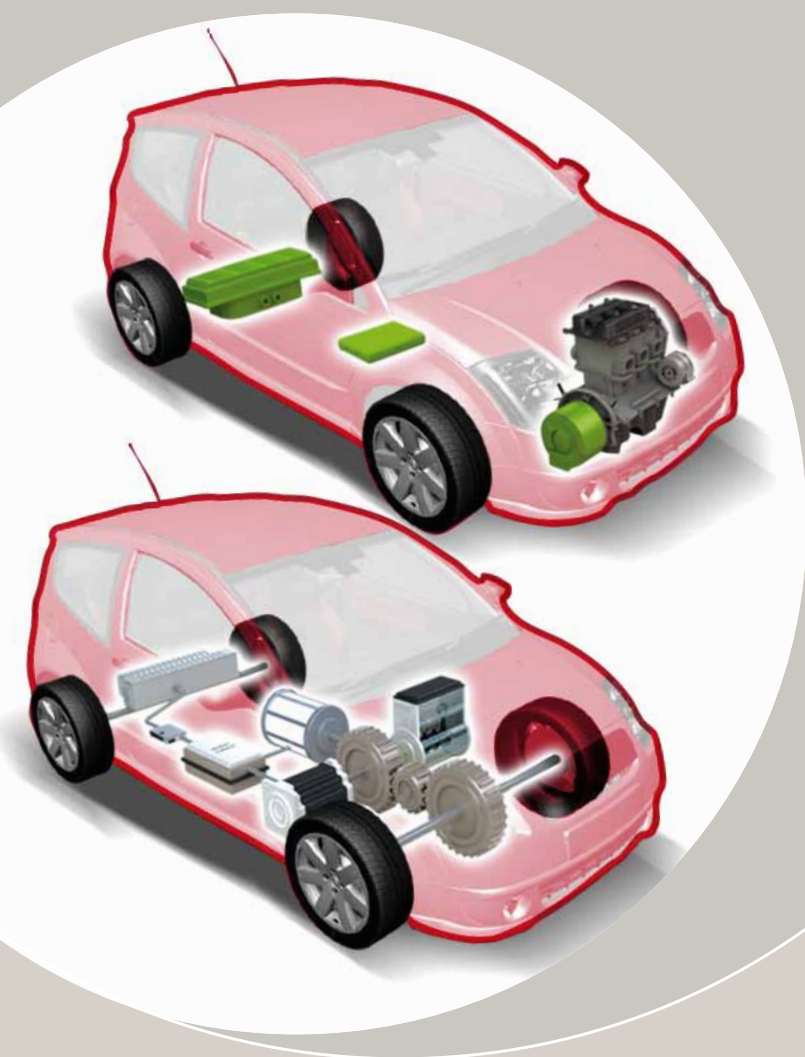


**DOSSIER  
TECHNIQUE**



# Véhicules électriques et hybrides

→

→ →

Véhicules électriques – Rendement énergétique global – Systèmes de charges – Véhicules hybrides – Batteries – Régénération – Enjeux environnementaux





# Véhicules électriques et hybrides

Dossier créé avec la collaboration du  
Groupement National pour la Formation Automobile

Michel WASTRAETE  
Formateur expert



<b>1. Introduction .....</b>	<b>6</b>
A. Historique .....	6
B. L'impact environnemental de l'automobile .....	7
C. Dépendance au pétrole des véhicules .....	9
D. Électricité, solution miracle ? .....	10
<b>2. Les apports du VE / VH par rapport au thermique .....</b>	<b>11</b>
A. Comportement énergétique d'un véhicule thermique .....	11
B. Comportement énergétique d'un véhicule électrique .....	15
C. Analyse des rendements .....	17
<b>3. Généralités sur les véhicules VE / VH .....</b>	<b>19</b>
A. Constituants d'un véhicule électrique .....	19
B. Qu'est-ce qu'un véhicule hybride ? .....	20
<b>4. Technologie des composants d'un VE / VH .....</b>	<b>25</b>
A. Les batteries .....	25
B. Les moteurs électriques .....	47
C. Les hacheurs et onduleurs .....	51
D. Les convertisseurs .....	53
<b>5. Les véhicules électriques .....</b>	<b>54</b>
A. Différentes organisations .....	54
B. Émission de CO <sub>2</sub> .....	57
C. Rendement global .....	58
D. Systèmes de charges .....	59
<b>6. Les véhicules hybrides .....</b>	<b>63</b>
A. Micro hybride .....	63
B. Hybride parallèle .....	65
C. Hybride série .....	66
D. Hybride série / parallèle .....	67
E. Hybride rechargeable .....	69
<b>7. Freinage et régénération .....</b>	<b>70</b>
A. Principe de la régénération .....	70
B. Les systèmes de freinage .....	72
<b>8. Les systèmes de confort .....</b>	<b>76</b>
A. Spécificité du circuit de bord .....	76
B. La climatisation .....	77
<b>9. Conclusion .....</b>	<b>79</b>
A. Pour en savoir plus .....	80

## → A. HISTORIQUE

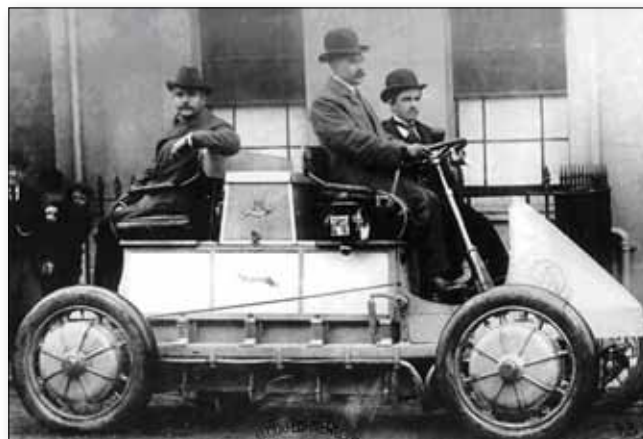
L'apparition de la motorisation électrique remonte au commencement même de l'ère automobile. Les performances de ce type de motorisation furent très vite convaincantes : le 29 avril 1899, le seuil symbolique des 100 km/h fut ainsi franchi près de Paris. Le record de vitesse de 105.8 km/h fut atteint par une voiture électrique baptisée la « *Jamais contente* », qui était équipée de deux moteurs de 25 kW (possédant une autonomie de 85 km) et alimentée par des batteries au plomb (fournissant près de 200 V 124 A) pour un poids de 1450 kg.



*Voiture électrique la « Jamais contente »*

→ Source : [www.voitureelectrique.net](http://www.voitureelectrique.net)

À la même époque, Ferdinand PORSCHE déposa un brevet de motorisation électrique dont la spécificité était d'être incorporée aux moyeux de roues. Fruit d'une collaboration avec le constructeur automobile viennois Jacob LOHNER, ce modèle se distinguait de ceux déjà existants par le fait qu'il associait motorisation électrique et thermique. En effet, le principe de ce nouveau moteur consistait à alimenter les quatre moteurs électriques au moyen d'une batterie rechargée par une dynamo, laquelle dynamo était associée à un moteur thermique. La première voiture hybride série était née.



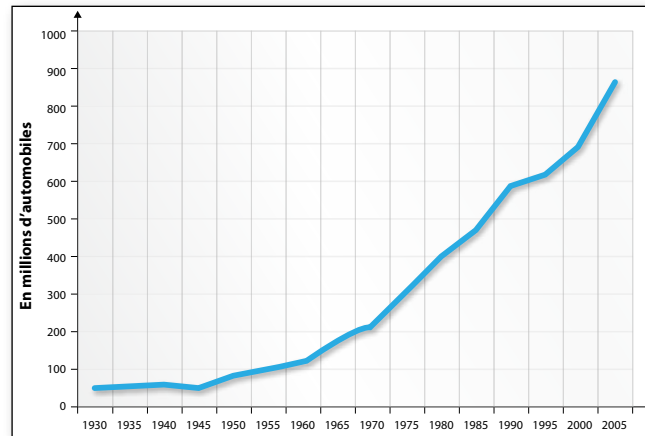
*La LOHNER-PORSCHE présentée à l'exposition universelle de 1900*

→ Source : [www.cartype.com](http://www.cartype.com)

Cela étant, la faible autonomie des voitures électriques, ainsi que leur masse importante, ne leur permit pas de s'imposer face aux moteurs thermiques. Le contexte de l'époque favorisa davantage l'évolution et le déploiement du moteur thermique. Le pétrole, il est vrai, était à cette époque une énergie abondante et abordable. De plus, le faible parc de véhicules roulants, malgré ses importantes émissions polluantes, ne présentait pas un réel danger pour l'homme et l'environnement.

## → B. L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DE L'AUTOMOBILE

Un siècle plus tard, le parc automobile mondial est devenu gigantesque, se stabilisant dans les pays industrialisés mais explosant dans les pays émergents (Chine, Inde, etc.)



Évolution du parc automobile mondial de 1930 à 2005

→ Source fournie par l'auteur

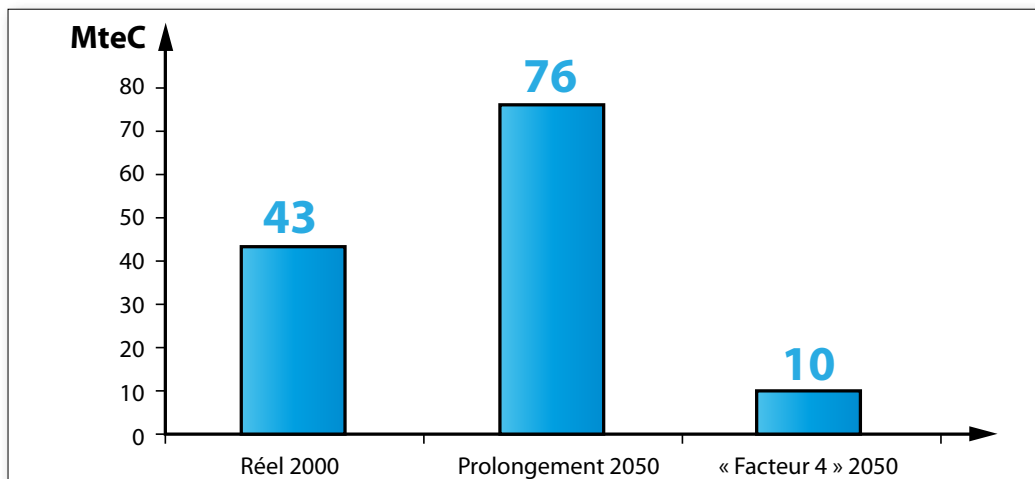
Cette croissance très importante du parc automobile a imposé aux pouvoirs publics de prendre des mesures afin de réduire les émissions polluantes. À l'orée des années 70, les premières normes antipollution sont ainsi apparues et ont contraint les constructeurs automobiles et les pétroliers à trouver des solutions techniques afin de réduire les rejets nocifs.

L'alerte des scientifiques sur le réchauffement climatique va amener les pouvoirs publics de nombreux pays industrialisés à signer le protocole de Kyoto en 1997. Entré en vigueur en 2005, ce traité international engage les pays signataires à réduire les émissions de gaz à effet de serre, responsables du réchauffement climatique.

À ce jour, les émissions de CO<sub>2</sub> demeurent la préoccupation majeure des pouvoirs publics internationaux. Bien qu'il ne possède pas le plus grand PRG (Potentiel de Réchauffement Global), ce gaz constitue néanmoins une menace réelle pour l'homme et l'environnement. Le rejet de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère progresse chaque année de 2 %. Au cas où rien ne serait fait, on assisterait d'ici 2050 au doublement de ces rejets... Les conséquences seraient dramatiques et irréversibles pour l'homme et l'environnement : dérèglements climatiques, modifications des écosystèmes...

Pour en savoir plus sur l'effet de serre, consulter : « Les transports routiers et le réchauffement climatique » sur [www.educauto.org/infoTech](http://www.educauto.org/infoTech)

D'après le rapport de la MIES (Mission Interministérielle de l'Effet de Serre), il faudrait, en ce qui concerne les pays industrialisés, diviser par quatre les rejets de CO<sub>2</sub> d'ici à l'horizon 2050 pour contenir le réchauffement climatique en dessous de 2 °C. (Ce scénario a été baptisé « Facteur 4 » 2050.)



Émission de CO<sub>2</sub> des transports français

**MteC** : Mégatonne équivalent Carbone

→ Source : MIES

Afin de réaliser cet objectif, les commissions, qui composaient le Grenelle de l'environnement de 2007 (appelé Grenelle I), ont présenté au gouvernement un certain nombre de propositions, dont certaines ont été adoptées et votées par le parlement et mises en application, à l'instar du bonus / malus CO<sub>2</sub>. La raison d'être de ce bonus / malus CO<sub>2</sub> est de favoriser le développement des véhicules à faible rejet de CO<sub>2</sub> et de pénaliser au contraire ceux dont l'émission de CO<sub>2</sub> est jugée trop élevée.

Taux d'émission de dioxyde de carbone (en grammes par kilomètre)	Montant du bonus (en euros)		
	Année d'acquisition		
	2008 et 2009	2010 et 2011	2012
126 à 130	200	0	0
121 à 125	200	200	0
116 à 120	700	200	200
111 à 115	700	700	200
106 à 110	700	700	700
101 à 105	700	700	700
96 à 100	1 000	700	700
91 à 95	1 000	1 000	700
61 à 90	1 000	1 000	1 000
60 et moins	5 000	5 000	5 000

Montant de l'aide pour les véhicules (hors motorisation GPL, GNV et hybrides)\*

(\*) : Les véhicules GPL, GNV et hybrides bénéficient d'une aide à l'acquisition (ou prise de location) fixe de 2 000 euros.

→ Source : journal officiel, décret 2007-1873 du 26/12/2007

Pour plus d'information :

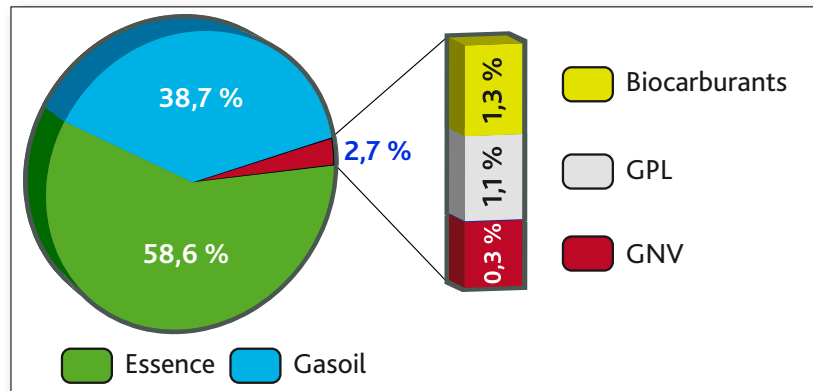
[www.legrenelle-environnement.info](http://www.legrenelle-environnement.info)

[www.notre-planete.info](http://www.notre-planete.info)



## → C. DÉPENDANCE AU PÉTROLE DES VÉHICULES

Depuis ses origines, le secteur automobile reste totalement dépendant de la production de pétrole. À ce jour, les recherches de diversification des sources d'énergie n'ont permis de réduire que de très peu cette dépendance comme en témoigne le schéma ci-dessous :



Répartition de la consommation de carburant dans le monde

→ Source : dossier technique ANFA « La filière bioéthanol »

L'utilisation de cette ressource énergétique n'est pourtant pas sans poser certains problèmes :

- dépendance énergétique ;
- réserve mondiale limitée à quelques décennies ;
- impacts géopolitiques importants ;
- remise dans l'atmosphère de carbone enfoui sous terre depuis des millions d'années.



