pour l'éclairage du stop, l'angle en largeur et différent de l'angle en hauteur mais considérons que le demi angle doit être de 20°, cela donne la valeur suivante en lumens

$$\phi(\text{lumens}) = \text{intensité lumineuse}(Cd) \cdot 2 \cdot \pi \cdot (1 - \cos \theta)$$

$$\phi(\text{lumens}) = 60Cd \cdot 2 \cdot \pi \cdot (1 - \cos 20^\circ) = 22 \quad (10)$$

La surface d'éclairage à 1 m donne 0,416 m² avec un rayon de 0,36 m ce qui donne une valeur en lux moyen de 52 lux proche des 60 lux théoriques.

$$E(lux) = \frac{\phi}{\text{surface}} = \frac{22}{0.416} = 52 \quad (11)$$

Sur la figure suivante, on peut observer que la diminution de l'éclairage en fonction du rayon d'émission n'est pas linéaire.

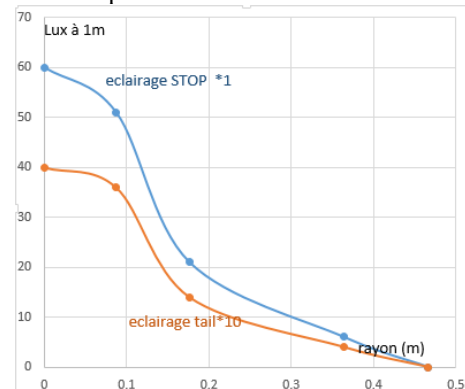


Figure 19. Eclairage arrière à 1 m en fonction du rayon horizontal d'émission demandé par la norme ECER13

En règle générale, les véhicules émettent 10 à 30 fois plus que les minima de normes [19]. D'ailleurs, les ampoules du feu stop font en général 21 W, soit pour 20 lm/W une valeur de 400 lumens. Les leds qui remplacent les ampoules filament ne consomment que 4 Watt pour le même nombre de lumens que les ampoules.

4. Équation de la distributivité d'un éclairage

L'éclairage d'une lampe sur un mur n'est généralement pas homogène. Pour les optiques paraboliques, le rayonnement diminue linéairement en fonction de l'angle.

A titre d'exemple on donne sur la figure 20 l'éclairage pour un réflecteur de $\pm 3^\circ$ pour 43 lumens qui donne 10 klux à 1 m en son centre [7] :

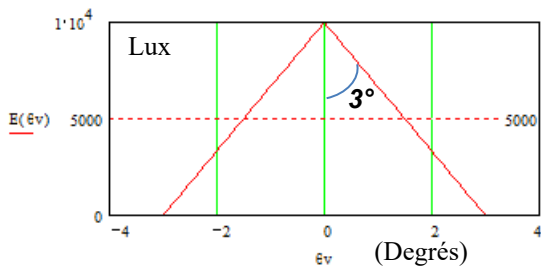


Figure 20. Eclairage parabolique vue en coupe transversale à une distance de 1 m

Pour une direction du faisceau à 10 m, la vue de côté correspondra à la figure 21. Etant donné que l'angle de l'optique, 3° , est inférieur à l'angle de l'inclinaison du phare, $4,29^\circ$, il n'y aura pas d'éblouissement. La distance minimale et maximale sur le sol est déterminée par l'équation suivante avec la distance de réglage de l'inclinaison qui de 10 m dans cet exemple.

$$distance_{sol}(\theta) = \frac{HV}{\frac{HV}{distance_{reglage}} - \theta \cdot \pi / 180^\circ} \quad (12)$$

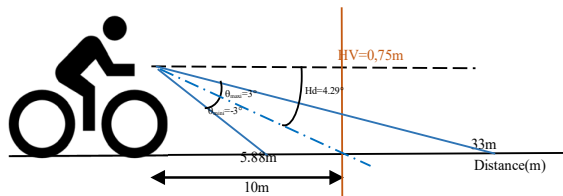


Figure 21. Vue de côté de l'éclairage avec faisceau de 3° parabolique et avec une distance de réglage à 10 m

L'équation théorique de l'éclairage au sol en fonction de l'angle du réflecteur est :

$$E_{sol}(Lux) = \frac{E(\theta_v) \cdot (distance_{mur})^2}{(distance_{sol}(\theta_v))^2} \quad (13)$$

On peut observer que l'éclairage au sol pour le réflecteur de la figure précédente va fortement diminuer en fonction du choix de l'inclinaison du phare (figure 22).

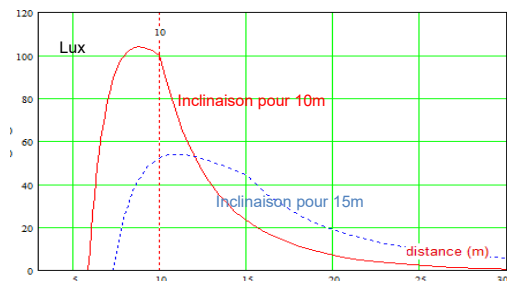


Figure 22. Eclairage sur le sol d'un phare parabolique de 3° , 43 lumens avec une inclinaison à 10 ou 15 m.

