

Apport des convertisseurs multiniveaux modulaires aux véhicules électriques

Gaël PONGNOT¹ - Anatole DESREVEAUX^{1,3} - Clément MAYET²
Denis LABROUSSE^{1,3} - Francis ROY⁴ - Thomas PEUCHANT⁵

Édité le
22/01/2024

école normale supérieure paris-saclay

¹ Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, CNRS, SATIE, F-91190, Gif-sur-Yvette, France

² Univ. Lille, Arts et Métiers Institute of Technology, Centrale Lille, Junia, ULR 2697 - L2EP, Lille, F-59000, France

³ Le Cnam, Paris, F-75003, France, HESAM Université

⁴ Stellantis

⁵ Saft

Cet article fait partie du N° 111 de La Revue 3EI de janvier 2024. Les travaux présentés ont été réalisés dans le cadre du projet IBIS, un projet d'investissement d'avenir de l'ADEME.

Cet article expose le fonctionnement d'un véhicule électrique à batterie actuel, en particulier sa chaîne de traction, et s'intéresse à une structure innovante fusionnant les batteries avec l'étage de conversion DC-AC pour créer un convertisseur multiniveau modulaire. Le principe de fonctionnement de ce convertisseur est détaillé, avec les enjeux associés à sa mise en œuvre. Un certain nombre d'atouts potentiels face aux véhicules actuels sont présentés, et une modélisation des pertes de la chaîne de traction est proposée. Ce travail se base sur les recherches effectuées dans le cadre du projet IBIS, regroupant des industriels et des chercheurs.

1 - Développement des véhicules électriques

Les véhicules électriques (à batterie et hybrides rechargeables) représentent 21% des ventes en 2022 en Europe, part en constante augmentation. Cet élan est porté par l'essor de ces véhicules en Allemagne, au Royaume-Uni et en France notamment qui représentent une part importante du marché européen. Sur le marché français, 26% des véhicules vendus en 2023 étaient électriques, plus d'un quart du marché, dont 16.8% pour les véhicules électriques à batterie [1]. Le premier marché mondial restant la Chine (Figure 1), avec 14 millions de véhicules électriques en circulation cette même année, contre 8 millions en Europe [2].

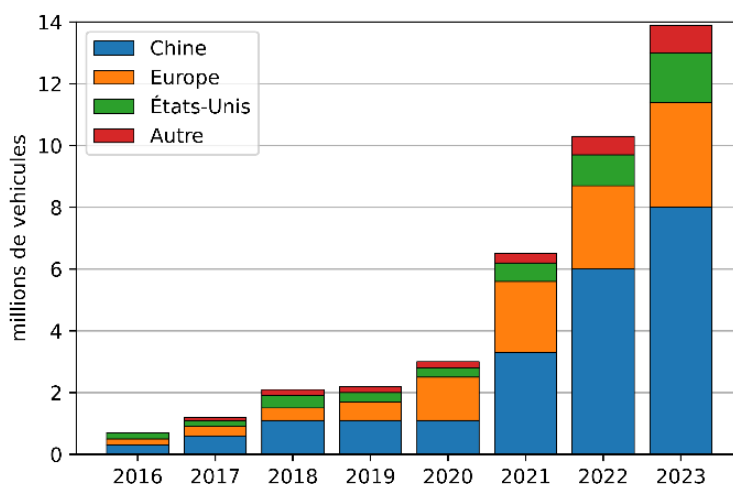


Figure 1 : Ventes annuelles de véhicules électriques dans le monde

Cependant une pénétration profonde du marché exige que les véhicules électriques (VE), et en particulier les véhicules électriques à batterie (VEB), aient une autonomie et un coût acceptables. Cela est permis, principalement, par l'augmentation de la densité énergétique des batteries grâce aux technologies Li-ion et à la maîtrise croissante de leurs procédés de fabrication [3]. Un autre axe développé est l'amélioration de l'efficacité énergétique de l'ensemble de la chaîne cinématique afin de réduire toujours plus la consommation des véhicules, l'effort étant porté par la recherche sur l'amélioration des chaînes de traction électrique [4].

De plus, l'augmentation de la part des énergies intermittentes sur le réseau électrique conduit au nécessaire accroissement des capacités de stockage d'énergie [5]. Dans cette perspective, la création de centres de stockage stationnaire d'énergie dans des batteries commence à être mise en œuvre [6], [7]. En complément, les VEB pourraient alors être mis à contribution dans de futurs réseaux électriques communicants (Vehicule to Grid, V2G) [8]. Ce dernier point nécessite la réversibilité en puissance du chargeur embarqué, ce qui n'est pas toujours le cas.

Dans la suite de cet article, nous allons mettre de côté la recherche sur les technologies de batterie pour nous concentrer sur l'utilisation de l'énergie embarquée et les architectures de VEB associés à ces usages. En particulier, nous regarderons le cas d'un véhicule électrique conventionnel et celui d'un véhicule qui exploiterait une nouvelle architecture modulaire. Nous nous intéresserons à ses atouts en termes de performance, mais également de polyvalence et de résilience.

2 - Architecture des véhicules électriques à batterie

Un véhicule électrique doit répondre à deux principaux cas d'utilisation : le conducteur doit pouvoir le conduire et le recharger. La Figure 2 décompose la conduite en trois actions : accélérer, ralentir et diriger le véhicule, ceci est commun à tout type de véhicule. La recharge peut également être décomposée en trois modes : monophasée, triphasée ou continue, tous les véhicules ne sont pas compatibles avec tous les modes de recharge [9].

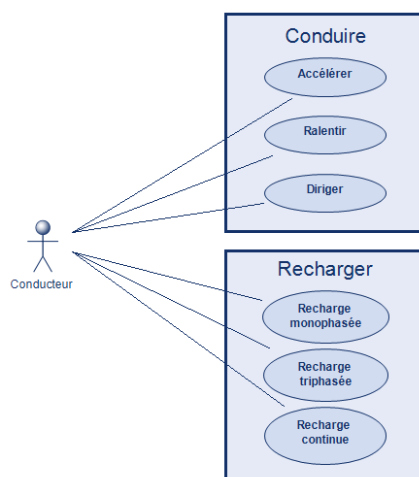


Figure 2 : Diagramme des cas d'utilisation d'un véhicule électrique

Dans un véhicule électrique à batterie conventionnel, on retrouve les éléments présentés à la Figure 3. L'énergie stockée dans la batterie est distribuée aux différents organes du véhicule par le biais d'un bus de tension continue. La traction et la récupération d'énergie au freinage sont assurées par l'ensemble : onduleur de traction, machine de traction et transmission mécanique.

Le réseau de bord (calculateurs, interface avec l'utilisateur, système multimédia, climatisation, etc...) est alimenté grâce à une batterie de servitude comme dans le cas d'un véhicule thermique. Cette batterie est rechargée, non pas avec un alternateur relié au moteur comme sur un véhicule thermique, mais via un convertisseur DC-DC qui fait le lien entre bus haute tension (batterie

principale) et bus basse tension (servitude). Enfin la recharge s'effectue soit à travers un chargeur embarqué (convertisseur AC-DC), soit en se connectant directement au bus haute tension (recharge rapide en courant continu).