Évolution du prix du baril depuis 1973

→ Source : CNUCED (Conférence des Nations Unies sur le Commerce et le Développement)

La raréfaction du pétrole conjuguée à l'accroissement de la demande (lié principalement au développement des pays émergents) entraîne une augmentation inévitable du prix du baril de pétrole.

Cette augmentation du prix du pétrole donne aux chercheurs et aux industriels la possibilité d'explorer de nouvelles voies technologiques qui n'étaient pas envisageables auparavant. Dans cette optique, une rentabilisation rapide de ces investissements technologiques est concevable. L'ère de l'après-pétrole est donc bel et bien lancée.

## → D. ÉLECTRICITÉ, SOLUTION MIRACLE ?

La nécessité impérieuse de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> au niveau mondial, cumulée à la hausse du prix du pétrole, impose des prises de décisions prônées par de nouveaux engagements politiques. Nouveaux engagements qui posent les jalons d'une nouvelle orientation mondiale en termes de gestion énergétique. L'objectif étant de permettre la recherche et la commercialisation de nouvelles solutions, lesquelles impliquent :

- L'optimisation des moteurs thermiques :
  - amélioration du rendement des moteurs (injection, moteur, équipement, etc.) ;
  - hybridation (électrique et thermique).
- L'utilisation de nouvelles énergies :
  - les biocarburants ;
  - le GNV (Gaz Naturel Véhicule) ;
  - le GPL (Gaz de Pétrole Liquéfié) ;
  - électrique ;
  - hydrogène (dans quelques décennies).

Le regroupement, figurant dans le tableau ci-dessous, des voies de recherche par type de moteur utilisé montre que la nouveauté, en ce qui concerne la partie véhicule, réside principalement dans l'utilisation d'une motorisation électrique seule ou associée à un moteur thermique.

Voies de recherche	Moteur thermique	Moteur électrique
Amélioration rendement moteur	X	
Hybridation	X	X
Biocarburant	X	
GNV	X	
GPL	X	
Électrique		X
Hydrogène (Thermique)*	X	
Hydrogène (pile à combustible)*		X

*Tableau des motorisations en fonction des voies de recherche*

(\*) : Technologie à long terme, quelques décennies.

L'utilisation des moteurs électriques en automobile, nous l'avons vu plus haut, n'est pas nouvelle. La « *Jamais Contente* », l'hybride de Porsche et Lohner, et bien d'autres, en sont la preuve. Or, si à l'époque ces nouvelles technologies n'avaient pas pu trouver leur clientèle, faute d'être économiquement rentables, la fin des années 80 a vu l'apparition de nouveaux composants en électronique de puissance et de nouvelles générations de batteries. Parvenus à maturité, ces nouveaux composants permettent l'électrification de la motorisation et, par extension, l'utilisation :

- de nouveaux constituants (batteries, moteurs, onduleurs, convertisseurs, capteurs, etc.) ;
- de nouvelles technologies de gestion d'énergie (utilisation thermique ou électrique) ;
- de nouvelles technologies de gestion de freinage et de récupération d'énergie ;
- de nouveaux systèmes de confort (climatisation, chauffage) ;
- de nouvelles méthodes de travail et de sécurité (habilitation UTE C18-550).

## 2 — [ LES APPORTS DU VE / VH PAR RAPPORT AU THERMIQUE ]

### → A. COMPORTEMENT ÉNERGÉTIQUE D'UN VÉHICULE THERMIQUE

#### → À l'accélération

Lors de l'accélération d'un véhicule, le moteur doit fournir l'énergie mécanique afin :

- de vaincre les résistances au déplacement :
  - dues aux pertes mécaniques et à la résistance au roulement ;
  - dues à l'aérodynamisme du véhicule  $C_x$  (Coefficient de pénétration dans l'air).
- d'emmagasiner l'énergie cinétique du véhicule.

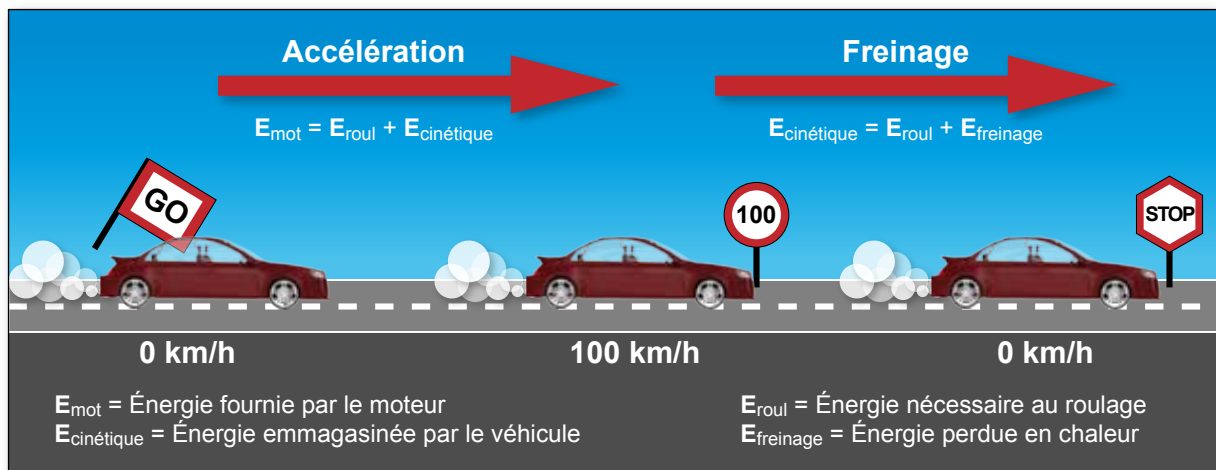
Cette énergie cinétique emmagasinée dans le véhicule est loin d'être négligeable et dépend de la masse du véhicule et de sa vitesse, soit :

$$E_{\text{cinétique}} = \frac{1}{2} mV^2$$

Un véhicule circulant à 100 km/h (27.78 m/s) et ayant une masse de 1500 kg.

$$E_{\text{cinétique}} = \frac{1}{2} * 1500 * (27.78)^2 = 578796 \text{ J ou W/s}$$

$$1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J} \Rightarrow 578796 / 3600 = 161 \text{ Wh}$$



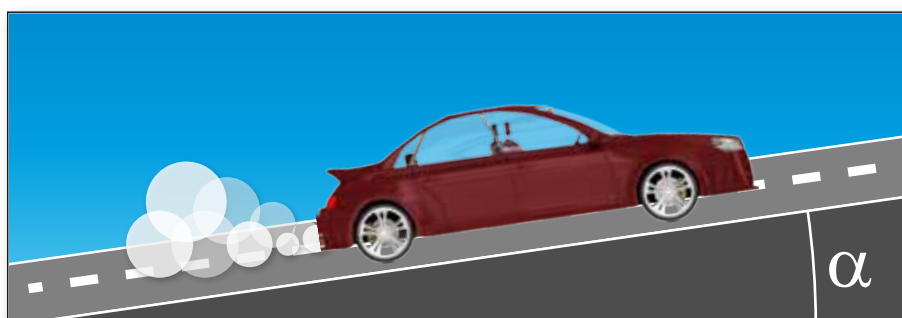
Schématisme des énergies (véhicule thermique)

**Note :** l'énergie ne se crée pas et ne se perd pas mais peut prendre d'autres formes.

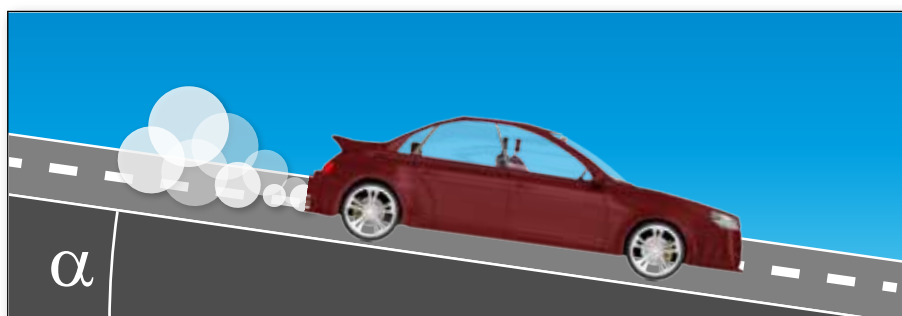
### → À vitesse stabilisée

À vitesse stabilisée, le moteur fournit l'énergie nécessaire au déplacement du véhicule ; la puissance fournie dépend, quant à elle, de la déclivité de la route. Il est possible d'identifier trois phases principales de fonctionnement, qui dépendent du sens et de l'importance de la pente et conditionnent le comportement énergétique :

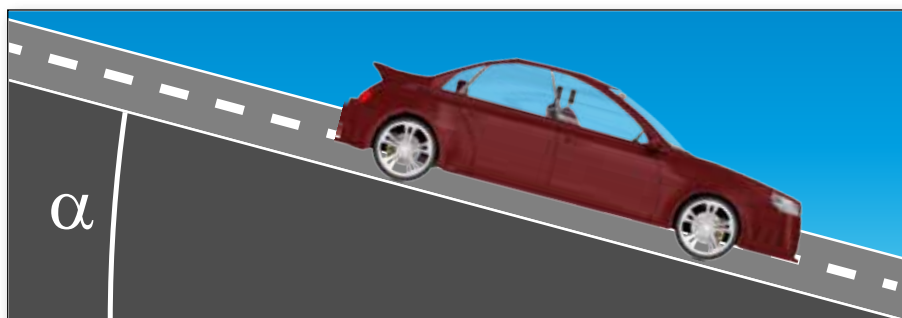
- Si la pente est ascendante, la puissance fournie par le moteur augmentera avec l'inclinaison jusqu'à atteindre la puissance maximum  $P(\max)$ . **La consommation d'énergie du moteur est relative à la puissance fournie par celui-ci.**



- Si la pente est légèrement descendante, la puissance fournie par le moteur diminuera avec l'inclinaison jusqu'à devenir nulle. **La consommation d'énergie du moteur à puissance nulle correspond à environ 5 % de la consommation à puissance nominale ( $\approx 0.6$  L/h) = PERTE D'ÉNERGIE CARBURANT.**



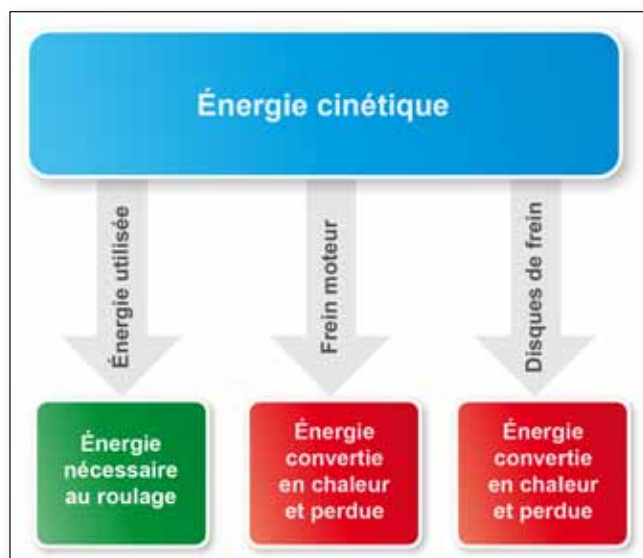
- Si la descente devient plus importante, le moteur fournit un contre-couple « frein moteur ». **L'énergie potentielle est transformée en chaleur par le moteur et évacuée dans le circuit de refroidissement et d'échappement = PERTE D'ÉNERGIE POTENTIELLE.**



## → Au freinage

Lorsque l'on relâche la pédale d'accélérateur, le moteur ne fournit plus d'énergie au véhicule. C'est l'énergie cinétique qui continue à le faire avancer. Pour freiner, il faut convertir cette énergie cinétique en une autre forme d'énergie.

C'est le frein moteur et le système de freinage qui convertissent l'énergie cinétique en énergie thermique puis la dissipent par les systèmes de refroidissement du moteur et des disques de frein.

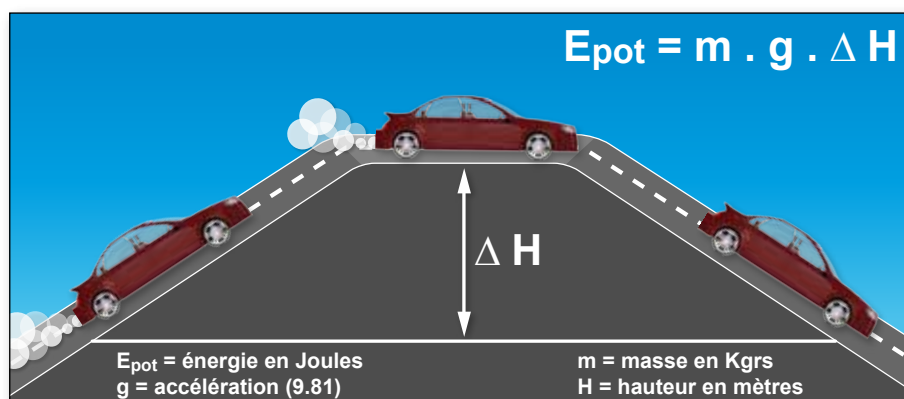


Énergies lors du freinage (véhicule thermique)

Le système de freinage convertit l'énergie cinétique en énergie thermique = PERTE D'ÉNERGIE CINÉTIQUE.

## → L'énergie potentielle

Durant l'ascension, le moteur fournit l'énergie potentielle au véhicule. Cette énergie va être restituée par le véhicule lors de la descente, ce qui nécessitera de freiner pour réguler la vitesse.



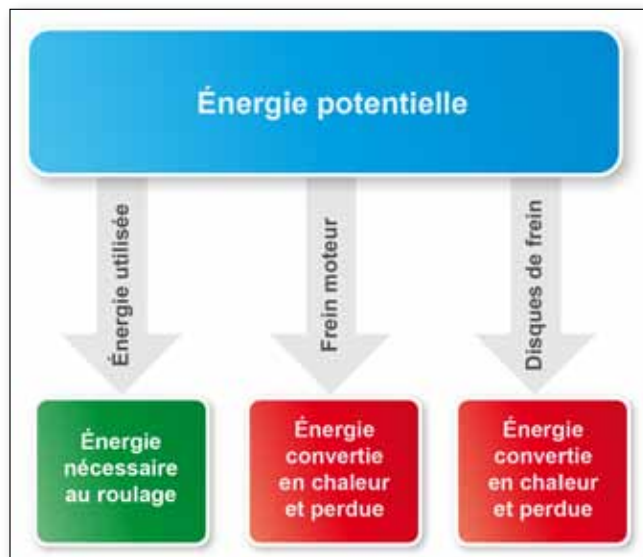
Énergie potentielle

## 2 — [ LES APPORTS DU VE / VH PAR RAPPORT AU THERMIQUE ]

Pour 100 mètres de dénivelé, un véhicule, ayant une masse de 1500 kg, aura une énergie potentielle de :

$$E_{\text{pot}} = 1500 * 9.81 * 100 = 1471500 \text{ J ou W/s}$$

$$1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J} \Rightarrow 1471500 / 3600 = 408,75 \text{ Wh}$$



Énergie potentielle lors d'une forte descente (véhicule thermique)

Plus la pente est prononcée, plus la puissance dissipée en chaleur est importante.