Autour des 15 m, avec un phare de 43 lumens, l'éclairage au sol correspondra juste à un éclairage urbain.

La valeur de l'éclairage à 1,8 m de haut, qui correspond à la hauteur des yeux d'un cycliste, peut être aussi tracée en fonction de la distance (figure 23). Malgré un angle de 10° , les valeurs en lux sont faibles

et ne produiront pas d'éblouissement. Mais, si le nombre de lumens est multiplié par 10, alors ces valeurs sont aussi multipliées par ce même coefficient et la limite de l'éblouissement sera atteinte.

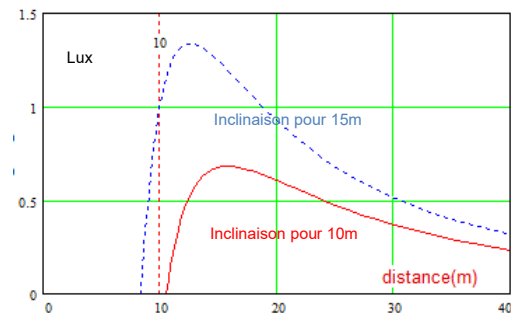


Figure 23. Eclairage à 1,8m de haut d'un phare parabolique de 10° , 43 lumens avec une inclinaison à 10 ou 15 m.

A partir de mesures sur un mur, il est donc possible de modéliser mathématiquement puis de déterminer, l'éclairage au sol ou à toutes les hauteurs possibles.

5. Projection et distributivité d'éclairage

La distributivité de l'éclairage d'une voiture sur un mur, demandée par les normes, n'étant pas du tout homogène, seule une matrice de points de mesure permet de connaître l'éclairage sur le sol par projection mathématique.

N'importe quel logiciel gérant des calculs matriciels permettrait de faire cette projection. Matlab est le logiciel le mieux adapté. Matlab étant coûteux et n'existant pas en programme open source, on pourra utiliser Scilab ou de nombreux tableurs. Dans notre étude, nous utilisons Excel avec des options en VBA (Visual Basic for Applications). Pour simplifier l'explication de l'article, seule une matrice 3*3 sera présentée dans cet article.

Exemple, avec un point central de la matrice en rouge entre -0,1m et 0,1m, cela donnera une projection de 3 points sur le sol. De même, les 2 points jaunes latéraux à 0,26 m donneront 6 points jaunes sur le sol. Puis, chaque mesure de la matrice du mur donnera une valeur de projection qui est présentée sur la figure 24 par une couleur différente.

matrice 3*3 lux à 1mur (vue de face)				valeur en lux sur le sol (vue de dessus)					
largeur (m)	m			largeur (m)	distance				
	-0,2625	0,1	0,2625		7,4	8,8	10,0	11,5	15,4
0,2625	2000	2000	100	0,2625	36,4	25,7	17,3	15,0	0,4
0,1	2000	4000	200	0 axe vertic	36,4	51,4	34,6	30,0	0,8
-0,2625	2000	2000	100	-0,2625	36,4	25,7	17,3	15,0	0,4

Figure 24. Projection au sol de l'éclairage à partir de l'éclairage matriciel sur un mur

Sur la figure 24, on peut remarquer qu'une matrice 3*3 ne donne pas une bonne précision de la projection. Il faut au minimum une matrice de 7*7 pour avoir une représentativité des valeurs de l'éclairage sur le sol. De plus, il est possible de faire une régression linéaire entre les points de la matrice du mur, pour améliorer la précision en faisant attention à ne pas le faire pour la ligne de coupure de l'éclairage.

6. Capteur de lumière

Ils existent 3 types de capteurs de lumières : photorésistors, photodiodes, phototransistors, avec de nombreuses références. Ils sont tous non linéaires. Nous allons détailler les avantages et inconvénients de ces capteurs.

6.1. LDR (light-dependent resistor)

Toutes les photorésistances n'ont pas les mêmes atténuations par rapport à la bande spectrale (figure 25). Alors qu'il est nécessaire de réaliser une correction il est parfois difficile de connaître cette réponse spectrale car non diffusée par les constructeurs.

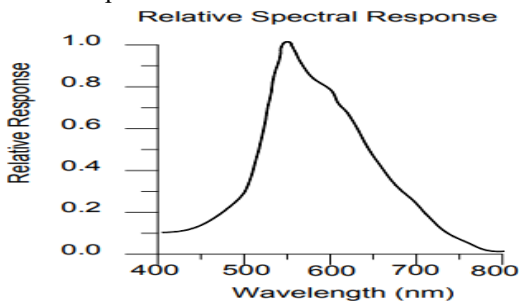


Figure 25. Réponse spectrale LDR NORPS-12 [8] 2,8€

La résistance de la LDR varie en fonction de l'éclairage selon l'équation suivante avec $a = -0,61$ et $b = 36 \text{ k}\Omega$ pour la LDR NORPS-12.

$$R_{LDR}(\Omega) = b \cdot E(\text{lux})^a \tag{14}$$

Les LDR sont facilement simulables dans ISIS en paramétrant les valeurs a et b.