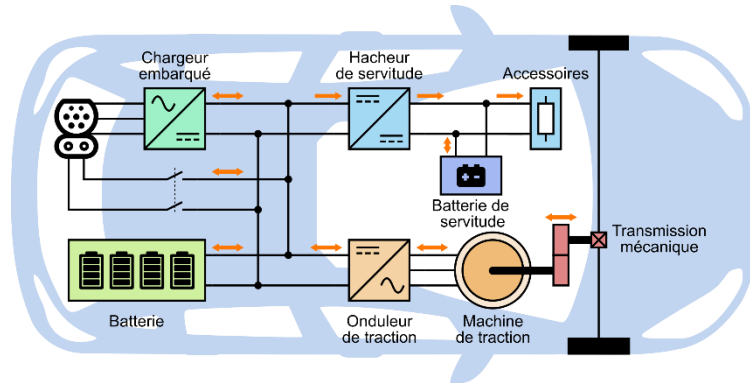


Figure 3 : Schéma synoptique d'un véhicule électrique conventionnel

2.1 - Transferts de puissance et mode d'utilisation

Le recours à un bus de tension permet de connecter des sources de puissance entre elles, ici on compte : un élément de stockage (batterie), un consommateur final (réseau de bord) et deux interfaces de transfert (réseau électrique et machine de traction). Selon les cas d'utilisation, les transferts de puissances différent, Figure 4.

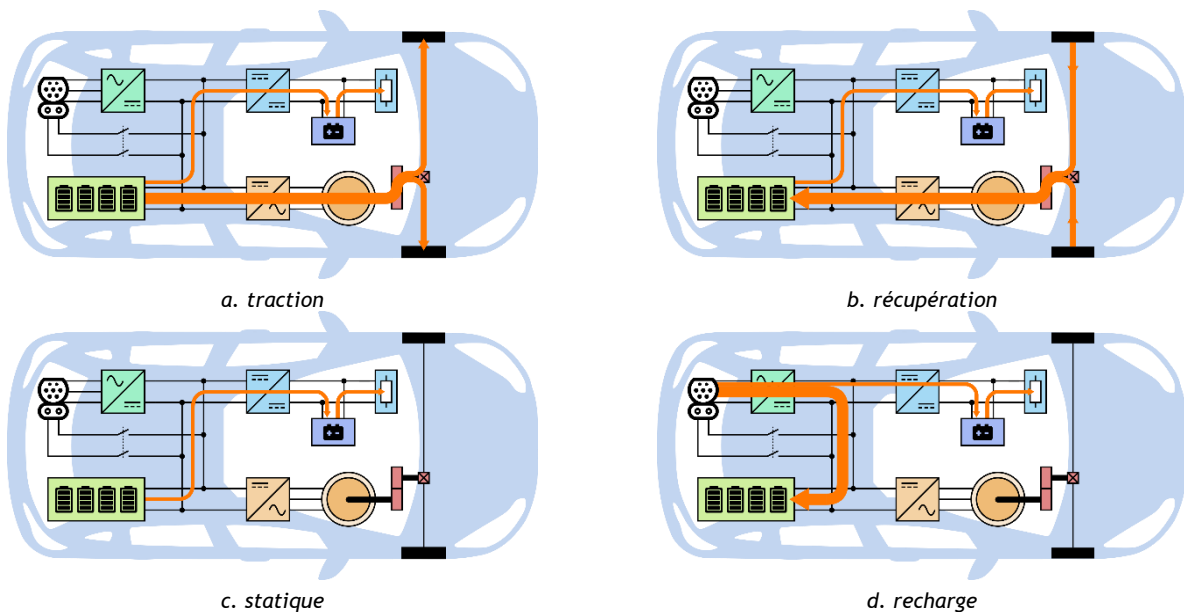


Figure 4 : Transferts de puissance dans différents modes d'utilisation

En traction, la machine électrique fournit de la puissance aux roues pour mettre en mouvement le véhicule, Figure 4a. Lorsque le conducteur ralentit, les véhicules électriques ont la particularité de pouvoir récupérer une partie de l'énergie cinétique pour la stocker dans la batterie, Figure 4b. Cette récupération est possible, car toute la chaîne énergétique (onduleur, machine, transmission) est réversible en puissance. Les freins mécaniques sont alors moins sollicités.

Le cas statique se superpose à ces deux cas de mouvement. Aucun transfert d'énergie n'est réalisé avec les roues, le seul transfert présent est dirigé vers le réseau de bord, nécessitant une puissance bien plus faible que la traction, mais de manière permanente, Figure 4c.

Enfin, en recharge AC, la majorité du flux de puissance traverse le chargeur embarqué pour atteindre la batterie, Figure 4d. En recharge DC, ce convertisseur ne perçoit plus le flux de

puissance qui arrive directement de la prise vers la batterie. Le recours au V2G est essentiellement envisagé dans le cas alternatif et nécessite que le chargeur embarqué soit réversible pour inverser le flux de puissance par rapport à la recharge, la batterie du véhicule fournit alors de l'énergie au réseau.

2.2 - Structure de la chaîne de traction

L'utilisation essentielle d'un véhicule est la conduite. Dans ce cadre, l'essentiel du flux de puissance transite par la chaîne de traction qui transforme l'énergie stockée sous forme chimique dans les batteries en énergie mécanique en sortie de machine en passant par le vecteur énergétique *électricité*. Les machines utilisées dans les véhicules étant pour la plupart triphasées [10], un onduleur de tension est nécessaire pour convertir la tension continue du bus batterie en tension triphasée alternative de fréquence et d'amplitude variable pour alimenter la machine électrique.

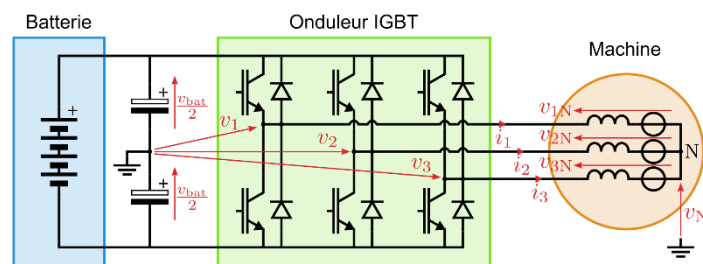


Figure 5 : Schéma électrique d'une chaîne de traction conventionnelle

Mise en équation

Chaque bras d'onduleur dans une architecture triphasée classique comporte deux interrupteurs de puissance pilotés qui forment une cellule de commutation (Figure 5) : à tout instant, ces deux interrupteurs sont dans des états complémentaires, dépendant de la fonction de modulation f_{mi} binaire (pouvant prendre les valeurs 0 ou 1). Lorsque $f_{mi} = 1$ le transistor du haut du bras i est passant et celui du bas est bloqué, conduisant ainsi à écrire :

$$v_i = V_{bat} \left(f_{mi} - \frac{1}{2} \right) \quad (1)$$

Les tensions perçues par la machine dépendent du potentiel du point neutre, qui s'exprime, dans le cas d'une machine équilibrée à neutre non relié :

$$v_N = \frac{v_1 + v_2 + v_3}{3} = V_{bat} \left(\frac{f_{m1} + f_{m2} + f_{m3}}{3} - \frac{1}{2} \right) \quad (2)$$

Ainsi on peut écrire la relation entre les tensions perçues par les enroulements de la machine et les ordres de commande des bras d'onduleur.

$$\begin{pmatrix} v_{1N} \\ v_{2N} \\ v_{3N} \end{pmatrix} = \frac{V_{bat}}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_{m1} \\ f_{m2} \\ f_{m3} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Les paragraphes suivants présentent trois stratégies de commande courantes pour ce type de structure : la commande pleine onde, la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) et la commande vectorielle.