### → Durant un arrêt momentané

Lors d'un arrêt momentané (feu rouge, embouteillage, etc.), le moteur tourne au ralenti alors que le véhicule ne se déplace pas. La consommation d'énergie du moteur au ralenti correspond à environ 5 % de la consommation à puissance nominale. (≈0.6 L/h) = PERTE D'ÉNERGIE CARBURANT.

Phase de fonctionnement	Comportement énergétique relatif au moteur thermique
Accélération	Le moteur fournit l'énergie mécanique qui est nécessaire au stockage de l'énergie cinétique et qui permet de vaincre les résistances à l'avancement.
Déclivité nulle (vitesse stabilisée)	Le moteur fournit l'énergie mécanique nécessaire afin de vaincre les résistances à l'avancement.
Légère déclivité (puissance nulle)	Le moteur tourne à couple nul et consomme environ 5 % de la consommation à puissance nominale.
Grande déclivité (frein moteur)	Le moteur n'est plus alimenté en carburant et offre un couple résistif qui transforme l'énergie potentielle en chaleur.
Décélération (frein moteur)	Le moteur n'est plus alimenté en carburant et offre un couple résistif qui transforme l'énergie cinétique en chaleur.
Freinage	L'énergie cinétique est transformée en chaleur par le système de freinage.
Arrêts momentanés (feux rouges, etc.)	Le moteur tourne au ralenti et consomme environ 5 % de la consommation à puissance nominale.

■ Favorable  
■ Perte d'énergie

Tableau récapitulatif des pertes d'énergie  
(Sans prise en compte du rendement moteur)

Un parcours routier passe automatiquement par toutes les phases ci-dessus, ce qui engendre une perte énergétique importante. Toute cette énergie perdue est fournie par le moteur qui la tire du carburant, ce qui engendre une surconsommation et des rejets de CO<sub>2</sub> inutiles.

## → B. COMPORTEMENT ÉNERGÉTIQUE D'UN VÉHICULE ÉLECTRIQUE

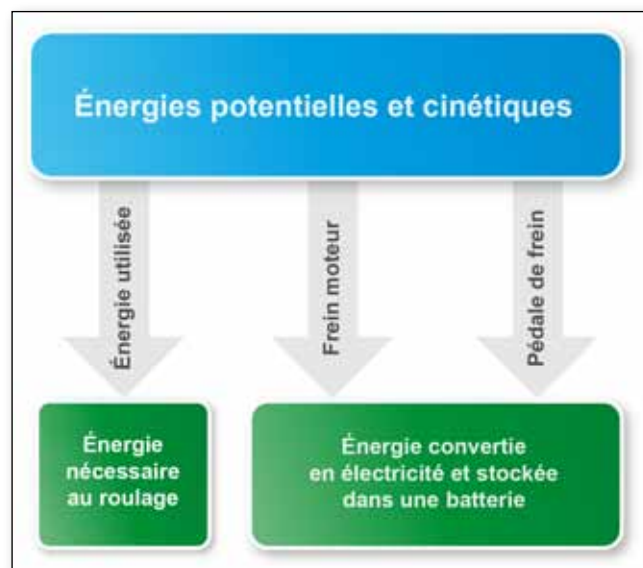
L'analyse du comportement énergétique d'un véhicule thermique a mis en évidence les nombreuses pertes d'énergie d'origines potentielles et cinétiques. Ces pertes d'énergies sont transformées et dilapidées dans les systèmes de refroidissement.

La question qui se pose alors aux experts est de savoir comment récupérer et stocker cette énergie mécanique afin de la réutiliser. Plusieurs méthodes permettent d'ores et déjà de stocker l'énergie d'origine mécanique. Cela étant, peu sont utilisables dans la sphère automobile. À ce jour, seuls sont utilisés :

- Le stockage mécanique, qui fait appel à un volant d'inertie tournant à grande vitesse. Ce système prend le nom de KERS (Kinetic Energy Recovery System) en F1.
- Le stockage électrique, qui s'effectue au niveau de la batterie et utilise un générateur (*convertisseur d'énergie mécanique en énergie électrique*).

De ces deux méthodes, seul le stockage électrique est utilisable pour les véhicules routiers. La réversibilité des moteurs électriques permet au groupe motopropulseur d'être, en fonction des phases de conduite, générateur pour le freinage ou moteur (*convertisseur d'énergie électrique en énergie mécanique*) pour la traction.

L'énergie ainsi récupérée en phase génératrice est stockée dans la batterie de traction pour être réutilisée.



*Récupération des énergies potentielles et cinétiques (véhicule électrique)*

## 2 — [ LES APPORTS DU VE / VH PAR RAPPORT AU THERMIQUE ]

L'utilisation de la motorisation électrique permet de réduire considérablement les pertes énergétiques comme le montre le tableau ci-dessous :

Phase de fonctionnement	Comportement énergétique avec moteur	
	thermique	électrique
Accélération	Le moteur fournit l'énergie mécanique qui est nécessaire au stockage de l'énergie cinétique et qui permet de vaincre les résistances à l'avancement.	Idem au thermique.
Vitesse stabilisée (déclivité nulle)	Le moteur fournit l'énergie mécanique nécessaire afin de vaincre les résistances à l'avancement.	Idem au thermique.
Légère déclivité (puissance nulle)	Le moteur tourne à couple nul et consomme environ 5 % de la consommation à puissance nominale.	Le moteur électrique à puissance nulle ne consomme rien.
Grande déclivité (frein moteur)	Le moteur n'est plus alimenté en carburant et offre un couple résistif qui transforme l'énergie potentielle en chaleur.	Le moteur devient générateur et transforme l'énergie potentielle en énergie électrique et la stocke dans la batterie de traction afin de maintenir la vitesse.
Décélération (frein moteur)	Le moteur n'est plus alimenté en carburant et offre un couple résistif qui transforme l'énergie cinétique en chaleur.	Le moteur devient générateur et transforme l'énergie cinétique en énergie électrique et la stocke dans la batterie de traction afin de diminuer la vitesse.
Freinage	L'énergie cinétique est transformée en chaleur par le système de freinage.	La majeure partie de l'énergie cinétique est transformée en électricité, le reste est dissipé par les disques de frein. L'ensemble est piloté par un calculateur électronique.
Arrêts momentanés (feux rouges, etc.)	Le moteur tourne au ralenti et consomme environ 5 % de la consommation à puissance nominale.	Le moteur électrique à l'arrêt ne consomme rien.

Tableau comparatif des pertes d'énergie  
(Sans prise en compte du rendement moteur)

- Favorable
- Perte d'énergie



## → C. ANALYSE DES RENDEMENTS

Le rendement énergétique d'un moteur est le rapport entre l'énergie absorbée et l'énergie mécanique produite.

### → Moteurs thermiques

Le rendement des moteurs thermiques dépend du type de moteur :

Moteur	Rendement (%)	
	Forte charge	Faible charge
Essence	36	15
Diesel	42	

*Le rendement des moteurs thermiques*

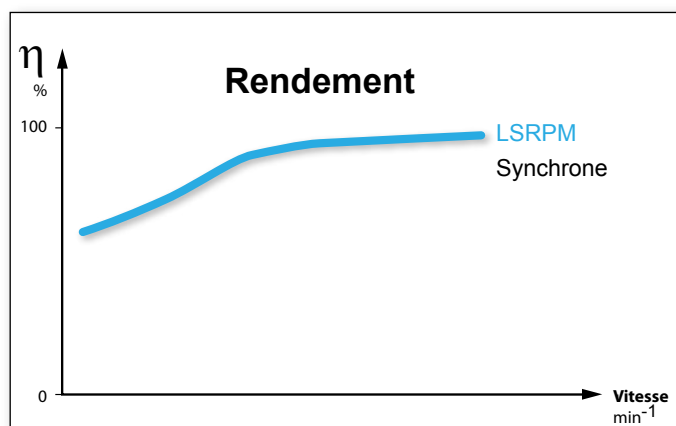
→ Source : IFP

Les rendements des moteurs thermiques (essence et diesel) restent faibles. Dans le meilleur des cas, 60 % du carburant va être perdu (principalement sous forme de chaleur). À faible charge, la perte peut avoisiner les 80 %...

Le moteur n'est cependant utilisé à forte charge que lors des accélérations, permettant ainsi un agrément de conduite. Le plus souvent, le moteur est à faible charge avec un rendement médiocre.

### → Moteurs électriques

Le rendement des moteurs électriques synchrones est supérieur à 90 % sur plus de la moitié de leurs plages de régime.



*Le rendement des moteurs électriques synchrones*

→ Source : LEROY SOMER

→ <http://dyneo.leroysomer.com>

## 2 — [ LES APPORTS DU VE / VH PAR RAPPORT AU THERMIQUE ]

Le rendement global doit prendre en compte le rendement des organes composant la chaîne de traction, à savoir : le moteur, le convertisseur et la batterie. Chacun de ces organes a un rendement supérieur ou égal à 90 % :

$$R_{\text{moteur}} \times R_{\text{convertisseur}} \times R_{\text{batterie}} = R_{\text{global}} = 0.9 \times 0.9 \times 0.9 = 0,73$$

Soit un rendement global de plus de 73 %.

Phase de fonctionnement	Rendement énergétique global	
	Moteur thermique	Moteur électrique
Accélération	≈ 40 %	> 70 %
Vitesse stabilisée (déclivité nulle)	≈ 25 %	> 70 %
Légère déclivité (puissance nulle)	0 %	> 70 %
Grande déclivité (frein moteur)	0 %	> 70 %
Décélération (frein moteur)	0 %	> 70 %
Freinage	0 %	> 70 %
Arrêts momentanés (feux, etc.)	0 %	> 70 %

Tableau comparatif des rendements véhicules thermiques / électriques  
(Rendement Énergétique Global = (Énergie restituée / Énergie absorbée) x 100)

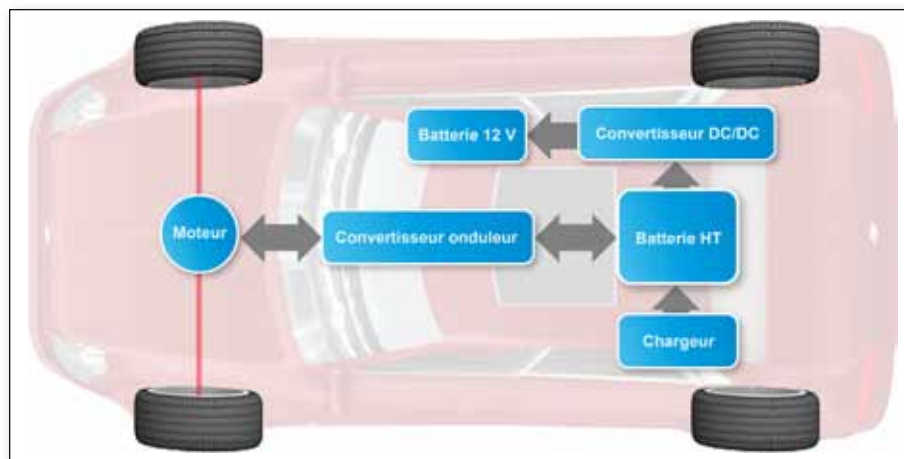
- > 70 %
- ≈ 40 %
- ≈ 25 %
- 0 %

# 3 — [ GÉNÉRALITÉS SUR LES VÉHICULES VE / VH ]

## → A. CONSTITUANTS D'UN VÉHICULE ÉLECTRIQUE

Ressemblant à première vue au véhicule thermique, le véhicule électrique se distingue néanmoins de ce dernier par son châssis spécifique. Ce châssis intègre une batterie HT (Haute Tension) dont le volume et la masse sont importants (environ 300 kg). Cela permet une répartition des masses favorisant la stabilité dynamique du véhicule.

Ce mode de motorisation nécessite des composants qui n'ont rien de commun avec ceux utilisés en motorisation thermique, comme le montre le synoptique ci-dessous.



*Synoptique d'un véhicule électrique*

### → Batterie HT

La batterie Haute Tension est le dispositif de stockage de l'énergie embarquée (on peut la comparer au réservoir de carburant pour un modèle thermique).

### → Moteur

Le moteur convertit l'énergie électrique en énergie mécanique durant les phases de traction et inversement l'énergie mécanique en énergie électrique lors des phases de freinage (régénération).

### → Convertisseur onduleur

Le convertisseur est le calculateur de puissance du moteur. Le convertisseur reçoit ainsi les paramètres de multiples capteurs dont les pédales d'accélérateur et de frein puis commande le moteur en traction ou en régénération (freinage).

### → Batterie 12 V

Les circuits de bord des véhicules électriques et thermiques nécessitent tous deux une alimentation fournie par une batterie 12 V.

### → Convertisseur DC/DC

Le convertisseur DC/DC permet de recharger la batterie 12 V au moyen de la batterie HT (Haute Tension) et l'alimentation des consommateurs électriques lors de l'activation du véhicule par la mise du contact.

### → Chargeur

Le chargeur permet de convertir l'énergie fournie par le réseau de distribution d'électricité (220 ou 380 V ~) en courant continu afin de recharger la batterie HT.

### → Les flèches

Les flèches symbolisent le sens de déplacement de l'énergie électrique.

## → B. QU'EST-CE QU'UN VÉHICULE HYBRIDE ?

Selon le dictionnaire Larousse, le terme hybride tire son origine du latin « *hybrida* » qui peut être traduit par « *composé de deux éléments de natures différentes* ».

Dans la sphère automobile, ce terme signifie que les véhicules sont équipés de deux types de motorisation, font appel à deux types d'énergie et abritent deux accumulateurs d'énergie.

Les véhicules hybrides commercialisés intègrent un moteur thermique fournissant l'énergie nécessaire au déplacement du véhicule et un ou plusieurs moteurs électriques permettant d'optimiser son fonctionnement.

Il est possible de distinguer trois familles de motorisation pour véhicules hybrides, lesquelles sont classées en fonction de la puissance du moteur électrique utilisé :

- **micro-hybride** ;
- **mild-hybride** ;
- **full-hybride**.

Le tableau ci-dessous illustre les caractéristiques propres à ces trois différentes familles.

Famille	Puissance du moteur électrique	Plage de tension	Fonctions possibles	Économie de carburant
Micro-hybride	2 à 3 kW	12 V	- Fonction démarrage/arrêt	< 10 %
Mild-hybride	10 à 15 kW	42 à 150 V	- Fonction démarrage/arrêt - Fonction Boost * - Récupération d'énergie	< 20 %
Full-hybride	> à 15 kW	> 100 V	- Fonction démarrage/arrêt - Fonction Boost * - Récupération d'énergie - Conduite électrique	> 20 %

*Caractéristiques techniques des familles hybrides*

→ Source : BMW

(\*) La fonction Boost additionne le couple du moteur électrique à celui du moteur thermique durant la phase d'accélération, ce qui permet, tout en gardant un agrément de conduite, la réduction de la puissance du moteur thermique. Cette fonction Boost permet ainsi de réduire, durant le fonctionnement à faible charge, la consommation et les rejets de CO<sub>2</sub> par une utilisation du moteur thermique dans des plages de fonctionnement à meilleur rendement.