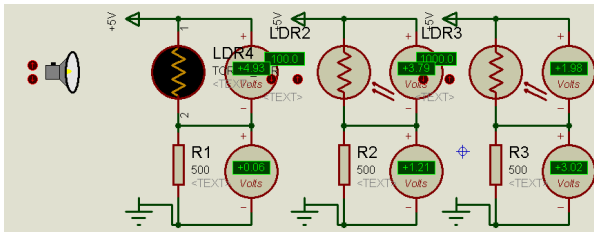


Figure 26. Simulation dans ISIS de LDR

Avec une résistance de pull down de 2000Ω pour avoir une meilleure sensibilité autour de 100 lux, et un microcontrôleur de conversion analogique de 10 bits sous 5V, la valeur de l'éclairage est calculée à l'aide de l'équation suivante (15) :

$$E(\text{valeur}_{decimale}) = \left[\left(\frac{R_{pullD} \cdot 2^{10}}{\text{valeur}_{decimale}} - R_{pullD} \right) \cdot \frac{1}{b} \right]^{\frac{1}{a}}$$

6.2. Phototransistor

En général, les phototransistors ont une bande spectrale plus large et sont moins chers que les LDR (figure 27).

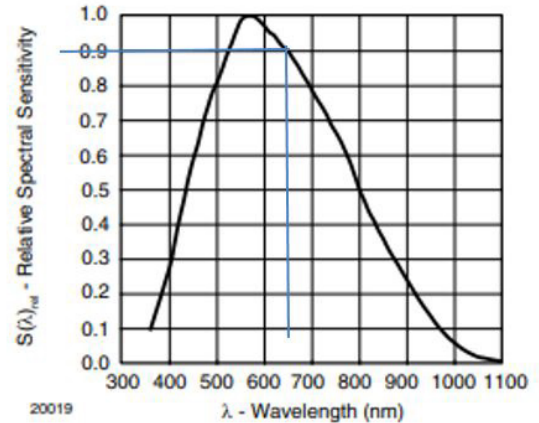


Figure 27. Sensibilité phototransistor vs Réponse spectrale [9] TEMT6000 à 0,7 € diamètre 1,5cm

Le courant varie exponentiellement comme pour les photorésistances.

$$I_{emetteur}(A) = b \cdot E(\text{lux})^a \tag{16}$$

Le TEMT6000 [9] a un coefficient exposant « a » égal à 1 donc linéaire avec le terme $b=0,1 \mu\text{A/lux}$. Par conséquent, avec une résistance de $10 \text{ k}\Omega$ et une alimentation sous 5V, l'éclairage maximum est de 5000 lux. L'éclairage donné par le microprocesseur sera obtenu par l'équation suivante

$$E(\text{tension}_{micro}) = \left[\frac{\text{valeur}_{decimale} \cdot 5V}{b \cdot R \cdot 2^{10\text{bits}}} \right]^{\frac{1}{a}} \tag{17}$$

Dans ISIS, il n'y a pas de phototransistor simulable, mais une LDR qui a un coefficient $a=1$ et $b=0,01$ alimenté par un générateur à courant constant de 1A fournira une tension identique du phototransistor précédent.

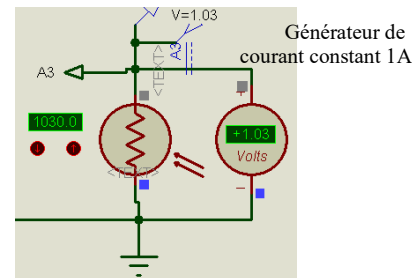


Figure 28. Simulation de phototransistor avec une LDR

La précision sur ce capteur avec la conversion à 10 bits donne une résolution à 1 lux près. Cette précision est trop faible pour certifier selon les normes à 25 m mais va être amplement satisfaisante si les mesures sont réalisées à une distance inférieure à 5 m d'un mur.

6.3. Capteur numérique lumière I2C

Pour minimiser le nombre de fils, il a été créé des capteurs avec des protocoles de communications tels que I2C. A titre d'exemple, on peut citer le TSL2561 3,8 € ou le BH1750 0,8 € qui utilisent des photodiodes (0,8 €).

I2C est un bus série synchrone bidirectionnel dans lequel plusieurs maîtres ou esclaves peuvent être utilisés

en gérant jusqu'à 128 périphériques. La plage de mesure est sur 16 bits avec une précision inférieure à 0,5 lux.

A noter que le BH1750 n'a que 2 adresses possibles et qu'en revanche, l'adresse du TSL2561 est configurable.

Sachant que les capteurs d'éclairage sont donc très bon marché, il nous reste à savoir comment acquérir une matrice de points de mesure sur un mur pour faire la distribution d'un éclairage avant de véhicule ?