Commande pleine onde

Dans le mode de fonctionnement, les interrupteurs sont alternativement bloqués ou passants pendant la moitié de la période T . Les tensions v_i sont alors des créneaux de rapport cyclique 50%

et d'amplitude $\frac{V_{bat}}{2}$, déphasés deux à deux de $\frac{2\pi}{3}$. De par l'équation (3), les harmoniques multiples de 3 ne sont pas présents dans les tensions v_{iN} , ce qui amène aux formes d'onde présentées par la Figure 6a. Le fondamental des tensions v_{iN} a pour valeur $V_{1,F} = \frac{2}{\pi} V_{bat}$ [11].

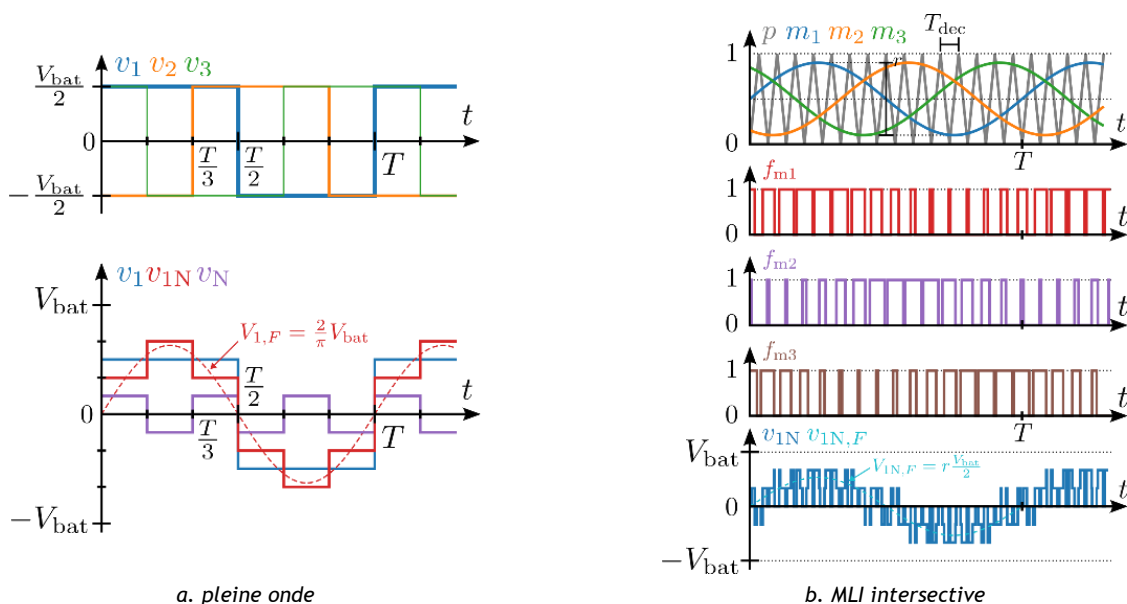


Figure 6 : Allure des tensions pour des commandes scalaires

La tension produite a un spectre très riche en basse fréquence. Celui-ci contient les harmoniques de $F = 1/T$ non-multiples de 3, ce qui a des effets néfastes sur le rendement de la machine. En outre, la fréquence est bien réglable, mais l'amplitude de la tension de sortie ne l'est pas, elle est proportionnelle à la tension du bus continu. C'est pourquoi cette solution n'est pas retenue dans le cadre des véhicules, car elle nécessiterait l'ajout d'un convertisseur DC-DC en amont.

Commandes par modulation de largeur d'impulsion

La modulation de largeur d'impulsion (MLI) d'une cellule de commutation peut être obtenue par comparaison d'un signal triangulaire (porteuse p) qui détermine la fréquence de découpage avec le signal de modulation m_i , on parle alors de MLI intersective [12]. La Figure 6b présente le cas d'une MLI centrée (porteuse triangulaire symétrique).

Le spectre de la tension de sortie est riche en contenu haute fréquence, autour de $F_{dec} = 1/T_{dec}$ et ses multiples, qui sont plus facilement filtrables. L'amplitude du fondamental de cette tension est donnée par $V_{1,F} = r \frac{V_{bat}}{2}$ avec $r \in [0,1]$. L'amplitude et la fréquence sont alors réglable, avec une amplitude maximale de $V_{1,F}^{max} = \frac{V_{bat}}{2}$.

Commandes vectorielles

Les commandes précédentes traitent chaque phase indépendamment, elles sont alors qualifiées de scalaires. Les commandes vectorielles utilisent la transformation de Clarke (4) ou de Concordia pour représenter les tensions dans le plan complexe α, β . Les 8 configurations possibles de l'onduleur triphasé délimitent alors 6 secteurs, comme le montre la Figure 7a, deux configurations conduisant à la tension nulle. La transition d'un point à un voisin ne nécessite la commutation que d'un seul bras.

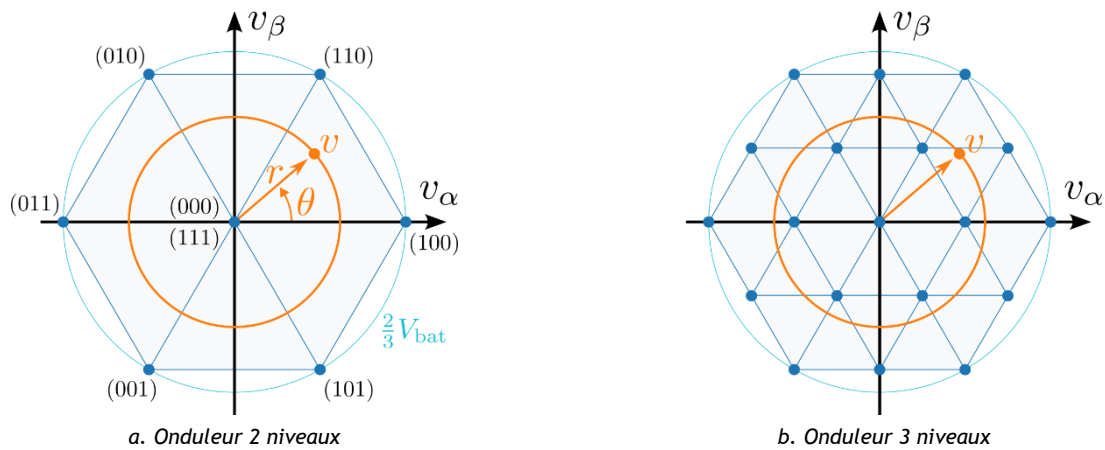


Figure 7 : Principe de la commande vectorielle

Pour synthétiser la tension complexe souhaitée, une pondération des trois points délimitant le secteur est calculée pour faire correspondre leur barycentre avec le point désiré. Ces pondérations correspondent aux fractions de période de commutation à consacrer à chaque état [13].

$$x_{\alpha\beta 0} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} x_{123} \quad (4)$$

Le régime linéaire de la commande vectorielle se limite au cercle inscrit à l'hexagone, Figure 7a. Dès lors, l'amplitude de tension maximale possible avec cette commande est de $V_{1,F}^{\max} = \frac{V_{\text{bat}}}{\sqrt{3}}$.