### 3 — [ GÉNÉRALITÉS SUR LES VÉHICULES VE / VH ]

Le tableau ci-dessous représente les améliorations en termes de rendement global pour chaque phase de fonctionnement et chaque type de motorisation hybride.

Amélioration énergétique en fonction des types de motorisation hybride				
Phase de fonctionnement	Thermique	Micro-Hyb	Mild-Hyb	Full-Hyb
Accélération	■	■	■	■
Déclivité nulle (vitesse stabilisée)	■	■	■	■
Légère déclivité (puissance nulle)	■	■	■	■
Grande déclivité (frein moteur)	■	■	■	■
Décélération (frein moteur)	■	■	■	■
Freinage	■	■	■	■
Arrêts momentanés (feux rouges, etc.)	■	■	■	■
Roulage électrique seul	■	■	■	■

Tableau comparatif des améliorations énergétiques en fonction des types de motorisation hybride  
 (Rendement Énergétique Global = (Énergie restituée / Énergie absorbée) x 100)

- Amélioration
- Rendement ≈ 40 %
- Rendement ≈ 25 %
- Rendement 0 %

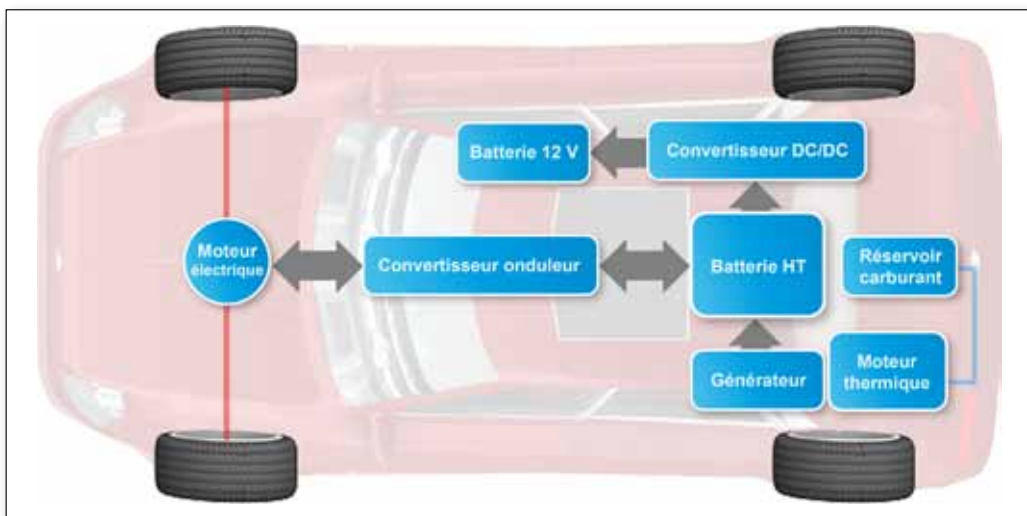
## → Synoptiques des différentes familles de véhicules hybrides

- Micro-Hybride



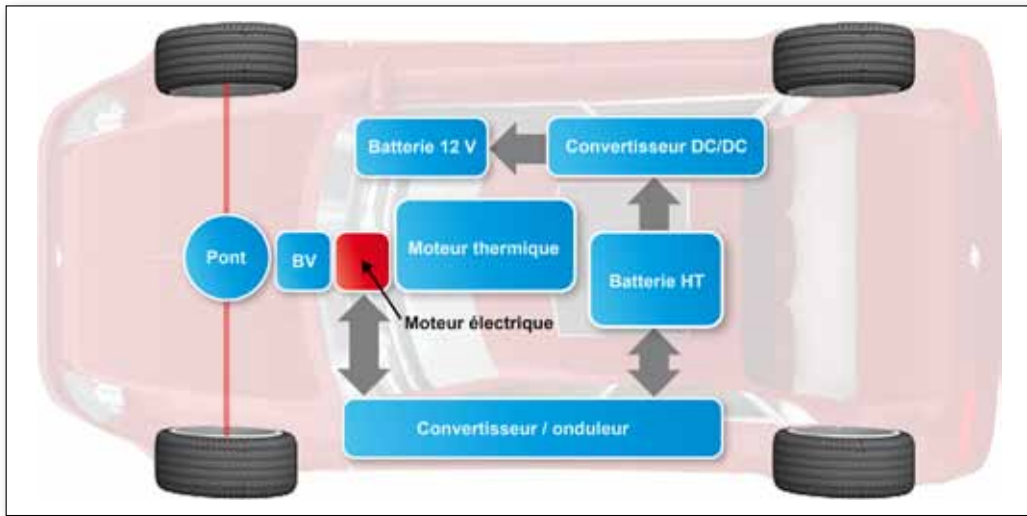
*Synoptique d'un véhicule micro-hybride*

- Hybride série



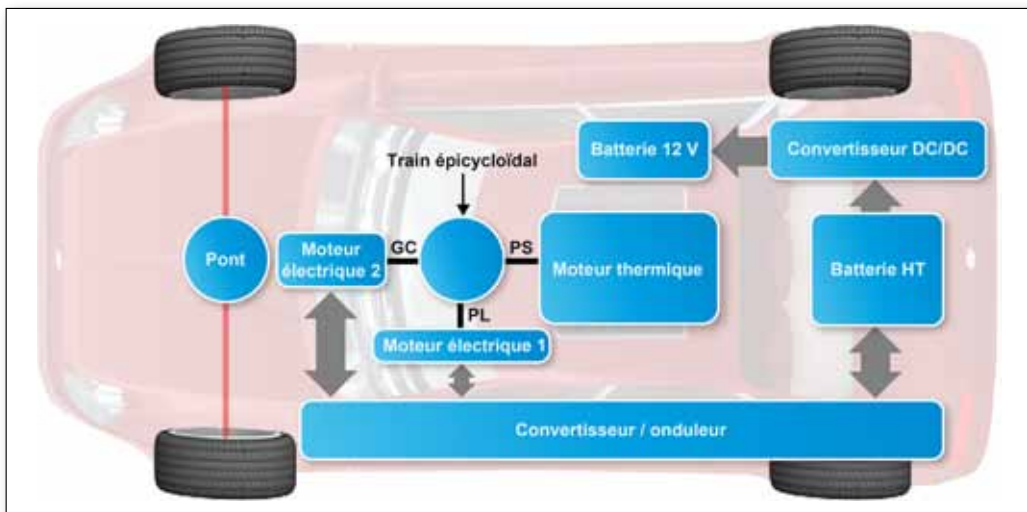
*Synoptique d'un véhicule hybride série*

- Hybride parallèle



*Synoptique d'un véhicule hybride parallèle*

- Hybride série parallèle



*Synoptique d'un véhicule hybride série / parallèle*

De multiples combinaisons sont possibles afin d'associer un ou plusieurs moteurs électriques avec un moteur thermique, chacune ayant des caractéristiques particulières.

Cela étant, ces combinaisons se composent toujours des éléments suivants :

- **Batterie HT**
  - La batterie Haute Tension est le dispositif de stockage de l'énergie récupérée, cinétique ou potentielle, stockée sous forme électrique.
- **Moteur**
  - Le moteur convertit l'énergie électrique en énergie mécanique durant les phases de traction et inversement l'énergie mécanique en énergie électrique lors des phases de freinage (régénération).
- **Convertisseur onduleur**
  - Le convertisseur est le calculateur de puissance du moteur. Il reçoit les paramètres de multiples capteurs dont les pédales d'accélérateur et de frein puis commande le moteur en traction ou en régénération (freinage).
- **Batterie 12 V**
  - Les circuits de bord des véhicules hybrides et thermiques nécessitent tous deux une alimentation fournie par une batterie 12 V.
- **Convertisseur DC/DC**
  - Le convertisseur DC/DC permet de recharger la batterie 12 V au moyen de la batterie HT (Haute Tension) et l'alimentation des consommateurs électriques lors de l'activation du véhicule par la mise du contact.
- **Chargeur**
  - Le chargeur permet d'adapter l'énergie fournie par le réseau de distribution d'électricité (220-380 V ~) afin de recharger la batterie HT. Cet élément est spécifique aux véhicules hybrides rechargeables.
- **Les flèches**
  - Les flèches symbolisent le sens de déplacement de l'énergie électrique.

En définitive, l'ensemble de ces composants est identique à ceux des véhicules électriques. Seuls quelques détails relatifs à leur fabrication et à leur stratégie les distinguent.



## → A. LES BATTERIES

### → Généralités

Un véhicule, qu'il soit électrique ou hybride, a besoin de pouvoir stocker l'énergie électrique produite par la transformation des énergies cinétiques et potentielles lors des phases de récupération.

Le véhicule électrique se distingue du véhicule hybride par le fait qu'il doit en plus stocker l'énergie nécessaire afin d'assurer une autonomie et des performances acceptables. Les besoins de stockage ne sont donc pas les mêmes.

Pour un véhicule électrique, une forte capacité de stockage est nécessaire : les cycles de charge et décharge sont lents. L'énergie produite lors des récupérations est infime en rapport à la capacité de stockage et ne provoque que de faibles fluctuations d'énergie. Ce type de véhicule utilise une **batterie d'énergie**.

Pour un véhicule hybride, il en va autrement. Une faible quantité de stockage est suffisante ; en effet, il suffit de stocker les énergies cinétiques et potentielles en attendant leur utilisation à l'accélération suivante. Les fluctuations d'énergie sont donc très importantes, pouvant atteindre 100 % de la capacité utile sur des temps très courts (quelques minutes). Ce type de véhicule utilise une **batterie de puissance**.

Le stockage de l'énergie électrique à bord d'un véhicule reste le problème majeur actuellement. Ce stockage est caractérisé par deux paramètres principaux :

- **La puissance utilisable** ( $P=U.I$ ) en kW (kiloWatt). Il s'agit du produit de la tension batterie par l'intensité maximale qu'elle peut débiter. La puissance utilisable doit être au moins égale à la puissance de pointe du moteur électrique afin de permettre son alimentation sur toute sa plage de fonctionnement.
- **L'énergie stockée** kWh (kiloWatt/heure). Cette énergie peut être comparable au volume d'un réservoir de carburant d'un véhicule thermique. C'est l'énergie stockée qui va déterminer l'autonomie d'un véhicule électrique et les possibilités de récupération pour un véhicule hybride.

L'énergie contenue dans un accumulateur électrique est le produit de sa capacité en Ampère/heure par sa tension (cette unité d'énergie étant insuffisante pour une utilisation automobile, on lui préfère le kWh soit 1000 Wh).

$$\begin{aligned}
 W &= Q \cdot U \\
 \text{Watt/heure} &= \text{Ampère/heure} \cdot \text{Volt} \\
 (\text{Wh}) &= (\text{Ah}) \cdot (\text{V})
 \end{aligned}$$

Le tableau ci-dessous donne quelques caractéristiques de batteries :

Véhicule	Type	Capacité (Ah)	Tension (V)	Énergie (kWh)	Technologie	Poids (kg)
Mercedes S400H	Hybride	6.5	120	0.78	Li-Ion	28
BMW série 7	Hybride	6.5	120	0.78	Li-Ion	28
HONDA IMA	Hybride	6.0	144	0.86	Ni-Mh	30
TOYOTA PRIUS	Hybride	6.5	201.6	1.31	Ni-Mh	39
LEXUS RX400H	Hybride	6.5	288	1.87	Ni-Mh	60
PEUGEOT 106	Électrique	100	120	12	Cd_Ni	256
PEUGEOT Partner	Électrique	100	162	16.2	Cd-Ni	345
THINK	Électrique	72	300	22	Li-Ion	245
THINK	Électrique	75	300	23	ZEBRA	260
FAM	Électrique	200	72	14.4	Ni-Mh	290
SMART	Électrique			16.5	Li-Ion	
KANGOO ZE	Électrique		240-408		Li-Ion	260

*Caractéristiques de batteries*

→ Source : données provenant de documents constructeurs ou relevées par l'auteur.

**Note 1 :** données inconnues pour les véhicules SMART et KANGOO ZE.

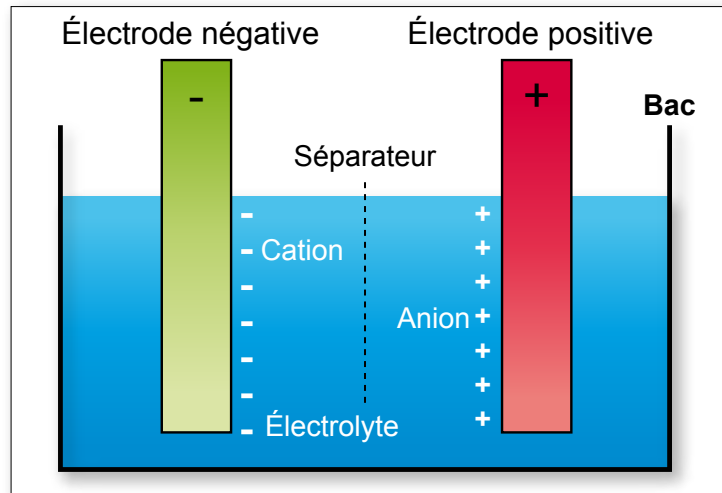
**Note 2 :** au chapitre 2, le calcul de l'énergie potentielle d'un véhicule d'une masse d'1.5 t descendant un dénivelé de 100 mètres permettait la récupération d'environ 0.4 kWh, ce qui correspond à environ la moitié de la capacité d'une batterie d'un véhicule hybride.  
Le freinage du même véhicule de 100 km/h à 0 km/h permettait la récupération d'environ 0.16 kWh.

On distingue deux modes de stockage de l'électricité utilisés dans l'industrie automobile :

- **électrochimique**, lequel renvoie à une utilisation des charges électriques libérées lors des réactions chimiques d'un couple électrochimique, ce sont les accumulateurs ;
- **électrostatique**, par utilisation de condensateurs de très fortes valeurs que sont les supercapacités (ce stockage est particulier et sera traité séparément après les accumulateurs).

## → Accumulateurs électrochimiques

Un accumulateur électrochimique est composé de deux électrodes de caractéristiques différentes plongées dans un électrolyte, acide ou basique, et isolées par un séparateur. La nature des électrodes définit le type de batterie :



*Principe de base d'un accumulateur*

La réaction chimique entre les électrodes et l'électrolyte provoque une oxydoréduction. Dans ce cas, l'électrode négative subit une oxydation, c'est-à-dire que la réaction chimique libère des électrons, tandis que l'électrode positive subit elle une réduction, autrement dit elle absorbe des électrons. Ce déséquilibre des charges électriques génère la F.E.M (Force ElectroMotrice) de l'accumulateur.

L'électrolyte, qui peut être liquide, gélifié ou solide, a pour raison d'être de permettre aux ions de se déplacer d'une électrode à l'autre lorsqu'un courant circule à l'extérieur de l'accumulateur. Cela étant, l'électrolyte ne rentre pas toujours dans la réaction chimique et ne sert alors que de conducteur ionique.

Les ions sont des atomes ayant perdu ou reçu un électron. Les atomes sont normalement neutres électriquement car ils ont autant de protons (charge positive) que d'électrons (charge négative). L'ajout d'un électron à un atome le déséquilibre négativement et forme un ion négatif ou anion. Le retrait d'un électron déséquilibre positivement l'atome et forme un ion positif, encore appelé cation.