7. Banc de test d'éclairage

Pour mesurer la distribution d'un éclairage, un gonio-photomètre peut être utilisé. Mais, le prix des goniomètres qui balayent un mur ou un sol pour connaître la valeur de l'éclairage, puis d'afficher les résultats, est relativement élevé. Par ailleurs, les normes demandent seulement quelques points de mesures.

Il existe des luminance-mètres qui donnent la valeur en candelas en utilisant en général un angle de 1° (cela correspond à un cercle de 17 mm de diamètre vu à 1 m) mais ils coûtent 10 fois plus chers qu'un luxmètre.

Depuis plusieurs années, sont apparus sur le marché des luminances-mètres basés sur des appareils photos CCD [17]. Ils se basent sur la pixellisation du capteur numérique qui permet d'obtenir un angle très fin et de donner l'image des nombres de candelas avec une mesure à $0,017^\circ$ [18]. Mais les logiciels de traitements sont encore chers et l'étalonnage de chaque capteur CCD reste à faire.

Les capteurs en lux étant très bon marché, une matrice de 10×10 de capteurs peut être réalisée facilement. Il faut alors multiplexer les entrées analogiques (une centaine) car il n'y aura pas assez d'entrées analogiques sur des cartes entrées d'un PC ou d'un microcontrôleur. Une configuration minimale réclame 5 shield ka12 qui multiplexent 24 entrées analogiques sur une entrée analogique du microcontrôleur en utilisant 3 entrées numériques. En revanche, avec une carte Arduino Méga et un programme qui permet de mémoriser et d'envoyer les valeurs des 100 éclairagements de la matrice d'éclairagements à un PC (par la liaison série via un fichier CSV) cela est facile à réaliser.

Les zones d'éclairages étant plus larges que hautes, la matrice des capteurs doit être différente entre les véhicules. Pour une distance d'un mur à 1m, comme sur la figure 15, pour les voitures, l'étendue des mesures doit être de 30 cm sur 7,5 cm. Pour les motos, elle doit être de 15 cm sur 7,5 cm grâce à une symétrie par rapport à l'axe vertical. Le principe sera le même avec la norme STVZO qui a un besoin d'une étendue de mesures de 15 cm sur 30 cm.

Etant donné qu'il y a des différences entre l'estimation de la projection au sol théorique et la pratique, il est alors intéressant de mesurer les valeurs d'éclairage directement sur le sol.

Par conséquent, une règle de 16 capteurs avec un décalage de 0,3 m a été réalisée, qui peut être déplacée mètre par mètre sur le sol, avec possibilité de mémorisation des mesures permettant d'enregistrer les données dans un couloir de 60 m de long.

Un sujet a été ouvert dans le forum Arduino pour la mesure sur le sol avec 16 capteurs TSL2561 pour mesurer et enregistrer les valeurs sur le sol [16]. La programmation de la matrice avec 100 capteurs devrait être disponible en open source.

Le banc de test pour éclairage pour phare ayant été défini, il nous reste à réaliser un phare optimal à un prix modique.

8. Matrice de leds pour un éclairage moto

La fabrication des moules pour un réflecteur ou une optique permettant de satisfaire aux normes coûte relativement cher (10 k€ [4]). Ces optiques complexes sont nécessaires car la largeur du faisceau est plus large que sa longueur [11].

De plus, la différence des angles du faisceau entre les feux de croisement et le plein phare font qu'une seule optique est mal adaptée, de là l'utilisation de plusieurs points lumineux.

Cependant, l'utilisation de plusieurs leds avec des optiques paraboliques permet de réaliser des éclairages bon marché car faciles à concevoir et à réaliser. De plus, dans ce cas, une commutation des leds permet de passer du mode « feu de croisement » au mode « plein phare ».

Pour une moto avec une optique principale de $0,85^\circ$, avec 2 autres leds qui nécessitent un angle de $3,2^\circ$, on peut observer sur la figure suivante un éclairage prenant en compte la largeur du faisceau.

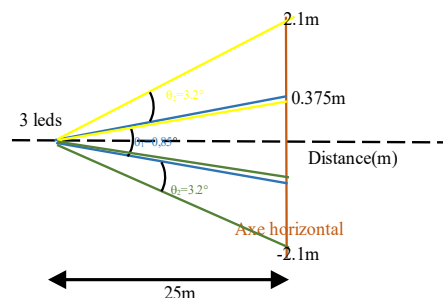


Figure 29. Vue de dessus d'un éclairage 3 faisceaux de leds pour moto pour les feux de croisement.

Evidemment, il est possible d'augmenter le nombre de leds qui éclairent latéralement avec des faisceaux plus faibles ce qui permettra de diminuer les puissances mais augmentera le coût de la réalisation du phare. Enfin, les éclairages lasers qui permettent d'obtenir des faisceaux étroits avec un éclairage important feront certainement évoluer les normes.