Dans le cadre d'onduleur multiniveau, la constellation de points s'enrichit et le nombre de secteurs augmente, Figure 7b. Si bien que lorsque le nombre de niveaux est suffisant, il est possible de s'affranchir du découpage pour se placer sur le point le plus proche de l'objectif avec une marge d'erreur acceptable. Cette commande est appelée par vecteur le plus proche (NVC).

Perspective technologique

La plupart des onduleurs de tractions sont aujourd'hui basés sur des transistors IGBT silicium. Or les transistors à base de silicium (Si) font aujourd'hui face à leurs limites physico-chimiques. Des technologies émergentes apparaissent, regroupées sous le nom de matériaux à large bande interdite (WBG : *Wide-Band Gap*) [14]. La bande interdite est une caractéristique quantique des semi-conducteurs, son augmentation repousse les limites physiques actuelles, en particulier en termes de résistance à l'état passant, Figure 8.

Notamment, des transistors à base de carbure de silicium (SiC) et de nitrure de gallium (GaN) sont aujourd'hui sur le marché. Les transistors SiC sont cependant dans un état de développement plus avancé que les GaN. L'utilisation de tels transistors octroie une amélioration des rendements des convertisseurs [15].

La technologie est encore peu répandue, en particulier à cause d'un coût élevé. Malgré cela, les transistors SiC sont déjà dans les véhicules. Tesla a fait le choix du SiC dès 2017 pour son Model 3, cela avec une augmentation espérée de l'autonomie du véhicule de 10% [16].

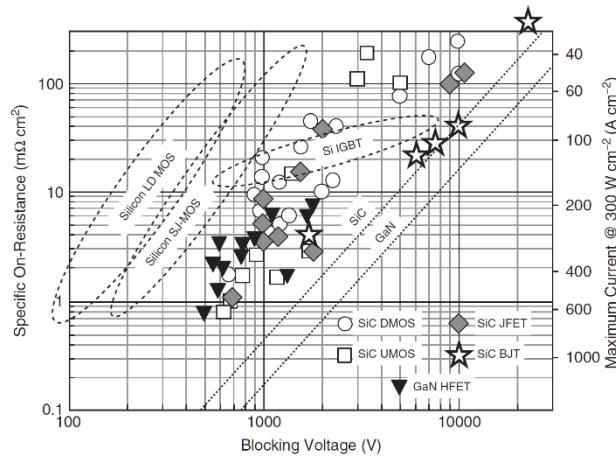


Figure 8 : Limites théoriques des résistances à l'état passant en fonction de la tension de claquage, issue de [14]

En parallèle, certains constructeurs envisagent d'augmenter la tension de batterie, pour passer d'une tension aujourd'hui autour de 400 V à 800 V. Cela afin d'améliorer le rendement de la chaîne, mais surtout d'accélérer la recharge rapide des véhicules.

3 - Convertisseur multiniveau : fusion des batteries et de l'onduleur

Face à ces dynamiques orientées sur les technologies nouvelles et l'augmentation de la tension, une autre stratégie est envisageable : concevoir un convertisseur multiniveau modulaire sur la base de transistors silicium basse tension et de faible coût.

3.1 - Le projet IBIS

Les convertisseurs multiniveaux modulaires (MMC) sont exploités aujourd'hui sur les réseaux pour les liaisons haute tension en courant continu (France-Espagne notamment). L'idée d'utiliser cette technologie dans les véhicules électriques a émergé à la fin du XXe siècle [17], mais elle a trouvé son réel intérêt en l'associant à la technologie des cellules Li-ion.

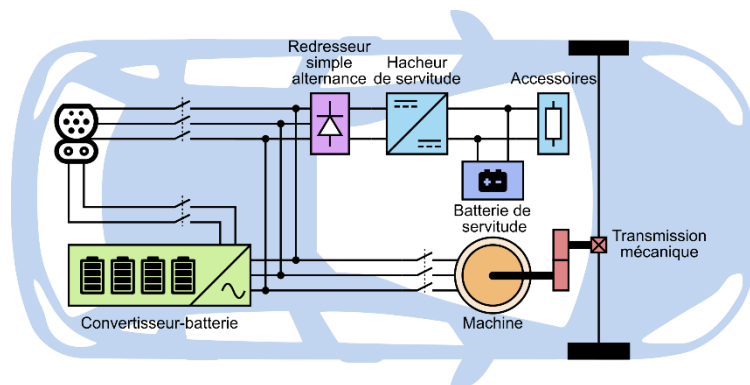


Figure 9 : Schéma synoptique d'un véhicule électrique IBIS

Dans les années 2010, les recherches et les idées développées autour de ces structures dans les laboratoires ont rencontré les acteurs industriels qui ont trouvé un intérêt potentiel dans cette nouvelle approche. C'est ainsi que le projet IBIS (*Intelligent Battery-Inverter System*) est né en associant deux grands acteurs industriels (Stellantis et Saft), quatre laboratoires de recherche (Satie, GeePs, LEPMI et Institut Lafayette) et deux PME (E2CAD et Sherpa Engineering). Ce projet, en partie financé par l'ADEME, permet un transfert technologique des laboratoires vers l'industrie de par l'étude et la réalisation de prototypes, jusqu'à une potentielle commercialisation dans les années à venir [18], [19].

La particularité de la structure, détaillée juste après, est de fusionner le convertisseur DC-AC avec la batterie, créant ainsi un convertisseur-batterie (IBIS) qui distribue une tension triphasée pour le véhicule. Ce système peut alors être directement connecté à la machine de traction ou au réseau électrique selon le cas d'utilisation. L'emploi de ce même système est envisagé par Saft pour le stockage stationnaire d'énergie pour le réseau. Celui-ci pourrait utiliser les batteries du véhicule en seconde vie.

3.2 - Principe de fonctionnement

La structure étudiée est un convertisseur multiniveau modulaire de type « onduleur à ponts en H cascades », avec la particularité que les sources de tension isolées sont ici des batteries Li-ion de faible tension. Le schéma électrique présenté à la Figure 10 illustre le cas du prototype actuellement en fonctionnement.

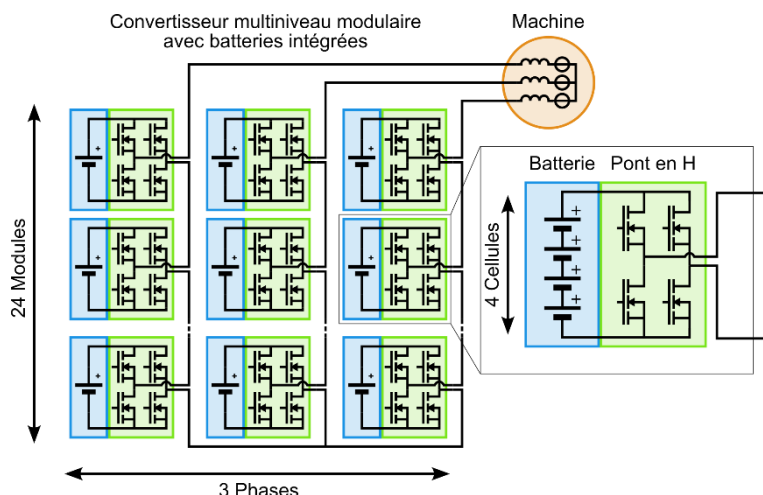


Figure 10 : Schéma électrique d'une chaîne de traction à convertisseur multiniveau modulaire