Durant la décharge, tant qu'il y a de la matière pour entretenir la réaction chimique, la F.E.M reste à peu près stable puis s'effondre brutalement lorsque les stocks sont épuisés ; l'accumulateur est alors déchargé.

Lors de la recharge, les phénomènes chimiques sont inversés et l'accumulateur retrouve son état initial en fin de charge.

## → F.E.M de l'accumulateur

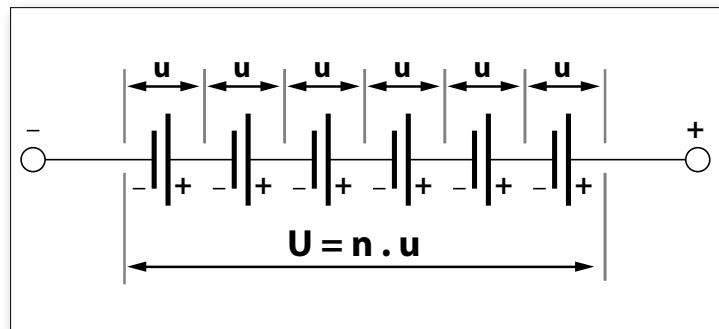
La F.E.M correspond à la tension à vide, c'est-à-dire sans courant, d'un accumulateur et dépend des matériaux constituant ses électrodes. Le tableau ci-dessous indique les valeurs pour les couples utilisés en automobile :

Type de batterie	F.E.M (Volt)
Plomb	2.1
Cadmium Nickel	1.2
Nickel Métal Hydrure	1.2
Lithium Ion	3.6
Zébra	2.6

*F.E.M de l'accumulateur*

La puissance des moteurs électriques utilisés en traction est importante et équivaut à plusieurs dizaines de kilowatts. Leur alimentation nécessite une grande puissance électrique ( $P = U.I$ ). L'intensité doit être limitée au maximum car elle génère les pertes par effet Joule (échauffement électrique)  $P_{\text{joule}} = r.I^2$ . Il faut donc, à puissance égale, élever la tension pour réduire l'intensité.

L'élévation de tension est obtenue par la mise en série des accumulateurs : on constitue ainsi une batterie d'accumulateurs.



*Batterie d'accumulateurs*

## → Égalisation des charges

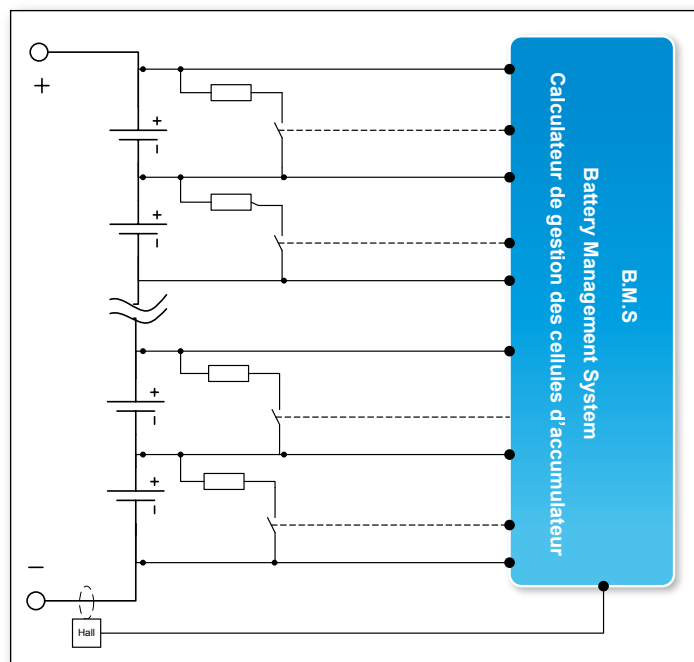
La mise en série des accumulateurs ne va pas sans poser problème. En effet, il est impossible de fabriquer des accumulateurs tous rigoureusement identiques. Lors de leur utilisation, il apparaît des différences de niveau de charge entre les divers accumulateurs, ce qui peut amener à leur destruction.

Pour éviter leur destruction prématurée, il faut égaliser l'état de charge de chaque accumulateur. Pour ce faire, on peut effectuer à intervalles réguliers, si la technologie de la batterie accepte les surcharges, une charge d'égalisation qui consiste à charger la batterie plus longtemps que nécessaire afin que chaque accumulateur soit au maximum de sa charge.

Les batteries modernes n'acceptant aucune surcharge, il faut donc surveiller électroniquement chaque accumulateur par une mesure permanente de sa tension et dériver le courant des éléments les plus chargés au profit des autres. Deux méthodes sont utilisées.

### Méthode d'égalisation

Le calculateur BMS (Battery Management System) connecte à l'aide de transistors des résistances aux bornes des cellules d'accumulateurs les plus chargées.



*Égalisation résistive des charges pour chaque cellule*

**Note :** les accumulateurs d'une même batterie ayant peu de différence et leur surveillance étant continue, le courant à dériver pour maintenir leur équilibre est très faible (quelques dizaines de milliampères seulement).

Pour en savoir plus :

<http://evpst.com>

<http://liionbms.com>

### → Le S.O.C (State Of Charge)

Il est indispensable de connaître en permanence l'état de charge de la batterie SOC (State Of Charge), qui correspond au niveau de carburant pour un véhicule thermique, car outre l'affichage du niveau de charge sur tableau de bord, elle conditionne les stratégies des calculateurs de gestion batterie (BMS) et de gestion moteur. Deux méthodes sont utilisées en fonction de la famille de batteries utilisée :

#### Méthode 1

Pour la majorité des batteries, trois paramètres suffisent à le déterminer :

- Tension
- Intensité
- Température

Le paramétrage de ces trois données dans la cartographie de charge spécifique à la batterie permet de connaître avec précision son état de charge (SOC).

#### Méthode 2

La tension aux bornes des accumulateurs Lithium-Ion reste constante sur une grande plage de fonctionnement et ne permet pas, de ce fait et dans cette plage, la détermination de son état de charge par les seuls paramètres : tension, intensité et température. En dessous et au-dessus de cette plage, ces trois paramètres sont, de nouveau, exploitables.

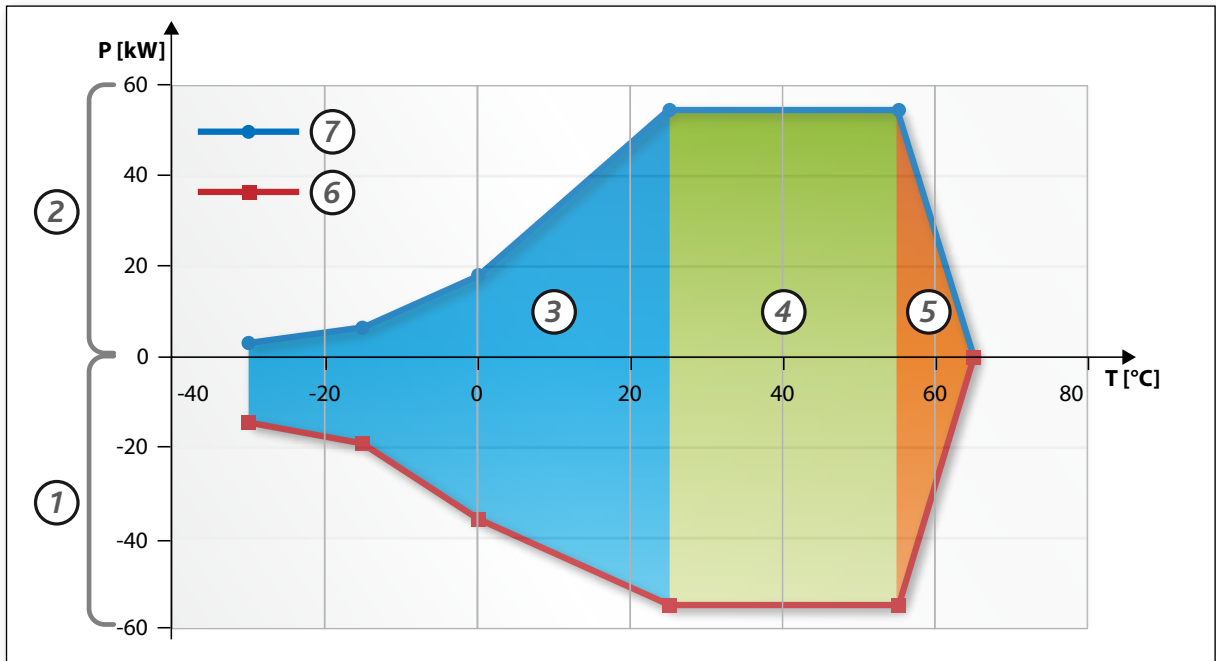
La détermination de l'état de charge se divise donc en trois zones :

- **Batterie faiblement chargée** : prise en compte de la tension, intensité et température pour en déduire le SOC.
- **Plage intermédiaire méthode Coulomb ( $Q = I.t$ )** : prise en compte de la quantité de courant entrant ou sortant pour déterminer l'état de charge en utilisant les paramètres : intensité et temps.
- **Fin de charge** : réutilisation du trio tension, intensité et température.

*Tout se passe comme si la jauge d'un réservoir ne fonctionnait que lorsque celui-ci est presque plein ou presque vide. Entre ces deux états, aucune indication n'est utilisable. Exemple : la jauge n'est précise que de 0 à 10 l et de 40 à 50 l. Remplissons le réservoir, la jauge monte et indique le volume contenu jusqu'à 10 l. Insérons un débitmètre sur le tuyau de remplissage et continuons à remplir, le volume contenu dans le réservoir est égal à 10 l, ce à quoi il faut ajouter la valeur affichée par le débitmètre. Au-delà de 40 l, la jauge redevient efficace. En fin de remplissage, la comparaison entre jauge et débitmètre permet d'apprécier le vieillissement de la batterie.*

## → Contraintes thermiques des batteries

Le principe de fonctionnement électrochimique des batteries entraîne des contraintes thermiques pour un fonctionnement optimal. À basse température, la puissance ( $P = U.I$ ) diminue fortement, comme le montre le diagramme ci-dessous. Ce fait peut être généralisé dans son principe à toutes les batteries. Si la température devient trop élevée, la réduction de puissance accompagne la dégradation irréversible de la batterie.



Représentation de la puissance utilisable en fonction de la température

- ① Zone de recharge
- ② Zone de décharge
- ③ Température basse
- ④ Température optimale
- ⑤ Température haute
- ⑥ Puissance de charge
- ⑦ Puissance de décharge

→ Source BMW : comportement en température de la batterie Ni-Mh du X6.

Les réactions chimiques, parfois exothermiques dans certaines phases de fonctionnement, ainsi que les pertes par effet Joule ( $P = r.I^2$ ), dans la résistance interne de la batterie, provoquent une élévation de température de celle-ci. Cette température va devoir être maîtrisée par un système de refroidissement.

## → Refroidissement des batteries

Une des nombreuses fonctions du BMS (Battery Management System) est la surveillance en continu de la température des accumulateurs. Pour cela, des capteurs sont placés en différents points de la batterie et l'informent de leurs températures. Le BMS peut alors commander, si besoin est, un système de refroidissement afin de maintenir la température optimale dans la zone de fonctionnement.

Plusieurs méthodes de refroidissement sont utilisées :

- la circulation de liquide de refroidissement ;
- la circulation d'air ;
- le frigorigène du circuit de climatisation ;
- le liquide de refroidissement refroidi par le frigorigène.

## → Réchauffement des batteries

Les différents calculateurs, qui entrent dans le fonctionnement de la chaîne de traction, communiquent en permanence par l'intermédiaire d'un réseau multiplexé. En cas de basses températures, le BMS informe le calculateur du moteur électrique de la réduction de puissance disponible et l'ensemble des calculateurs adoptent une stratégie de fonctionnement différente en fonction du type de véhicule, électrique ou hybride.

Pour un véhicule électrique, le calculateur limite la puissance fournie au moteur électrique afin de rester dans la plage de fonctionnement optimale de la batterie indiquée par le BMS. Quoique limité, le courant reste à un niveau élevé et sa circulation, lors du fonctionnement du véhicule, permet de réchauffer la batterie.

Les calculateurs adoptent, pour un véhicule hybride, un fonctionnement alternant rapidement les charges et décharges de la batterie provoquant ainsi le réchauffement de celle-ci grâce aux pertes par effet Joule.

## → Isolation galvanique

La batterie fournit à la chaîne de traction une tension et une intensité importantes, potentiellement dangereuses et nécessitant divers systèmes de sécurité. L'isolation galvanique constitue l'un de ces systèmes.

Son principe consiste à isoler complètement le circuit Haute Tension de la carrosserie du véhicule et à surveiller en permanence cet isolement. Cette surveillance est généralement effectuée par le BMS.

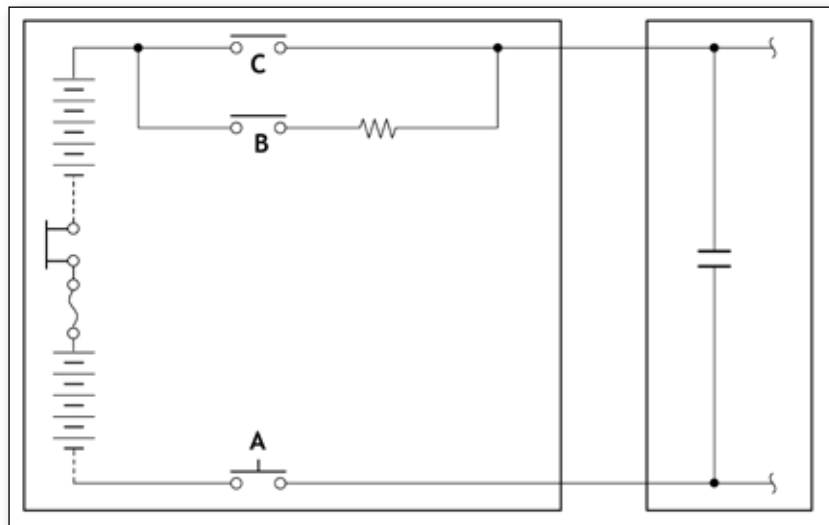
Un défaut d'isolement peut entraîner la déconnection automatique de la batterie *Haute Tension* par le BMS, ce qui élimine tout risque de court-circuit HT par la masse du véhicule.



## → Relais de coupure batterie

La Haute Tension, fournie par la batterie, ne doit pas, par mesure de sécurité, être en permanence présente sur les circuits du véhicule. Il faut donc pouvoir connecter la batterie lors de la mise en marche du véhicule et la déconnecter lors de la coupure du contact.

Cette fonction est assurée par un groupe de relais commandé dans un ordre précis par le BMS. En effet, la coupure d'une haute tension continue est délicate. La tension minimale d'entretien d'un arc électrique dans l'air n'étant que de 25 V, il faut impérativement que le courant circulant lors de la coupure soit nul, pour ne pas amorcer d'arc électrique, aux contacts des relais.



*Les relais de coupure d'une batterie Toyota*

→ Source TOYOTA

### Fonctionnement lors de la mise sous tension

Les relais A et B sont actionnés et permettent la charge douce du condensateur, lequel est localisé dans le convertisseur. Le relais C est fermé, sur quoi B peut être ouvert. Le circuit est alors sous tension.