9. Conclusion

Lors de la conception d'un éclairage avant, il est nécessaire de bien connaître les normes. Si certaines normes sont justifiables, d'autres le sont moins et font, par ailleurs, polémiques chez certains usagers. Il est par ailleurs souvent difficiles dans les données que fournissent les constructeurs car elles sont parcellaires et parfois même erronées.

Dans la pratique, des utilisateurs rajoutent souvent des éclairages sur certains véhicules (particulièrement des vélos) qui ne sont dès lors plus certifiés bien que très sécuritaires.

Un banc de test très économique peut être facilement réalisé avec des programmes ne demandant pas des ressources de calculs importantes et des logiciels très compliqués. Partir de mesures relativement aisées à réaliser, on peut obtenir une caractérisation précise d'une optique de phare donnée.

10. Références

- Normed European approved ECE R112 car
<http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/r112r1e.pdf>
- Conditions on the luminous flux of light UTAC
<https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2014/wp29gre/GR-E-72-25e.pdf>
- Technical handbook valeoscope Mars 2018
https://www.dalroad.com/wp-content/uploads/2015/06/lighting_systems_from_light_to_advanced_vision_technologies_technical_handbook_valeoscope_en_998542_w eb.pdf
- Lentille pour motorcycle ECER113
https://www.researchgate.net/publication/281165976_Optical_design_of_an_LED_motorcycle_headlamp_with_compound_reflectors_and_a_toric_lens
- Normed European approved ECE R113
https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/R113rev2_e.pdf
- STVZO éclairage vélo
<http://www.enhydratutris.de/Fahrrad/Beleuchtung/node403.html>
https://swhs.home.xs4all.nl/fiets/tests/verlichting_analyse/verkeerregels/de_stvzo/index_en.html
- A.Sivert, F.Betin B.Vacossin. P.Dondon
 « Innovative sustainable development teaching at university: Study of lighting systems for safety bicycle rides »
<http://www.wseas.org/multimedia/journals/education/2019/a145110-212.pdf>
- LDR NORPS-12 <https://docs-emea.europa.eu/webdocs/15e8/0900766b815e8a2a.pdf>
- TEMT6000
<https://www.vishay.com/docs/81579/temt6000.pdf>
<https://www.vishay.com/docs/81579/temt6000.pdf>
 Jin-Jia Chen, Kuang-Lung Huang
- « Computer modeling of a fiber-and-light-emitting-diode-based vehicle headlamp »
 Design method of high-efficient LED headlamp lens
https://pdfs.semanticscholar.org/cf45/6d4dd8cd1a814df14e4b9a8f443e2fb24c99.pdf?_ga=2.62755045.81972202.1570945981-993999492.1570945981
- Headlight Test and Rating Protocol, 2016
https://www.iihs.org/media/714fb5d9-b769-48ae-9fec-49bca8fd8ada/G2TuBg/Ratings/Protocols/current/headlight_test_rating_protocol.pdf
- Certification éclairage Benex
<https://www.lordbenex.com/safety-certification.htm>
<https://www.lordbenex.com/front-bike-bicycle-headlight/ET-3151-k-mark-90lux-bike-front-light.html#parentHorizontalTab2>
- [14] BH1750 capteur numérique
<https://www.instructables.com/id/BH1750-Digital-Light-Sensor/>
<https://www.mouser.com/datasheet/2/348/bh1750fvi-e-186247.pdf>
<https://www.aranacorp.com/fr/gerez-plusieurs-arduino-avec-un-bus-i2c/>
- Reflectance et luminescence
https://www.ifstar.fr/collections/BLPCpdfs/blpc_204_25-35.pdf
http://www.cetu.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/DP_Eclairage_cle7c81c7.pdf
https://assets.madebydelta.com/assets/docs/roadsensors/Technical_Reports/RS101.pdf
- TSL2561
https://github.com/adafruit/Adafruit_TSL2561/blob/master/examples/sensorapi/sensorapi.ino
<https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/TSL2561.pdf>
- Banc de test d'éclairage véhicules avec arduino Mega
<https://forum.arduino.cc/index.php?topic=643400.0>
- Luminance meter
<https://www.ee.ryerson.ca/~phiscock/astrometry/luma/>
<https://www.ee.ryerson.ca/~phiscock/astrometry/light-pollution/luminance-notes-2.pdf>
<https://www.ee.ryerson.ca/~phiscock/astrometry/light-pollution/street-lamp-measurement.pdf>
<https://www.ee.ryerson.ca/~phiscock/astrometry/luma/>
- Soft de simulation d'éclairage Trace pro
<https://www.lambdares.com/tracepro-pricing-intl/>
- Design of LED edge-lit light bar for automotive taillight applications
https://www.researchgate.net/publication/259560095_Design_of_LED_edge-lit_light_bar_for_automotive_taillight_applications
- Légifrance éclairage véhicule
<https://www.legifrance.gouv.fr/affichCode.do?idSectionTA=LEGISCTA000006177087&cidTexte=LEGITEXT000006074228>

CONCOURS SMART INDUSTRIE

CLAIRE BASSET – JEAN-PHILIPPE ILARY

IUT Ville d'Avray département GEII

cbasset@parisnanterre.fr – jpilary@parisnanterre.fr

Résumé : Durant le salon GLOBAL INDUSTRIE qui se tient du 31 mars au 3 avril au Parc des Expositions de Paris Nord Villepinte, il est proposé à des étudiants BAC+2 et BAC+3 de participer à un concours autour de l'Industrie 4.0. Cet événement doit permettre aux étudiants de rentrer en relation avec des industriels et de réfléchir à une problématique à travers un travail d'équipe.