Chaque module peut fournir trois niveaux de tension différents en fonction de l'état du pont en H. En notant $N = 4$ le nombre de cellules de batterie dans un module, $M = 24$ le nombre de modules dans une phase, $V_{\text{cell}} = 3,3 \text{ V}$ la tension d'une cellule de batterie et $u_{p,m} \in \{-1,0,1\}$ l'ordre de commande du module, avec $m \in \{1 \dots M\}$ de la phase $p \in \{1,2,3\}$, on exprime alors la tension de sortie d'un module :

$$v_{p,m} = u_{p,m} N V_{\text{cell}} \quad (5)$$

Les modules d'une phase sont reliés en série, ce qui conduit à :

$$v_p = N V_{\text{cell}} \sum_{m=1}^M u_{p,m} \quad (6)$$

Comme précédemment, il est possible de réaliser une commande pleine onde. Pour cela, tous les modules d'une même phase sont dans le même état ($\forall m, u_{p,m} = u_{p,1}$). Les créneaux auront ici une amplitude plus élevée qu'une structure classique comportant une batterie ayant le même nombre de cellules, mais en série ($S = N M$). En effet, la structure présentée est capable de produire une tension $\pm V_{\text{bat}} = \pm N M V_{\text{cell}}$, contrairement à un onduleur classique limité aux tensions $\pm \frac{V_{\text{bat}}}{2}$.

Pour exploiter les différents niveaux du convertisseur, plusieurs stratégies existent [20] : les commandes MLI, la commande par niveau le plus proche (NLC) et la commande par vecteur le plus proche (NVC). Dans le cadre du projet, la commande NLC a été retenue pour son faible nombre de commutations par période et sa simplicité de mise en œuvre.

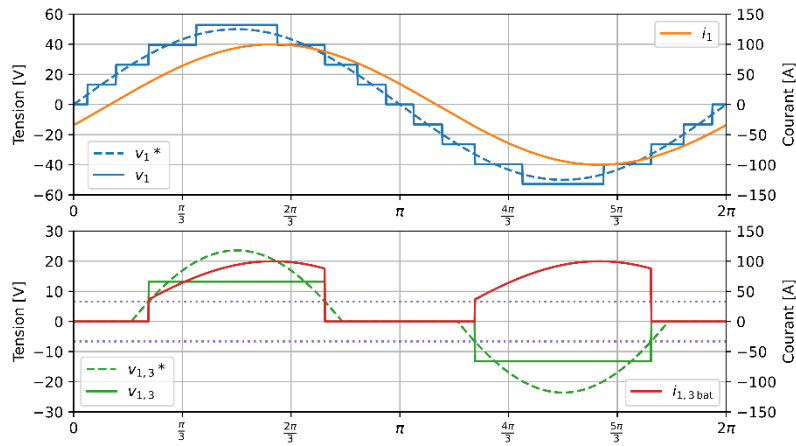


Figure 11 : Exemple de mise en œuvre de la commande NLC

La Figure 11 présente une mise en œuvre de la commande NLC pour une tension de consigne v_1^* d'amplitude 50 V et un courant sinus i_1 de 100 A d'amplitude. L'analyse de la tension de sortie du 3^e module sollicité $v_{1,3}$ illustre bien les 3 états possibles, on dénombre alors 4 commutations par période électrique. Ces transitions sont déterminées en comparant la tension de référence du module $v_{1,3}^*$ avec $\pm NV_{\text{cell}}/2$. Le courant traversant les cellules $i_{p,m \text{ bat}}$ est quant à lui fluctuant : nul, égal ou opposé au courant de phase selon l'état du module.

Onduleur triphasé classique			Architecture IBIS		
Nombre de cellules	$S = 120$ $P = 2$	$V_{\text{bat}} = S V_{\text{cell}}$ $= 396 \text{ V}$	Nombre de cellules	$M = 20$ $N = 4$	$V_{\text{bat}} = MN V_{\text{cell}}$ $= 264 \text{ V}$
Commande pleine onde	$\frac{2}{\pi} V_{\text{bat}}$	252 V	Commande pleine onde	$\frac{4}{\pi} V_{\text{bat}}$	336 V
Commande MLI	$\frac{V_{\text{bat}}}{2}$	198 V	Commande NLC	V_{bat}	264 V
Commande vectorielle	$\frac{V_{\text{bat}}}{\sqrt{3}}$	227 V	Commande NVC	$\frac{2 V_{\text{bat}}}{\sqrt{3}}$	305 V

Tableau 1 : Comparaison des tensions fondamentales simples maximales

La comparaison d'IBIS avec un onduleur triphasé classique associé à une batterie de capacité similaire est présentée au Tableau 1. Le pack batterie classique est une architecture série-parallèle avec S et P les nombres de cellules en série et en parallèle. Le nombre total de cellules embarquées est $SP = 3MN = 240$. Dans cette configuration, la structure permet d'accéder à des niveaux de tension plus élevés et donc de diminuer le courant de phase à puissance équivalente. Cela est dû principalement à l'utilisation de ponts en H, qui permettent une tension de sortie des modules bidirectionnelle. En contrepartie, le nombre de cellules en série sollicitées pour produire une tension intermédiaire est plus faible, ce qui conduit à l'augmentation du courant traversant ces cellules. Ces différences de niveaux de tension ont une incidence sur le point de fonctionnement couple-vitesse de la machine électrique et par conséquent cela nécessite une adaptation de la chaîne de traction.

3.3 - Degrés de liberté et communications

Là où les configurations possibles pour un onduleur classique sont au nombre de 8, elles sont de 3^{3M} soit environ 10^{30} dans le cas $M = 24$. Cela conduit à un nombre impressionnant de configurations microscopiques possibles permettant d'obtenir la même configuration macroscopique. Que faire de

ces possibilités ? On peut commencer par gérer indépendamment chaque phase et imposer une règle simple : tous les ordres de commandes $u_{p,m}$ d'une même phase sont de même signe.

Les degrés de liberté peuvent ensuite être utilisés pour équilibrer les états de charges des modules entre eux et réguler la température des modules. Ce nombre impressionnant de configurations, associé à la nécessité d'une intelligence centralisée, requiert des communications à haut débit qui sont un enjeu majeur de la mise en œuvre d'une telle structure.

3.4 - Équilibrage des cellules

L'équilibrage des cellules est réalisé en sollicitant en priorité les modules les plus chargés en phase de traction, et les moins chargés en phase de régénération [21]. Cela passe par une gestion centralisée des états de charge des modules par le calculateur central. Ce dernier trie les modules selon cette valeur et détermine les modules à activer en fonction de la tension de consigne et du signe de la puissance.

Deux stratégies sont alors possibles, s'intéresser à la puissance moyenne ou la puissance instantanée. Cette dernière permet de mieux équilibrer les cellules, mais au prix d'une augmentation du nombre de commutations. Une fois la stratégie déterminée, la quantité d'informations à transmettre est ainsi réduite et le débit requis est diminué.

3.5 - Recharge

Une des particularités de ce système est la suppression du chargeur embarqué. De fait, avec un nombre de cellules de batterie adapté, il est possible pour IBIS de se connecter directement à un réseau électrique triphasé domestique (230 V en tension simple). C'est cet aspect qui intéresse particulièrement les acteurs du stockage d'énergie pour le réseau. La recharge monophasée ou en courant continu nécessite une légère reconfiguration, mais reste possible : les trois « phases » sont alors connectées en série.