### Fonctionnement lors de la mise hors tension

Relais B actionné puis ouverture de C, le courant résiduel passe par la résistance, puis A et B sont ouverts. Le courant est coupé.

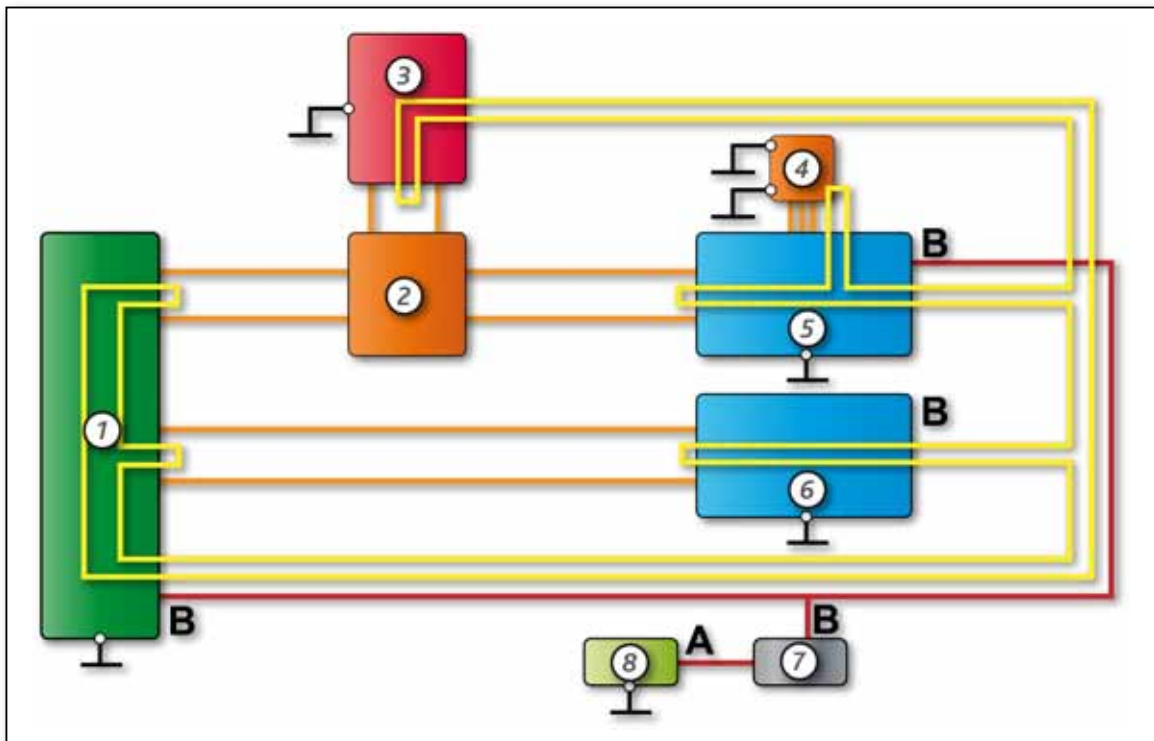
**Attention :** lors des coupures d'urgence, le BMS n'applique pas cette procédure afin de réduire au maximum le temps de coupure, ce qui provoque un arc électrique détériorant les contacts des relais. Un compteur de coupures dites « sauvages » est incrémenté et la batterie est mise hors service, une fois le nombre maximal atteint.

**Note :** la résistance peut être remplacée par un condensateur (ex : Mercedes S400H).

## → Système interlock HT

Le système interlock est l'un des systèmes de sécurité du circuit HT (Haute Tension). Par ce système, le BMS surveille en permanence la bonne connexion de tous les connecteurs HT. Lors d'une déconnection, le BMS ouvre les relais de la batterie HT, coupant ainsi le courant sur les broches du connecteur et assurant la sécurité de l'intervenant. Attention toutefois, ce type de coupure d'urgence est comptabilisé par le BMS. En conséquence, il faut toujours suivre la procédure établie par le constructeur et ne déconnecter qu'une fois le circuit hors tension.

Le principe de fonctionnement de ce système reste simple. Chaque connecteur est composé de deux parties, l'une mâle, l'autre femelle. Deux broches sont pontées dans l'une des parties, l'autre est montée en série avec tous les autres connecteurs du circuit HT. La déconnection d'un connecteur ouvre le circuit interlock.



*Le circuit interlock de la S400H Mercedes*

- |  |   |
|--|---|
| ① Calculateur système de gestion de batterie (BMS) | ⑧ Batterie 12 V                               |
| ② Unité de distribution de puissance (PDU)         | Ⓐ Borne 30                                    |
| ③ Compresseur frigorifique électrique              | Ⓑ Borne 30c                                   |
| ④ Moteur électrique                                | <b>Circuit rouge</b> : câble 12 V             |
| ⑤ Calculateur électronique de puissance            | <b>Circuit jaune</b> : câble signal interlock |
| ⑥ Calculateur convertisseur DC/DC                  | <b>Circuit orange</b> : câble haute tension   |
| ⑦ Élément de coupure pyrotechnique                 |   |

→ Source : DAIMLER

## → Les différentes batteries utilisées dans le secteur automobile

Le tableau ci-dessous indique les performances, pour chaque famille de batterie, en puissance (W/kg) et en énergie (Wh/kg). La zone (5) illustre le fait qu'en fonction de ses détails de fabrication, une batterie peut être de forte puissance avec une faible énergie (batterie de puissance) ou de forte énergie mais de faible puissance (batterie d'énergie).

Le choix de la technologie utilisée est capital afin de contenir les besoins en énergie du véhicule dans la plage de fonctionnement de la batterie. Cela permet, en effet, de garantir une longévité d'utilisation satisfaisante.

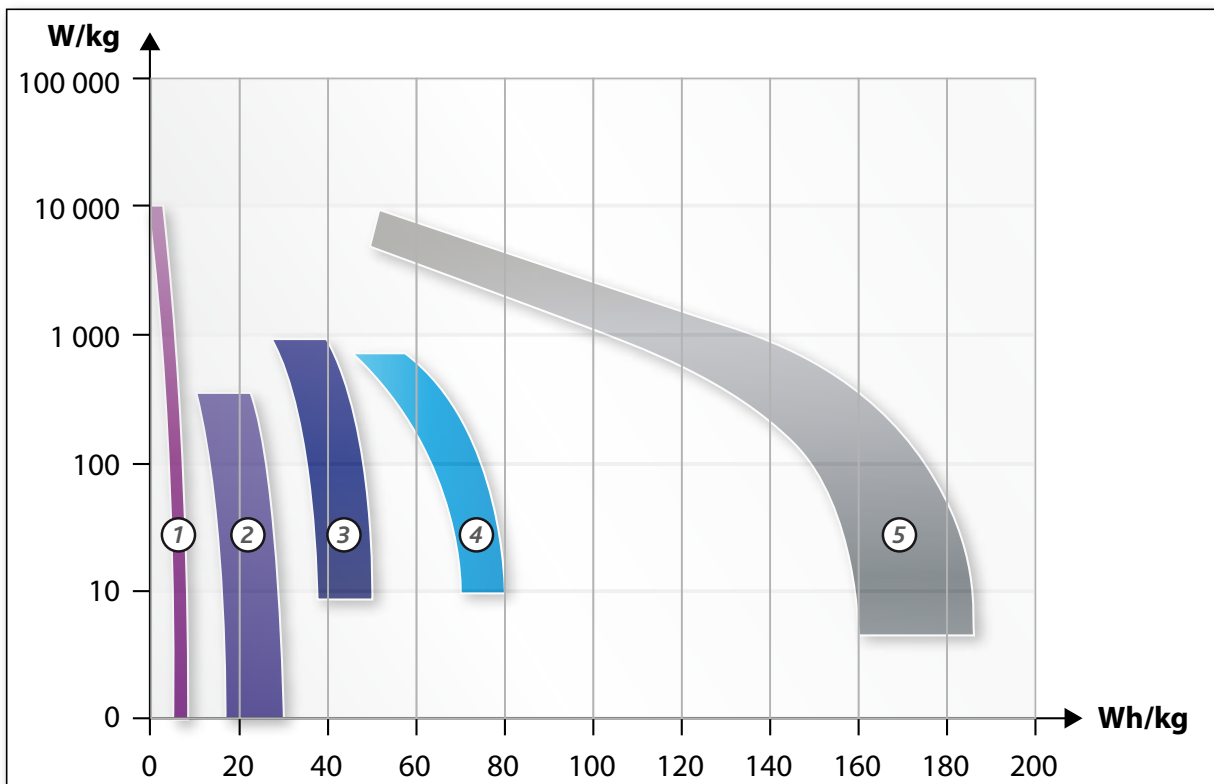


Tableau comparatif des différentes technologies de batteries

- ① Supercapacité (accumulateur électrostatique)
- ② Batterie plomb (Pb)
- ③ Batterie Cadmium Nickel (Cd-Ni)
- ④ Batterie Nickel Métal hydrure (Ni-Mh)
- ⑤ Lithium-Ion (Li-Ion)

→ Source : BMW

Chacune de ces familles a ses spécificités qu'il convient de traiter séparément. Le choix a été fait de les présenter dans l'ordre chronologique de leur apparition.

## → Batterie au plomb

La plus ancienne des batteries d'accumulateur, découverte par Gaston Planté en 1859, est encore utilisée de nos jours pour la traction électrique. Elle équipe les scooters, les quadricycles légers et la grande majorité des chariots élévateurs. Cette batterie se décline en trois modalités, présentant chacune une technologie spécifique :

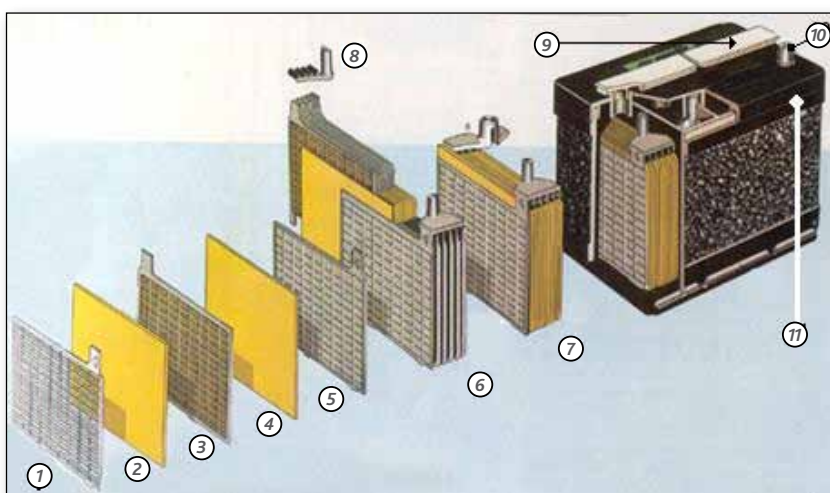
- batterie à électrolyte liquide ;
- batterie à électrolyte gélifié ;
- batterie AGM (Absorbed Glass Mat).

La tension est de 2,1 V et l'énergie massique de 30 à 50 Wh/kg.

La constitution de ces électrodes, encore appelées plaques, détermine les caractéristiques de la batterie. Par souci de simplification, elles peuvent être définies comme suit :

- Une grande surface de plaques permet la réaction chimique simultanée d'un grand nombre d'ions et favorise les fortes intensités. Les batteries de démarrage en sont un exemple (batterie de puissance). Cette grande surface est obtenue par l'utilisation de plomb spongieux offrant une surface utilisable bien plus importante que leur surface apparente.
- L'épaisseur des plaques conditionne la masse de matière pouvant entrer dans la réaction chimique et par conséquent l'énergie qu'elle pourra fournir. C'est ce type de batterie qui est utilisé en traction électrique ou pour les applications stationnaires (batterie d'énergie).

## → Batterie à électrolyte liquide



- ① Plaque négative
- ② Séparateur
- ③ Plaque positive
- ④ Séparateur
- ⑤ Plaque négative
- ⑥ Assemblage des éléments 1 à 5
- ⑦ Élément assemblé
- ⑧ Pont de connexion
- ⑨ Bouchon
- ⑩ Borne
- ⑪ Bac

*Constitution d'une batterie à électrolyte liquide*

### Composition :

Électrode positive : peroxyde de plomb en contact avec une grille en plomb.

Électrode négative : plomb spongieux en contact avec une grille en plomb.

Électrolyte : solution concentrée d'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ).

Séparateur : plastique poreux ou fibre de verre.

Un empilage de plaques positives et négatives forme un élément placé dans un bac contenant une solution d'acide sulfurique et d'eau d'une densité de 1.28 kg/l. L'introduction de Calcium (Ca) dans l'alliage des plaques permet de réduire en grande partie la décomposition de l'eau par électrolyse sans la supprimer. Il faut donc périodiquement réajuster le niveau d'électrolyte avec de l'eau déminéralisée afin que la partie supérieure des plaques soit toujours immergée.

Ce type de batterie est utilisé principalement pour alimenter les chariots élévateurs électriques. Elle se compose en général d'éléments de 2 V d'une capacité de 500 à 1000 Ah montés en série afin d'obtenir la tension souhaitée. L'ensemble des éléments est placé dans un bac en acier très robuste qui permet de les immobiliser. La masse importante des batteries ne constitue pas un handicap pour cette application car ces véhicules ont besoin d'un contrepoids de plusieurs centaines de kilos.

#### → Batterie plomb à électrolyte gélifié

De même constitution que les batteries à électrolyte liquide, cette batterie se distingue par la gélification de son électrolyte avec du silicate et par un bac étanche. Le silicate correspond à de l'oxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ), d'où l'appellation parfois utilisée de batterie « silicium » ou « silicone ». **Attention**, à ne pas confondre avec la batterie silicium air en cours de développement par un groupe de chercheurs israéliens, japonais et américains qui utilisent du silicium pour ses électrodes.

Son bac étanche lui permet une utilisation dans toutes les positions, et son faible coût de revient fait que cette batterie trouve principalement son utilisation sur les deux roues d'entrée de gamme (et ce, malgré sa faible énergie massique). Il faut cependant respecter sa plage de fonctionnement afin de lui assurer une longévité satisfaisante. Une remise en eau est, en effet, impossible ; l'oxygène et l'hydrogène dégagés lors d'un fonctionnement anormal ne peuvent être évacués.

#### → Batterie plomb AGM

L'acronyme AGM signifie « Absorbed Glass Mat ». L'électrolyte liquide de cette batterie est absorbé en totalité par capillarité et donc immobilisé dans des buvards (mat) en fibre de verre (borosilicate), placés entre les électrodes. La totalité des plaques d'un élément est enfermée dans une poche synthétique. Tous les éléments d'une batterie AGM sont placés dans un bac étanche équipé d'un clapet permettant d'évacuer une éventuelle surpression.

Cette méthode de fabrication permet de réduire l'espace séparant les plaques positives des plaques négatives, ce qui diminue la résistance interne de la batterie. D'autre part, le gain de place obtenu permet d'ajouter des plaques supplémentaires, ce qui augmente la capacité pour un même volume.

Comme il n'y a aucune réserve d'électrolyte dans ses éléments, il faut veiller à ce que ce type de batterie ne perde pas d'eau. Pour remédier à cet inconvénient, les plaques sont constituées d'un alliage spécifique Pb-Ca et Pb-Ca-Sn et les séparateurs en micro-fibres de verre permettent une migration rapide de l'oxygène de la plaque positive vers la plaque négative, pour qu'il se recombine avec l'hydrogène, réduisant ainsi de 99 % la décomposition de l'eau et éliminant le besoin d'en rajouter.