1. Global Industrie

Organisé les années paires à Paris et impaires à Lyon, GLOBAL INDUSTRIE est le lieu où se pense, s'imagine, s'invente, se construit, se révolutionne, se transforme l'industrie de demain !

GLOBAL INDUSTRIE souhaite accompagner les femmes et les hommes vers de nouvelles compétences et de nouveaux métiers. Il cherche à valoriser l'image de l'industrie en France auprès du grand public en général, et des jeunes en particulier, tout cela en cherchant à soutenir toute la communauté industrielle pour qu'elle s'engage au mieux vers l'industrie du futur. Cet événement permet de rayonner au plan européen et mondial pour redonner sa véritable place à l'industrie hexagonale.

Pendant 4 jours et sur 110 000 m² du Parc des Expositions de Paris Nord Villepinte, GLOBAL INDUSTRIE 2020 proposera en effet :

- Une offre technologique mondiale rassemblant tous les savoir-faire, compétences, expertises et solutions des 40 principaux secteurs industriels,
- Une véritable vitrine de l'innovation valorisant les toutes dernières nouveautés,
- Une plateforme d'échanges favorisant la création de partenariats ou d'alliances, le lien entre la recherche et l'entreprise, les bonnes relations entre clients et fournisseurs, ou encore la rencontre des jeunes talents avec les dirigeants et spécialistes des Ressources Humaines,
- Des temps forts et des animations permettant de voir, toucher et comprendre les innovations et les procédés industriels de pointe, et dévoilant les perspectives de l'industrie du futur,
- Une veille des tendances et des signaux émergents pour mieux anticiper les transformations du secteur.

<https://www.global-industrie.com/fr>

2. Industrie 4.0

Le concept d'industrie 4.0 ou industrie du futur cherche à trouver de nouvelles façons d'organiser les moyens de production.

Animée par l'émergence de nouvelles technologies, l'industrie 4.0 désigne une nouvelle génération d'usines connectées, robotisées et intelligentes. Les frontières entre le monde physique et digital s'amenuisent et amènent à une usine 4.0 interconnectée dans laquelle les collaborateurs, les machines et les produits interagissent.

C'est pour sensibiliser nos étudiants à cette révolution industrielle, qu'un groupe d'industriel et d'enseignants ont proposé d'organiser le « concours : Smart Industrie » durant l'évènement Global Industrie

3. Concours Smart Industrie

Ce concours « Génération Smart Industrie » permet à des équipes de 4 à 5 étudiants d'établissements et de sections technologiques différentes de répondre à une problématique liée à l'industrie 4.0 donnée le premier jour. Le groupe doit partir à la rencontre des industriels présents sur le salon afin de découvrir leurs produits et solutions pour ensuite les intégrer dans la solution technologique qu'ils proposent.

Durant la matinée de la deuxième journée, les étudiants réalisent, dans un espace dédié, une synthèse de leur réflexion et de leurs échanges avec les industriels. Ils produisent enfin une présentation qui leur permettra de défendre leurs idées devant un jury composé d'industriels principalement et d'enseignants durant l'après-midi de cette seconde journée. Pendant 15 à 20 min, suivies de 15 min de questions/réponses, ils vont défendre leur solution répondant au cahier des charges du sujet proposé.

Les lauréats du concours seront récompensés par un cadeau offert par les industriels présents dans le jury.



La SEE et la Maison d'Ampère engagées dans le grand projet « Ampère 2020 »



Illustration : Pascal Garnier

En 2018, l'idée de mettre à l'honneur Ampère en 2020 pour le **200^{ème} anniversaire de la découverte des lois de l'Électrodynamique** a donné naissance à un véritable projet qui présente aujourd'hui un programme de manifestations sur l'ensemble de l'année 2020.

Cette commémoration qui vise à faire connaître l'œuvre d'Ampère, à reconnaître ses mérites, son influence et le rayonnement de ses travaux, mais aussi à promouvoir le domaine des sciences de l'Electricité a été présentée à de nombreuses personnalités et a été accueillie favorablement. Les communautés scientifiques et industrielles et aussi les représentants du monde de l'éducation, que nous avons rencontrés dans le courant de l'année 2019, nous ont assurés de leur soutien pour les différentes manifestations que nous organisons.

Pour plus de lisibilité tout au long de l'année, un site dédié a été créé et mis en ligne :

www.ampere2020.fr.