4 - Estimation des pertes

Afin de comparer la pertinence de la structure IBIS pour une utilisation automobile, la comparaison aux onduleurs deux niveaux IGBT et SiC est cruciale. Le critère pertinent est alors la consommation sur cycle, qui semble être à l'avantage d'IBIS dans l'article de Chang [15], bien que la commande utilisée soit une MLI. Le calcul des pertes par commutation dans le cas NLC est plus complexe et nécessite la connaissance des instants de commutation. Le calcul analytique étant trop complexe, la méthode présentée passe par le développement d'un simulateur numérique permettant de prendre en compte les différentes dynamiques électriques [22].

4.1 - Modélisations

La modélisation du système et sa commande sont organisées à l'aide du formalisme REM : Représentation Énergétique Macroscopique [23], Figure 12. La chaîne de conversion d'énergie est alors décomposée en blocs représentant les fonctions énergétiques des différents éléments physiques selon les principes d'interaction (action et réaction) et de causalité (intégrale).

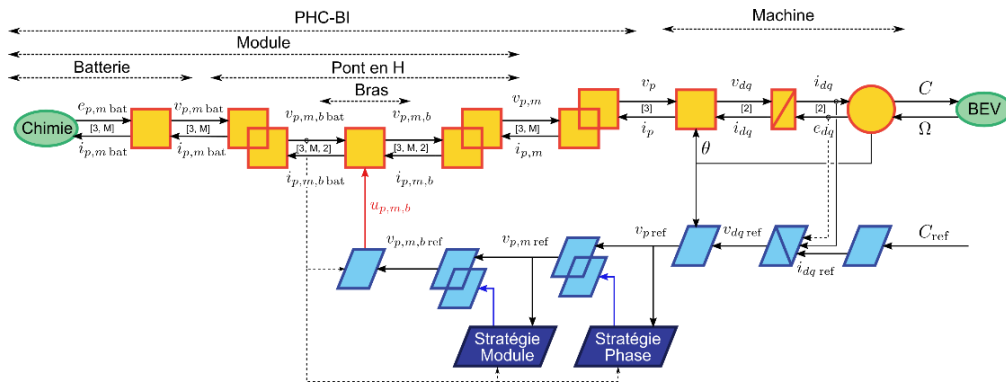


Figure 12 : Représentation énergétique macroscopique de la chaîne de traction

Batterie

Les batteries au Lithium sont des systèmes électrochimiques complexes encore difficilement modélisés. On représente généralement le comportement dynamique des batteries à l'aide de réseau RC série, avec une résistance statique. Ce modèle permet de décrire suffisamment fidèlement le comportement des cellules.

$$v_{p,m \text{ bat}} = e_{p,m \text{ bat}} - R_{bat} i_{p,m \text{ bat}} \quad (7)$$

$$e_{p,m \text{ bat}} = NV_{cell} \quad (8)$$

Des études ont montré que la prise en compte des comportements dynamiques conduit à une amélioration du rendement dans le cas des ponts en H cascades (PHC) grâce à la composante basse fréquence du courant [24]. Pour simplifier la simulation, nous considérons ici un modèle statique (7), car les dynamiques chimiques sont lentes devant les dynamiques électriques. Cela conduit à une surestimation des pertes estimée à environ 20% [24].

Électronique de puissance

Les ponts en H sont constitués de deux bras à base de MOSFET Si basse tension. Ces quatre transistors induisent des pertes par conduction et des pertes par commutation. Un transistor MOSFET à l'état passant se comporte comme une résistance notée R_{mos} . Cette résistance dépend fortement de la température, ce qui complexifie le calcul des pertes par conduction en introduisant un couplage thermique. Ici, la température de fonctionnement est considérée comme constante et égale à celle d'un régime permanent cible : 80°C.

$$v_{p,m,b} = u_{p,m,b} v_{p,m,b \text{ bat}} - R_{mos} i_{p,m,b} \quad (9)$$

La prise en compte des pertes par commutation est complexe dans le cas des MOSFET, contrairement aux IGBT les constructeurs ne fournissent pas de caractéristique des énergies dissipées. Des modèles analytiques existent, mais impliquent un grand nombre de paramètres [25]. Cependant, la commande NLC implique une forte réduction du nombre de commutations par période électrique. Les pertes induites deviennent alors négligeables face aux pertes par conduction. Elles ne seront pas prises en compte dans le modèle.

Machine

La machine considérée est une machine synchrone à aimants permanents et à pôles saillants. Des simulations par éléments finis (EF), non détaillées ici, fournissent les informations caractéristiques de la machine ainsi que la loi de commande. Le comportement de la machine est alors exprimé dans Park par les équations suivantes. Les effets dynamiques sont calculés à partir des inductances L_d et L_q déterminées par les simulations EF statiques, en fonction des courants.

$$\begin{cases} L_d(i_d, i_q) i_d = \int (v_d - e_d - R_{Cu}(\omega) i_d) dt \\ L_q(i_d, i_q) i_q = \int (v_q - e_q - R_{Cu}(\omega) i_q) dt \end{cases} \quad (10)$$

Les pertes cuivre sont modélisées par une résistance en série avec les enroulements $R_{Cu}(\omega)$. Cette résistance présente une composante continue, représentative des pertes en courant continu, et une composante quadratique avec la vitesse ω , caractéristique de l'effet de peau dans les conducteurs. Elle intervient dans l'équation des inductances, représentées sur la Figure 12 par l'élément d'accumulation d'énergie.

Les simulations EF fournissent les flux magnétiques Φ_d et Φ_q en fonction des courants i_d et i_q . Ces flux conduisent aux expressions des forces électromotrices (fem) e_d et e_q , et du couple électromagnétique C_{em} :

$$\begin{cases} e_d = -\omega \Phi_q(i_d, i_q) \\ e_q = +\omega \Phi_d(i_d, i_q) \end{cases} \quad (11)$$

$$C_{em} = n_p (\Phi_d(i_d, i_q) i_q - \Phi_q(i_d, i_q) i_d) \quad (12)$$

$$\omega = n_p \Omega \quad (13)$$

La prise en compte des pertes fer s'effectue via un couple résistant C_{Fe} calculé pour un point de fonctionnement couple-vitesse. Cet élément est particulièrement dépendant à la loi de commande.

4.2 - Simulations

Les modèles présentés sont simulés à l'aide de Matlab/Simulink sur différents points de fonctionnement mécaniques couple-vitesse. La loi de commande de la machine a été déterminée, grâce à des simulations par élément finis, afin de minimiser l'amplitude du courant (MTPA : *Maximum Torque per Ampere*). Elle fournit les courants de références $i_{d\text{ref}}$ et $i_{q\text{ref}}$ en fonction du couple de référence C_{ref} et de la vitesse mesurée Ω .

L'inversion de l'élément d'accumulation représentant les inductances de la machine est réalisée à l'aide d'un correcteur PI pour asservir les courants. Enfin la suite de la chaîne de commande est réalisée par inversion de modèle en utilisant la commande NLC. La Figure 13 présente les formes d'onde obtenues pour trois points de puissance identiques (3 kW), mais avec une répartition couple-vitesse différente [22].