Une élévation de température favorise les pertes d'eau. En conséquence, il faut veiller, lors de son implantation dans un véhicule, à réserver à la batterie un endroit qui soit le plus frais possible, hors du compartiment moteur pour un véhicule thermique. Une batterie AGM ayant une durée de vie en floating\* de 10 ans à 25 °C n'aura plus qu'une longévité de 5 ans à 33 °C.

La faible résistance interne des batteries AGM leur permet de supporter des intensités de charge et de décharge très élevées, ce qui peut être un avantage évident lors des phases de récupération d'énergie au freinage. De plus, sa forte capacité, nécessaire aux démarrages répétés, fait de cette batterie **le composant indispensable des véhicules micro-hybrides**.

Outre les véhicules micro-hybrides, cette batterie équipe aussi quelques véhicules électriques comme les VOLTEIS : c'est alors sa capacité qui est exploitée. Toutefois, cette batterie supporte mal les cyclages\*\* car l'électrolyte forme alors des strates, ce qui atténue considérablement ses performances.

**Recyclage :**

Métal Blanc

→ [www.metalblanc.fr](http://www.metalblanc.fr)

\* Le floating définit le fonctionnement d'une batterie montée en tampon sur une alimentation secteur afin de maintenir le fonctionnement d'un système lors des coupures secteur (ex : système d'alarme, onduleurs, etc.).

\*\* Le cyclage définit un fonctionnement alternant décharge complète suivie d'une charge complète.

→ **Batterie Cadmium Nickel (Ni-Cd)**

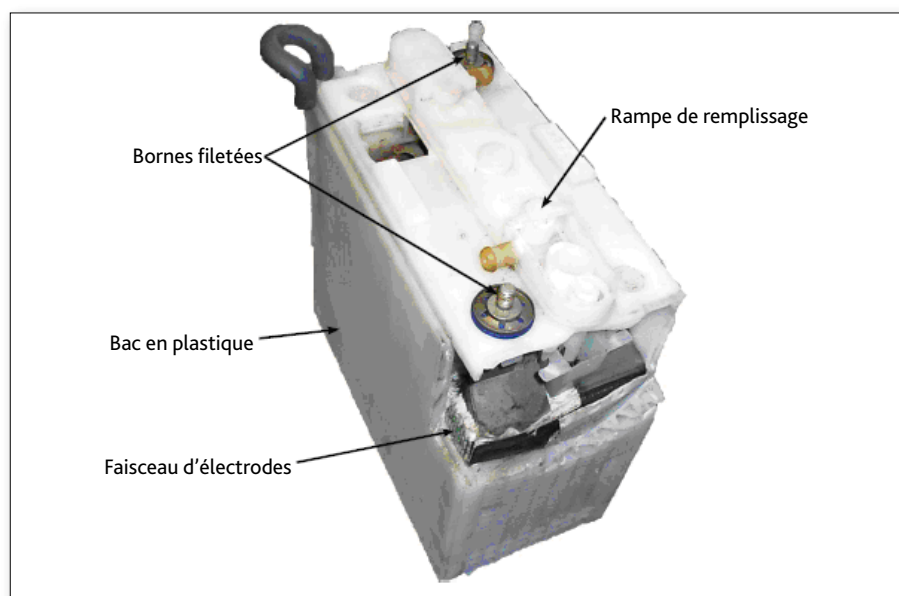
Résultat des travaux du suédois Waldemar Jungner en 1899, ces batteries sont beaucoup plus légères et possèdent une durée de vie habituellement plus longue que celles au plomb. Seule réserve, leur coût de fabrication reste élevé.

Ces batteries ont équipé les véhicules électriques produits dans les années 1990 par PSA, Renault ainsi que des bus urbains.

La haute toxicité du cadmium est à l'origine de la directive européenne 2002/95/CE visant à réduire autant que possible l'utilisation de celui-ci et à utiliser des matériaux de substitution.

Les risques sanitaires et l'apparition de nouvelles technologies de batteries plus performantes font que les constructeurs automobiles ne les utilisent plus.

La tension est de 1.2 V et l'énergie massique de 45 à 80 Wh/kg (fort effet mémoire).



Exemple de batteries Nickel Cadmium « SAFT » monobloc 6 V 100 Ah

**Composition :**

Électrode positive : hydroxyde de nickel (état déchargé).

Électrode négative : oxyde de cadmium.

Électrolyte : solution concentrée de potasse (KOH).

Séparateur : matériau non tissé synthétique.

Il est indispensable de refroidir cette batterie pour garantir sa longévité. Des capteurs de température sont implantés sur quelques accumulateurs, et un circuit de liquide de refroidissement est inséré dans les parois des accumulateurs.

**Recyclage :**

Société Nouvelle d’Affinage des Métaux

→ [www.snam.com](http://www.snam.com)

→ **Batterie Nickel Métal hydrure (Ni-Mh)**

Les batteries nickel / métal hydrure sont apparues au début des années 1990. De même tension mais avec une capacité supérieure aux batteries Ni-Cd, elles les ont rapidement remplacées pour alimenter les petits appareils. Parce que ces batteries n’utilisent pas de cadmium, la pollution de l’environnement est nettement moins importante.

Reprenant les bases des batteries Ni-Cd, les batteries nickel / métal hydrure sont plus légères et plus puissantes mais aussi plus onéreuses parce que leur fabrication nécessite des métaux et des terres rares comme le lanthane. Leur tension est 1.2V et l’énergie massique de 60 à 90 Wh/kg (faible effet mémoire).

**Le BMS est indispensable à cette technologie.**

Applications véhicules : TOYOTA Prius et Auris, LEXUS, HONDA IMA, BMW X6, FAM, etc.

**Composition :**

Électrode positive : hydroxyde de nickel (état déchargé).

Électrode négative : alliage métallique formant facilement des hydrures métalliques.

Électrolyte : solution concentrée de potasse (KOH).

Séparateur : matériau non tissé synthétique.

**Vue de batterie Ni-Mh**



*Batterie Toyota PRIUS*



*Batterie Ni-Mh d'une LEXUS*

La réaction chimique du Ni-Mh est exothermique. Il y a donc une élévation de la température de l’élément Ni-Mh au cours de sa charge. Cette élévation de température sera proportionnelle à l’intensité du courant de charge. Un système de refroidissement est donc indispensable.

**Recyclage :**

Société Nouvelle d’Affinage des Métaux, des accords ont été signés avec TOYOTA.

→ [www.snam.com](http://www.snam.com)



## → Les batteries Lithium

Le lithium est le plus léger et le plus réducteur des métaux, de masse atomique trois, juste après l'hydrogène et l'hélium. Il a une densité de 0.5 kg/dm<sup>3</sup>.

Tous les matériaux pouvant accueillir en leur sein des ions lithium peuvent servir à la fabrication d'accumulateurs. C'est pourquoi, il existe une grande variété d'accumulateurs au lithium.

Les accumulateurs lithium offrent aujourd'hui les plus importantes densités d'énergies massiques et volumiques (environ 160 Wh/kg et 400 Wh/l). Ils sont aussi les plus délicats dans leur utilisation et un BMS (Battery Management System) est indispensable pour s'assurer de la meilleure longévité. Ils n'ont aucun effet mémoire.

La tension d'un accumulateur lithium varie entre 3,0 V et 3,7 V en fonction de sa technologie de fabrication et elle reste stable en charge comme en décharge.

Le recyclage de ces batteries n'est pas d'actualité, mais les entreprises spécialisées, déjà citées, affirment qu'elles seront opérationnelles lorsque les véhicules arriveront en fin de vie.

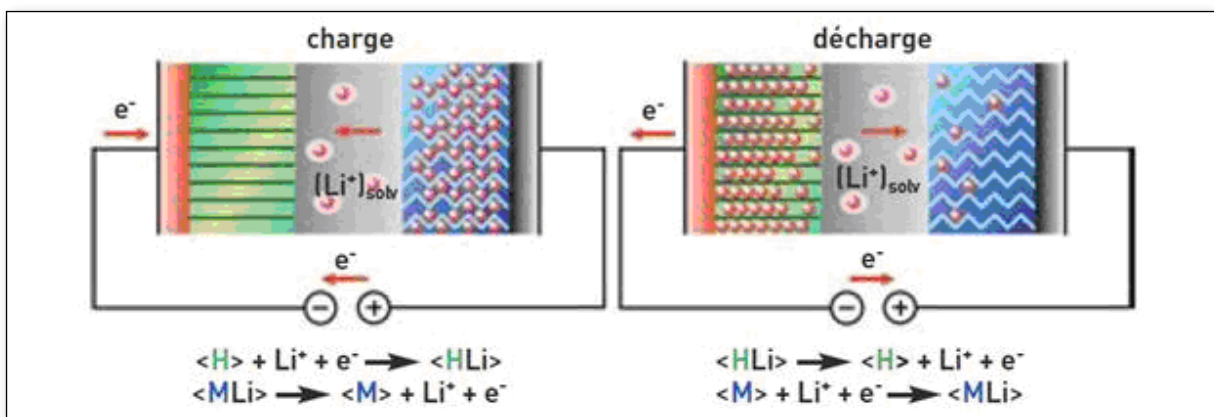
Le transport et le conditionnement de ces batteries sont soumis à une réglementation spécifique UN3490 ou UN3090 des matières dangereuses.



### → Batterie Lithium ion (Li-ion) $\text{LiCoO}_2$

Les électrodes des accumulateurs lithium-ion sont constituées de deux feuillets servant de conducteur sur lesquels sont déposés les matériaux actifs sous forme de vernis. Ces deux feuillets sont séparés par un film isolant poreux imprégné d'un électrolyte anhydre. Les feuillets sont enfin enroulés et enfermés dans un boîtier étanche et robuste afin qu'ils n'entrent pas en contact avec l'air ambiant. Toute fuite ou perforation du boîtier pourrait entraîner la combustion de l'accumulateur, l'électrolyte étant inflammable.

L'accumulateur lithium ion dispose de la plus forte énergie massique et volumique, avec environ 160 Wh/kg et 400 Wh/l. Sa tension nominale est de 3.6 V et sa plage maximale de fonctionnement varie de 2,5 V à 4,2 V.



Principes de fonctionnement d'un accumulateur lithium-ion

→ Source : GNFA support FTEEH

Lors de la décharge, le lithium relâché par l'électrode négative (graphite déposé sur feuillet de cuivre) migre sous forme ionique  $\text{Li}^+$  à travers l'électrolyte et vient s'intercaler dans le réseau cristallin du matériau actif de l'électrode positive (oxyde de lithium manganèse ou cobalt déposé sur un feuillet d'aluminium). Le passage de chaque ion  $\text{Li}^+$  dans le circuit interne de l'accumulateur est exactement compensé par le passage d'un électron dans le circuit externe, générant ainsi un courant électrique.

La charge inverse le processus. Le sens de déplacement des électrons, à l'extérieur de la batterie, et le sens des ions lithium  $\text{Li}^+$ , dans l'électrolyte, sont inversés.

Applications véhicules : MERCEDES S400H, TOYOTA PRIUS rechargeable, BMW série 7 hybride, RENAULT VE, PEUGEOT Lion, CITROËN C-Zero, etc.

## → Batterie Lithium Fer Phosphate LiFePO<sub>4</sub>

Les accumulateurs lithium-ion utilisent des matériaux rares comme le cobalt et le manganèse qui alourdissent les coûts de fabrication et complexifient le recyclage.

Les accumulateurs lithium fer phosphate s'affranchissent de ces matériaux en les remplaçant par du fer et du phosphate, lesquels ne posent aucun problème d'approvisionnement et de recyclage. Leur mode de fabrication est le même que celui utilisé pour les accumulateurs lithium-ion.

Cette modification a pour conséquence une réduction de la tension et de l'énergie massique (3,2 V et 140 Wh/kg), mais une amélioration, les plaçant au premier rang, pour le cyclage\*, qui est l'une des qualités indispensables pour les accumulateurs équipant un véhicule électrique.

Les batteries utilisant cette technologie n'ont fait leur apparition que récemment et encore peu de véhicules en sont équipés.

Applications véhicules : MIA ELECTRIC Mia, etc.

*Pour en savoir plus :*

→ [www.lifepo4.fr](http://www.lifepo4.fr)

## → Batterie Lithium Polymère (Li-Po)

Cet accumulateur correspond à une évolution de la version lithium-ion. L'électrolyte liquide a été remplacé par un électrolyte en élastomère. L'étanchéité fournie par celui-ci n'impose plus l'utilisation d'un boîtier, ce qui réduit l'encombrement.

L'utilisation d'un électrolyte en polymère réduit l'énergie massique (100 à 110 Wh/kg) de cet accumulateur mais le gain en volume est apprécié pour toutes les applications compactes : vélos, modèles réduits, téléphones, ordinateurs, etc.

Applications véhicules : HYUNDAI BlueOn, VENTURY Fetish, etc.

Sa tension nominale est de 3.7 V et sa plage maximale de fonctionnement va de 2,5 V à 4,2 V.

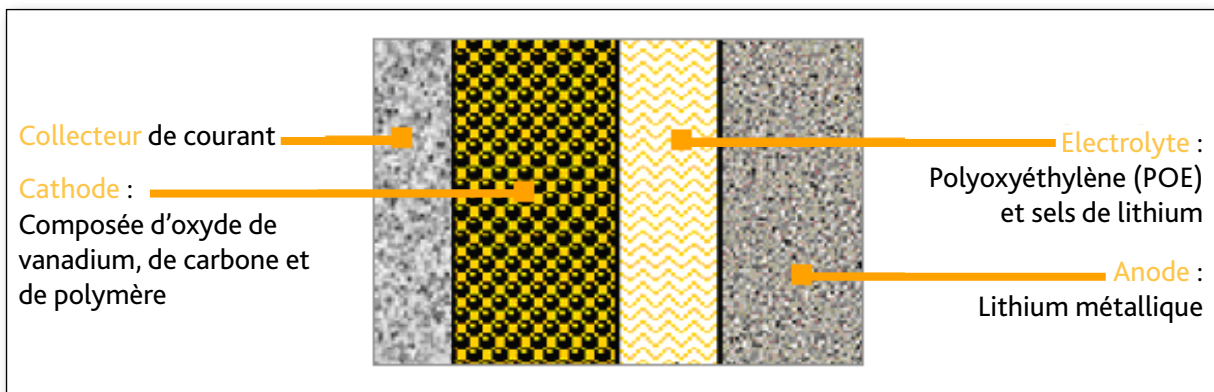
\* Le cyclage définit un fonctionnement alternant décharge complète et charge complète.

## → Batterie Lithium Métal Polymère (LPM)

Cet accumulateur est une production de la société BATSCAP du groupe BOLLORÉ. Sa technologie de fabrication utilise trois feuillets enroulés : un pour la cathode\*, un pour l'électrolyte et un pour l'anode\*.

- La cathode est constituée d'un feuillet collecteur de courant recouvert d'un composé d'oxyde de vanadium, de carbone et de polymère.
- L'électrolyte est une feuille composée de POE (PolyOxyÉthylène) et de sels de lithium.
- L'anode est constituée d'un feuillet de lithium (métal).