INFORMATION 3EI

La Journée 3EI 2020

JOURNÉE 3EI — 26 JUIN 2020

ENS PARIS-SACLAY

4, AVENUE DES SCIENCES
91190 GIF-SUR-YVETTE

Le comité de rédaction de la Revue 3EI propose une journée d'échanges sur le thème de la

**PÉDAGOGIE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE
ET EN PHYSIQUE APPLIQUÉE**

Abonnez-vous à la



BULLETIN À COMPLÉTER ET RENVOYER :

SEE - 17 rue de l'Amiral Hamelin - 75783 Paris cedex 16 - France
01 56 90 37 17 - abo@see.asso.fr

BULLETIN D'ABONNEMENT 2020



VERSION PAPIER

5 numéros : mars, mai, juillet, octobre, décembre.
Distribution postale

France & UE	Hors UE
<input type="checkbox"/> 125 € TTC	<input type="checkbox"/> 132,43 € HT



VERSION NUMÉRIQUE

Accès aux publications numériques
ouvert pendant un an à compter
de la date de souscription

France & UE	Hors UE
<input type="checkbox"/> 90 € TTC	<input type="checkbox"/> 88,15 € HT



VERSION DUO

Version imprimée
+ version numérique

France & UE	Hors UE
<input type="checkbox"/> 155 € TTC	<input type="checkbox"/> 161,81 € HT

VERSION PREMIUM

- > Adhésion SEE avec accès eREE
- + Tarif préférentiel à la revue REE format papier
- + Accès numérique aux revues 3E.I et REE
- + Tarifs préférentiels aux conférences et journées d'études

Adhésion SEE		
Standard	Retraités, enseignants, jeunes actifs (< 35 ans)	Etudiants, en recherche d'emploi
<input type="checkbox"/> 125 € TTC	<input type="checkbox"/> 65 € TTC	<input type="checkbox"/> 15 € TTC
+ Abonnement REE (Version papier)		
<input type="checkbox"/> France & UE : 63 € TTC		<input type="checkbox"/> Hors UE : 71,70 € HT

TVA de la revue REE : 2,1 %. Adhésion collective possible via des conventions de partenariat - Contactez-nous à : sg@see.asso.fr

MES COORDONNÉES

Prénom : Nom :

ADRESSE DE LIVRAISON

Adresse :

Code postal : Pays :

Ville :

Tél. :

e-mail* :

* Obligatoire

MON RÉGLEMENT

Je règle la somme de €

- par Chèque à l'ordre de la SEE
 Carte bancaire (Visa, Eurocard/Mastercard)

N° Carte

Date de validité N° cryptogramme (3 derniers chiffres au dos de la carte)

Je consens à recevoir les autres diffusions de la SEE & de ses activités (congrès, soirées débats, revues, etc.) qui sont extérieur aux diffusions liés à mon abonnement.

Conformément aux dispositions légales et réglementaires en matière de données personnelles, les informations recueillies sur ce formulaire sont enregistrées dans un fichier informatisé par la SEE (Société de l'électricité, de l'électronique et des technologies de l'information et de la communication) pour la mise en place et le suivi de l'abonnement souscrit ainsi que pour l'envoi de courriers, e-mails de réabonnements. Elles sont conservées et sont destinées à être utilisées par la SEE et les prestataires techniques de la SEE afin de permettre la bonne réception du magazine et d'assurer le service client. Vous pouvez exercer votre droit d'accès aux données vous concernant par courrier : SEE - Service abonnements 17 rue de l'Amiral Hamelin 75783 Paris Cedex 16 ou par le formulaire de contact du site web : www.see.asso.fr
Offre valable du 01/01/2020 au 31/12/2020.

ADRESSE DE FACTURE (Si différente)

Je joins le bon de commande administratif N° et je désire recevoir une facture au nom de mon employeur pour paiement à réception

Raison sociale de l'employeur :

Service : Activité (facultatif) :

Adresse :

Code postal : Ville :

Pays : N° TVA :

N° TVA intracommunautaire : obligatoire pour règlement HT en UE hors de France

e-mail* :

* Obligatoire

Date Signature (mentions obligatoires) et cachet si il y a lieu :



+ RAPIDE :
<https://www.see.asso.fr/ree>



La Revue REE est une publication de la SEE



LES ARCHIVES DE **La Revue 3EI,**
POUR PARTAGER L'ENSEIGNEMENT DU GÉNIE
ÉLECTROTECHNIQUE ET DE L'ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE



1997-1998

- 11** Le transformateur
- 12** Les capteurs
- 13** Le génie électrique dans l'armement
- 14** Pratiques pédagogiques et réalités industrielles

1998-1999

- 15** Les aimants et électroaimants
- 16** L'automatique en électrotechnique
- 17** L'appareillage haute tension
- 18** Pratiques pédagogiques et réalités industrielles

1999-2000

- 19** La traction électrique ferroviaire
- 20** Energies renouvelables
- 21** Moteurs électriques pour applications de grandes séries
- 22** Pratiques pédagogiques et réalités industrielles