La Figure 13a illustre un point de fonctionnement à basse vitesse et fort couple. Dans cette configuration, le nombre de modules utilisés est réduit : ici deux modules pour cinq niveaux de tension. Lorsque la vitesse augmente, la tension augmente également, conséquence de la fem, et donc le nombre de niveaux de tension s'accroît, Figure 13b et c. Cela induit une amélioration du contenu spectral du courant, et donc une réduction de l'ondulation de couple.

La puissance apparente est plus élevée sur la Figure 13c. Cela est dû à la stratégie de commande de la machine qui impose un défluxage, injection de courant i_d en opposition aux aimants, à haute vitesse. L'important courant et le faible nombre de niveaux rendent visible l'effet des pertes par conduction sur la Figure 13a. Le fort courant qui traverse les résistances séries des batteries et des transistors déforme les paliers de tensions qui ne sont plus constants comme espérés. Cet effet est moins marqué sur la Figure 13b.

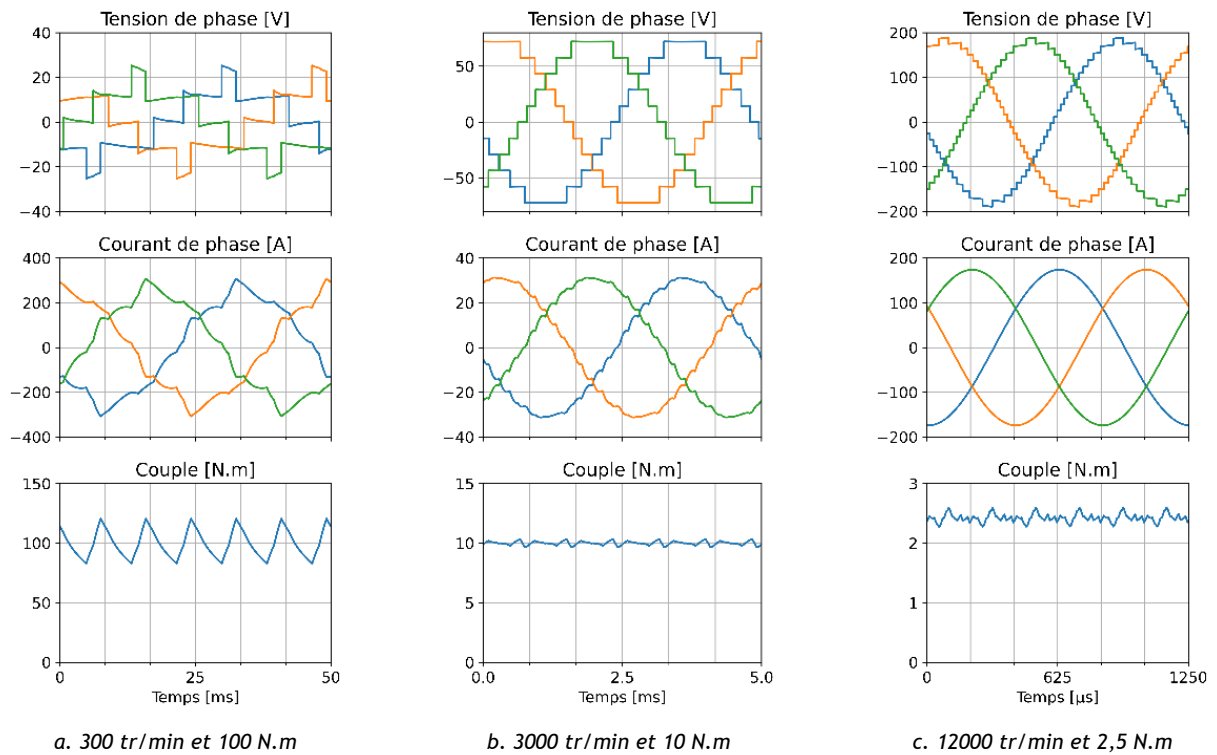


Figure 13 : Formes d'onde simulées

5 - Perspectives de développement

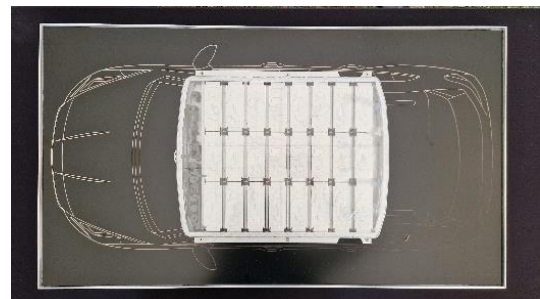
5.1 - Le futur d'IBIS

Un démonstrateur statique a été réalisé et a permis de démontrer la faisabilité technique du système. Ce système modulaire, dont on peut voir un module sur la Figure 14a, est installé au laboratoire GeePs. Des essais de connexion au réseau (recharge) et de traction/récupération avec une machine de traction réelle (conduite) y sont réalisés.

Un démonstrateur du véhicule est en cours de conception et devrait être opérationnel à l'été 2024. Son objectif sera de démontrer la faisabilité de l'intégration d'un tel système dans un véhicule et d'étudier son comportement en conditions réelles. C'est une étape supplémentaire vers la commercialisation d'un premier véhicule à l'horizon 2030 [19].



a. phase 1, démonstrateur statique



b. phase 2, démonstrateur véhicule

Figure 14 : Prototypes expérimentaux

5.2 - Résilience, maintenance et réutilisation

La force de la modularité du système est dans sa résilience. En cas de défaut d'une cellule de la batterie, le véhicule est immobilisé et le pack batterie doit être entièrement remplacé. Avec IBIS, le module contenant la cellule défectueuse est isolé (bypass) et le véhicule peut continuer à fonctionner (en mode légèrement dégradé) jusqu'à un passage au garage.

La maintenance est également rationalisée puisqu'il suffit alors de remplacer uniquement les modules défectueux ou en fin de vie. Dans une application véhicule, les cellules sont considérées en fin de vie lorsqu'elles ont perdu 20% de leur capacité initiale, la densité d'énergie stockée devient alors trop faible pour cette utilisation. Cependant la capacité restante demeure suffisante pour des applications où l'encombrement est un enjeu secondaire : le stockage sur le réseau. Ainsi, les mêmes modules pourront être réutilisés (seconde vie) dans ce type d'installation.



Figure 15 : Vue d'artiste d'un parc de stockage d'énergie connecté au réseau électrique, issue de [26]

5.3 - Hybridation

La structure en pont en H cascadié n'impose pas la nature des sources de tension continue. On peut donc imaginer mélanger des cellules de batterie de natures différentes (forte densité de puissance ou d'énergie) ou introduire d'autres technologies de stockage comme des supercondensateurs. Une hybridation avec une pile à combustible est également envisageable. Sur des installations stationnaires, des panneaux photovoltaïques peuvent être intégrés comme source d'alimentation de certains modules [27].

Conclusion

Les véhicules électriques sont en plein développement à l'échelle mondiale, mais font face dans leurs améliorations aux limites imposées par les systèmes existants : batterie, électronique de puissance, machine, etc. Certains constructeurs s'orientent vers les transistors WBG dans l'espoir d'améliorer les rendements, mais ceux-ci restent coûteux. Une autre voie est d'utiliser des convertisseurs multiniveaux modulaires en fusionnant la batterie et l'étage de conversion DC-AC. Cette voie, explorée par Stellantis dans le cadre du projet IBIS, semble prometteuse en termes de performance, mais elle comporte également des atouts en matière de soutenabilité.

Remerciements

Cette étude a été effectuée dans le cadre du projet IBIS, lequel est financé par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) grâce au programme d'Investissement d'Avenir (PIA).

Références

- [1] A. Aloisi, « Plus d'un quart des véhicules vendus en 2023 en France étaient électriques ! », *Electroniques*. Consulté le: 8 janvier 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.electroniques.biz/auto-train/plus-dun-quart-des-vehicules-vendus-en-2023-en-france-etaient-electriques/>
- [2] IEA, « Global EV Outlook 2023 : Trends in electric light-duty vehicles », IEA. Consulté le: 8 janvier 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iea.org/energy-system/transport/electric-vehicles>
- [3] V. Sauvant-Moynot, F. Orsini, et A. Juton, « État de l'art et perspectives des batteries de voitures électriques », *La Revue 3EI*, n° 99, janvier 2020.
- [4] X. Rain, « Les solutions actuelles de motorisations pour véhicules électriques », *La Revue 3EI*, n° 99, janvier 2020.
- [5] RTE, « Futurs énergétiques 2050 _ rapport complet.pdf », févr. 2022.
- [6] TotalEnergies, « Stockage par batteries : nos projets et réalisations », TotalEnergies. Consulté le: 8 janvier 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://totalenergies.com/fr/projets/electricite/stockage-batteries-nos-projets-realizations>
- [7] B. Crépin, « Stockage d'énergie par batteries : « On est au début d'une nouvelle ère » », *Techniques de l'Ingénieur, Énergie*. Consulté le: 8 janvier 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/stockage-denergie-par-batteries-on-est-au-debut-dune-nouvelle-ere-111535/>
- [8] ENEDIS, « Pilotage de la recharge de véhicules électriques », ENEDIS, déc. 2020. Consulté le: 8 janvier 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.enedis.fr/sites/default/files/documents/pdf/enedis-rapport-pilotage-de-la-recharge-de-vehicules-electriques.pdf>
- [9] C. Saber et N. Rouhana, « Chargeurs de batteries de véhicule électrique », *La Revue 3EI*, n° 99, janvier 2020.
- [10] A. Juton *et al.*, *Technologies des voitures électriques: Motorisations, batteries, hydrogène, interactions réseau*, Illustrated édition. Malakoff: Dunod, 2021.
- [11] J.-P. Louis et C. Bergmann, « Commande numérique des machines - Systèmes triphasés : régime permanent », *Tech. Ing. Convers. Lénergie Électr.*, nov. 1996, doi: 10.51257/a-v1-d3642.
- [12] H. Foch, F. Forest, et T. Meynard, « Onduleurs de tension - Structures. Principes. Applications », *Tech. Ing. Convers. Lénergie Électr.*, p. 21, 1998.
- [13] P.-É. Vidal, B. Trajin, et F. Rotella, « Stratégie et technique pour le pilotage en modulation des convertisseurs statiques », *Tech. Ing. Électronique*, n° E3969, déc. 2019, doi: 10.51257/a-v1-e3969.
- [14] T. Kimoto et J. A. Cooper, *Fundamentals of Silicon Carbide Technology: Growth, Characterization, Devices and Applications*, vol. 9781118313527. in *Fundamentals of Silicon Carbide Technology: Growth, Characterization, Devices and Applications*, vol. 9781118313527. 2014, p. 538. doi: 10.1002/9781118313534.
- [15] F. Chang, O. Ilina, M. Lienkamp, et L. Voss, « Improving the Overall Efficiency of Automotive Inverters Using a Multilevel Converter Composed of Low Voltage Si mosfets », *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, n° 4, p. 3586-3602, avr. 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2854756.
- [16] C. Morris, « Silicon carbide is becoming the material of choice for EV power electronics », *Charged EVs*. Consulté le: 4 septembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://chargedevs.com/newswire/silicon-carbide-is-becoming-the-material-of-choice-for-ev-power-electronics/>

- [17] L. M. Tolbert, F. Z. Peng, et T. G. Habetler, « Multilevel converters for large electric drives », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 35, n° 1, p. 36-44, janv. 1999, doi: 10.1109/28.740843.
- [18] ENS Paris-Saclay, « Projet IBIS, une coopération exemplaire pour des batteries révolutionnaires | ENS-PARIS-SACLAY », ENS Paris-Saclay. Consulté le: 10 janvier 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://ens-paris-saclay.fr/actualite/projet-ibis-une-cooperation-exemplaire-pour-des-batteries-revolutionnaires>
- [19] J. Leblanc, « Batterie IBIS. Stellantis travaille sur des voitures électriques plus simples et plus durables », L'argus. Consulté le: 28 août 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.largus.fr/actualite-automobile/batterie-ibis-stellantis-travaille-sur-des-voitures-electriques-plus-simples-et-plus-durables-30028369.html>
- [20] L. G. Franquelo, J. Rodriguez, J. I. Leon, S. Kouro, R. Portillo, et M. A. M. Prats, « The age of multilevel converters arrives », *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 2, n° 2, p. 28-39, juin 2008, doi: 10.1109/MIE.2008.923519.
- [21] C. Mayet, D. Labrousse, A. Dittrick, B. Revol, R. Bkekri, et F. Roy, « Simulation and Control of a New Integrated Battery System for Automotive Applications », in *PCIM Europe digital days 2021*, mai 2021, p. 1-6.
- [22] G. Pongnot, C. Mayet, et D. Labrousse, « Répartition des pertes dans une chaîne de traction utilisant un onduleur à ponts en H cascades avec batteries intégrées », in *Symposium de Génie Électrique*, Lille, France, juill. 2023. Consulté le: 18 octobre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.science/hal-04158082>
- [23] W. Lhomme, P. Delarue, A. Bouscayrol, et P. Barrade, « La REM, formalisme multiphysique de commande de systèmes énergétiques », *Tech. Ing. Convers. Lénergie Électr.*, n° D3066, nov. 2014, doi: 10.51257/a-v1-d3066.
- [24] O. Theliander, A. Kersten, M. Kuder, W. Han, E. A. Grunditz, et T. Thiringer, « Battery Modeling and Parameter Extraction for Drive Cycle Loss Evaluation of a Modular Battery System for Vehicles Based on a Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 56, n° 6, p. 6968-6977, nov. 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.3026662.
- [25] D. Christen et J. Biela, « Analytical Switching Loss Modeling Based on Datasheet Parameters for mosfets in a Half-Bridge », *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, n° 4, p. 3700-3710, avr. 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2851068.
- [26] J.-C. Lefebvre et V. Gillot, « IBIS : Stellantis et Saft dévoilent une 'batterie intelligente' et plus efficace pour les véhicules électriques et le stockage stationnaire », Stellantis. Consulté le: 8 janvier 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.stellantis.com/fr/actualite/communiqués-de-presse/2023/july/ibis-stellantis-et-saft-devoilent-une-batterie-intelligente-et-plus-efficace-pour-les-vehicules-electriques-et-le-stockage-stationnaire>
- [27] C. Sirico *et al.*, « PV Module-Level CHB Inverter with Integrated Battery Energy Storage System », *Energies*, vol. 12, n° 23, Art. n° 23, janv. 2019, doi: 10.3390/en12234601.