2000-2001

- 23** Les automatismes industriels
- 24** L'éclairage
- 25** L'Etat de l'Art en électronique de puissance
- 26** Pratiques pédagogiques et réalités industrielles

2001-2002

- 27** Métrologie : mesures et estimations
- 28** Convertisseurs propres
- 29** Les alimentations et convertisseurs embarqués
- 30** Pratiques pédagogiques et réalités industrielles

2002-2003

- 31** Mesures dans les systèmes électrotechniques
- 32** Applications des micro-ondes de puissance
- 33** L'électronique dans l'automobile
- 34** Applications pédagogiques et réalités industrielles

2003-2004

- 35** L'outil informatique dans l'enseignement
- 36** La problématique de l'énergie, la place de l'électricité
- 37** Applications pédagogiques et réalités industrielles
- 38** Applications pédagogiques et réalités industrielles

2004-2005

- 39** La production décentralisée d'électricité (1)
- 40** La production centralisée d'électricité (2)

- 41** Matériaux magnétiques pour convertisseurs d'énergie

- 42** Pratiques pédagogiques et réalités industrielles

2005-2006

- 43** Les réseaux électriques embarqués
- 44** Réseaux de transport d'énergie
- 45** Matériaux piézo électriques
- 46** Applications pédagogiques et réalités industrielles

2006-2007

- 47** Matériaux électro actifs
- 48** Stockage de l'énergie - 1^{ère} partie
- 49** Stockage de l'énergie - 2^{ème} partie
- 50** Pratiques pédagogiques de l'académie de Lille

2007-2008

- 51** Gisements d'économie d'énergie (1)
- 52** Gisements d'économie d'énergie (2)
- 53** FPGA (Field-Programmable Gate Array)
- 54** Pratiques pédagogiques de l'académie de Toulouse

2008-2009

- 55** Piles à combustible (1)
- 56** Piles à combustibles (2)
- 57** La Cogénération
- 58** Pratiques pédagogiques de l'académie de la région Paca

2009-2010

- 59** L'énergie des Mers
- 60** Les standards de communication
- 61** Les Aspects thermiques dans les convertisseurs
- 62** Applications pédagogiques de l'Académie de Versailles

2010-2011

- 63** Véhicule électrique
- 64** L'avion plus électrique
- 65** Compatibilité électromagnétique (CEM)
- 66** Applications pédagogiques : Académie de Créteil

2011-2012

- 67** L'éclairage
- 68** Défaillance et durée de vie du matériel électrique
- 69** Bâtiment du futur...

- 70** Applications pédagogiques : les STIDD

2012-2013

- 71** Systèmes d'acquisition, matériel embarqué
- 72** Convertisseurs multicellulaires, série, parallèle, de puissance
- 73** Réseaux de transport de l'énergie et liaisons continues
- 74** Réalité Industrielle et Recherche

2013-2014

- 75** Biologie et EEA
- 76** Démarche de projets
- 77** Machines Tournantes « du besoin aux usages »
- 78** Applications pédagogiques

2014-2015

- 79** Convertisseur électronique de puissance « du cahier des charges à la réalisation »
- 80** Réglages des procédés
- 81** Autoconsommation et autoproduction
- 82** Jeunes chercheurs et applications pédagogiques

2015-2016

- 83** Spécial STI2D
- 84** Réseaux DC
- 85** Communication et fibre optique
- 86** Enseignement et / ou jeunes chercheurs

2016-2017

- 87** Le Stockage de l'énergie électrique
- 88** Magnétisme en électrotechnique
- 89** Numéro spécial jeunes chercheurs JCGE
- 90** Maintenance des équipements et installations



15 ANS D'ARCHIVES 3EI EN DVD

DVD regroupant tous les articles des n° 0 à 59, de mai 1994 à décembre 2009 sous forme numérique (pdf scannés/vectoriels pour les plus récent.)

BON DE COMMANDE >>> A retourner à la SEE - La Revue 3EI - 17 rue de l'Amiral Hamelin - 75783 Paris cedex 16 - France

Tarifs au 1 ^{er} janvier 2018 Prix unitaire TTC		
Quantité	France & UE	Hors UE
A partir de :	Prix unitaire	
1 Volume	12 €	14 €
3 Volumes	10 €	12 €
DVD (TVA 20%) Archives La Revue 3EI		
Individuel	60 €	70 €
Institutionnel (CDI, laboratoire...)	100 €	110 €

- Je commande les numéros :
- Et/ou la série complète des années :
- Je commande le DVD Archives

Nom et prénom :

Société : Fonction :

Adresse :

Code postal Ville : Pays :

Tél. : e-mail :

Je règle la somme totale de : € TTC (TVA 2,10%)
 par chèque bancaire à l'ordre de la SEE
 Carte bancaire (Visa, Eurocard/Mastercard)
 N° Carte :

Date de validité :

N° cryptogramme : (3 derniers chiffres au dos de la carte)

Date, signature (mentions obligatoires) et cachet si il y a lieu :