L'énergie massique et volumique est comparable à celle des batteries lithium polymère, ce qui équivaut à 110 Wh/kg et 110 Wh/l. Sa tension nominale est de 3,0 V.



*La constitution d'un accumulateur Lithium Métal Polymère*

→ Source : BATSCAP

→ [www.batscap.com](http://www.batscap.com)

Lors de la décharge, l'anode assure la fourniture des ions lithium et la cathode agit comme un réceptacle où les ions lithium viennent s'intercaler. Les deux électrodes sont séparées par un électrolyte polymère solide, conducteur des ions lithiums. La conductivité des ions est assurée par la dissolution de sels de lithium dans le polyoxyéthylène. Pour obtenir une conductivité optimale, la température de ce polymère doit être maintenue entre 80 °C et 90 °C.

Applications véhicules : BLUE CAR du groupe BOLLORÉ.

\* Pour un accumulateur, l'anode définit l'électrode négative et la cathode l'électrode positive.

## → Batterie Nickel chlorure de sodium ZEBRA

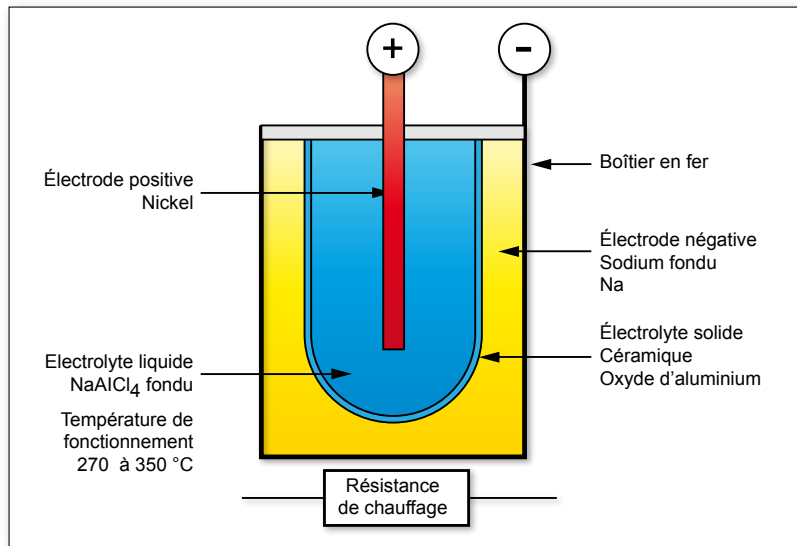
Cet accumulateur utilise un électrolyte et une électrode négative qui doivent être en fusion pour activer son fonctionnement. Il est donc nécessaire de le chauffer à l'aide d'une résistance afin qu'il atteigne sa température de fonctionnement qui doit être comprise entre 270 et 350 °C.

L'électrolyte et l'électrode négative étant à l'état liquide, il faut les séparer afin qu'ils ne se mélangent pas. Pour ce faire, un électrolyte solide composé d'un tube en céramique assure le passage des ions et la séparation des deux fluides.

L'énergie massique : 90 à 150 Wh/kg.

L'énergie volumique : 160 Wh/kg.

Tension : 2,58 V.



*Schéma d'un accumulateur ZEBRA*

Cet accumulateur doit toujours être maintenu en température. Il utilise pour cela sa propre énergie afin d'alimenter la résistance de chauffage, ce qui engendre une fuite interne importante (environ 80 W).

Lorsque le véhicule n'est pas utilisé, il faut impérativement le mettre en charge afin que cette température puisse être maintenue par le courant provenant du secteur et que la batterie soit rechargée.

Cet accumulateur n'utilise que des matériaux communs, sans empreinte écologique et facilement recyclables.

Applications véhicules : CITROËN / VENTURI Berlingo de la Poste, THINKS, etc.

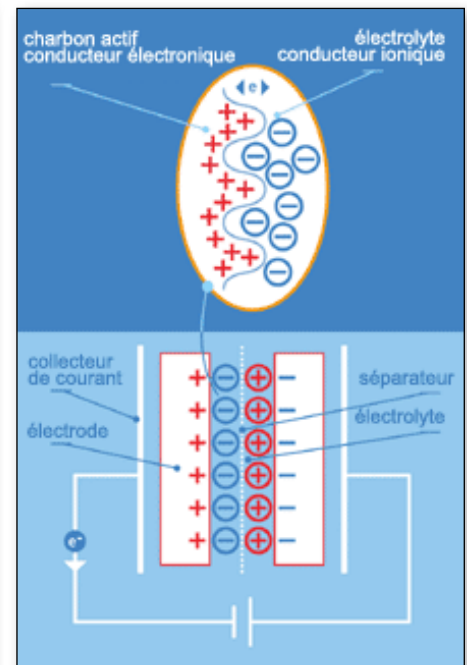
## → Supercapacité

L'alternance de charges et de décharges accélère le vieillissement des batteries. Il s'agit malgré tout d'un fonctionnement normal pour un véhicule hybride. Les supercapacités sont des condensateurs de très forte valeur qui peuvent stocker l'énergie récupérée lors d'un freinage et le restituer par la suite, sans perte d'énergie et sans altération, soulageant ainsi la batterie et augmentant sa longévité.

Dans le cas d'une utilisation normale, la tension des accumulateurs reste stable durant la décharge ou la charge, et voisine de leur tension nominale. Ce n'est, en revanche, pas le cas pour les condensateurs où la tension est proportionnelle à la quantité de courant qu'ils contiennent. ( $U = Q/C$ )

Cette variation incessante de la tension aux bornes des condensateurs nécessite l'utilisation d'une électronique afin, d'une part, de ne pas dépasser la tension nominale admise par les condensateurs et, d'autre part, d'adapter leurs tensions à celle de la batterie. Le surcoût important qu'entraîne l'utilisation de cette technologie fait qu'elle n'est utilisée, actuellement, que pour les bus et les tramways.

Capacité (25 °C, 100 A)	2600 F
Tension nominale	2,7 V
Résistance série DC (25 °C, 100 A)	0,35 mOhm
Résistance série AC (25 °C, 100 A)	0,2 mOhm
Courant pic maximal	600 A
Masse	500 g
Énergie spécifique 2,7 V, 25 °C	5,3 Wh/kg
Puissance spécifique maximale (2,7 V, 25 °C)	20 kW/kg
Constante de temps RSDCC (25 °C, 100 A)	0,9 s
Température d'utilisation	-30 to +60 °C
Température de stockage	-30 to +70 °C



Caractéristiques techniques d'un élément unitaire de 2600 F

→ Source : BATSCAP

→ [www.batscap.com](http://www.batscap.com)

Les supercapacités doivent être couplées en série et en parallèle afin d'obtenir la capacité et la tension nominale souhaitées :

- La mise en série additionne leur tension nominale mais diminue leur capacité.

$$\text{Céqui} = C / \text{nombre de condensateurs montés en série}$$

- La mise en parallèle additionne leurs capacités sans modifier leur tension.

L'énergie stockée dans un condensateur correspond à :  $E = \frac{1}{2} C U^2$   
(E en Joules, C en Farads, U en Volts)

	Plomb	Ni/Cd	Ni/MH	ZEBRA Nickel Chlorure Sodium	Li-ion		Li-métal
					LiCoO <sub>2</sub>	LiFePO <sub>4</sub> <sup>(1)</sup>	polymère <sup>(1)</sup>
Disponibilité pour VE	En série	En petite série	En série	En petite série	En petite série	En petite série	En petite série
Énergie spécifique massique (Wh/kg)*	30-50	45-80	60-120	120	150-190	120-140	150-190
Énergie spécifique volumique (Wh/litre)*	75-120	80-150	220-330	180	220-330	190-220	220-330
Puissance en pointe (W/kg)	Jusqu'à 700	Jusqu'à 400	Jusqu'à 900	200	Jusqu'à 1500	Jusqu'à 800	Jusqu'à 250
Nombre de cycles (charge/décharge)	400-1200	2000	1500	800	500-1000	>2000	200-300
Autodécharge par mois	5 %	20 %	30 %	12 % par jour	10 %	5 %	10 %
Tension nominale d'un élément	2 V	1,2 V	1,2 V	2,6 V	3,6 V	3.2 V	3 V
Gamme de température de fonctionnement	-20 °C à 60 °C	-40 °C à 60 °C	-20 °C à 60 °C	-40 °C à 50 °C (350 °C à coeur)	-20 °C à 60 °C	0 °C à 45 °C (charge) -20 °C à 60 °C (décharge)	0 °C à 60 °C (70-90 °C à coeur)
Avantages	Faible coût	Fiabilité Cyclabilité Performances à froid	Très bonne densité volumique d'énergie	Très bonne densité d'énergie Bonne cyclabilité	Excellent en énergie et puissance spécifiques	Très bonne Wh/kg en sécurité et cyclabilité. Faible coût par rapport au LiCoO <sub>2</sub>	Possibilité de batteries en films minces Très « logeable »
Inconvénients	Faible densité Wh/kg Mort subite	Faible densité Wh/kg Présence du Cd	Coût des matériaux de base Comportement en basse T °C	Puissance limitée Très forte autodécharge	Sécurité à maîtriser pour les gros éléments Coût	Charge à basse T °C	Performances à froid Coût
Coûts Indicatifs <sup>(2)</sup> (€/kWh)	200 à 250 <sup>(3)</sup> 200 <sup>(4)</sup>	600	1500 à 2000	800 à 900	2000	1000 à 1800	1500 à 2000

Tableau comparatif des différents accumulateurs

\* Les chiffres extrêmes des fourchettes correspondent à des tailles différentes d'éléments (les gros ayant en général des énergies spécifiques plus élevées) ou à des conceptions pour des applications différentes.

<sup>(1)</sup> Pas encore disponibles sur le marché pour les applications « véhicule électrique » ;

<sup>(2)</sup> pour les volumes actuels de production ;

<sup>(3)</sup> éléments prismatiques étanches ;

<sup>(4)</sup> éléments bobinés tubulaires.

## → B. LES MOTEURS ÉLECTRIQUES

Très utilisé depuis plus d'un siècle, le moteur électrique est souple, silencieux, ne pollue pas et s'adapte à toutes les situations.

De manière spécifique, le moteur électrique de traction doit répondre aux critères suivants :

- il doit pouvoir tourner et freiner dans les deux sens de rotation ;
- il doit posséder un couple important à bas régime, ainsi qu'un bon rendement.

Pour ces raisons, les constructeurs orientent, en fonction du type de véhicule fabriqué, leurs choix sur :

- le moteur série ;
- le moteur à excitation séparée ;
- le moteur synchrone.

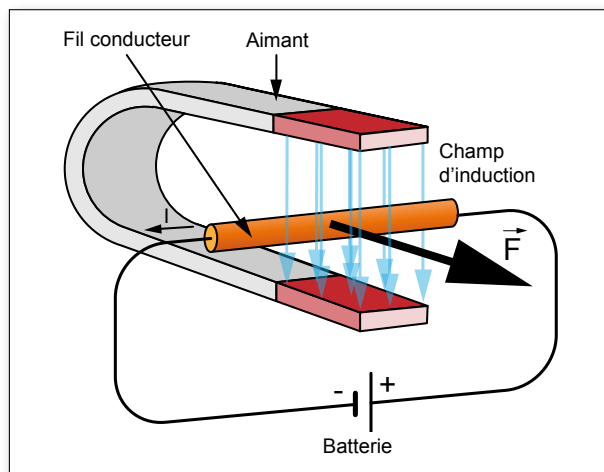
### Le principe de fonctionnement des moteurs

Lorsqu'un conducteur, parcouru par un courant, est placé dans un champ d'induction, il est soumis à une force perpendiculaire au conducteur et au champ d'induction  $F$  (loi de Laplace).

Le sens de cette force dépend du sens du courant et de celui du champ.

C'est la force électromagnétique.

- Le fil conducteur est repoussé vers l'extérieur de l'aimant.
- Si l'on inverse la polarité de la batterie, le fil est attiré vers l'intérieur de l'aimant.

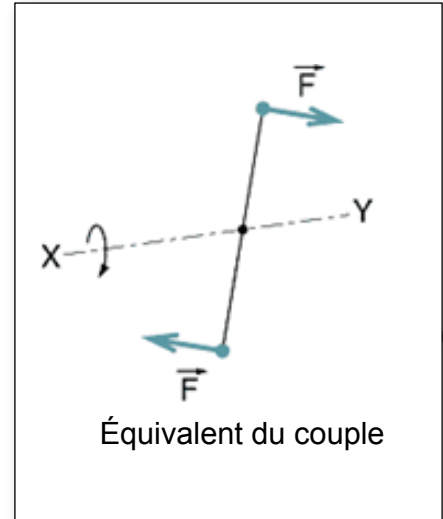
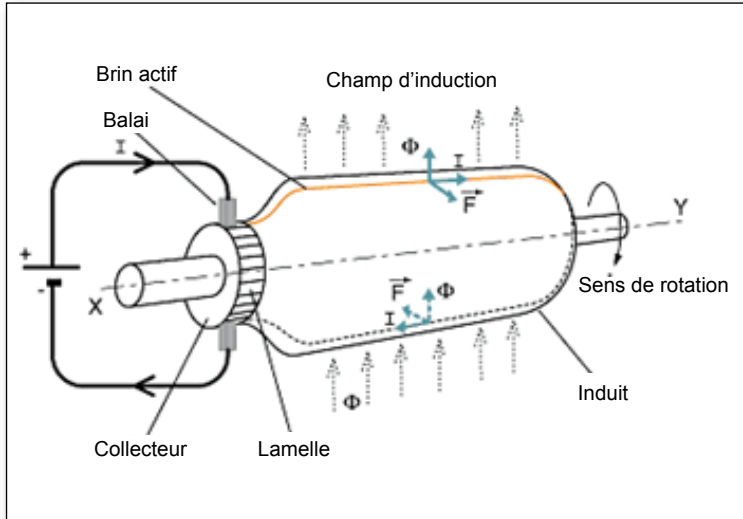


*Principe de fonctionnement des moteurs*

Ces forces d'attraction et de répulsion qu'exercent les aimants et les électro-aimants entre eux, permettent à un moteur électrique de fonctionner.

## → Construction du moteur à courant continu

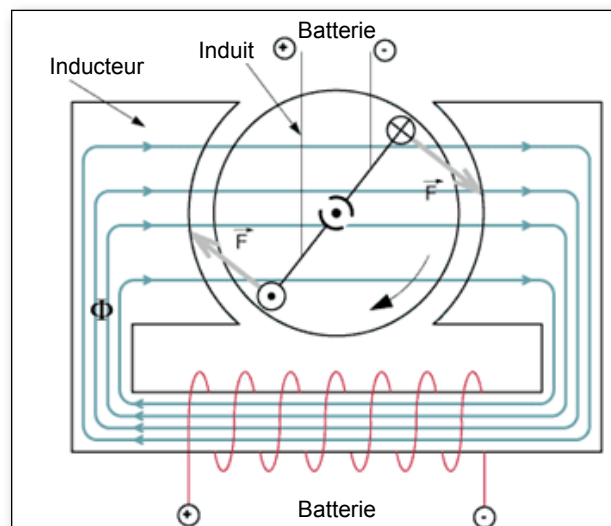
Un fil conducteur placé à la périphérie de l'induit\* est appelé brin actif. La façon de disposer les brins actifs sur l'induit va permettre de créer des forces tangentielles qui vont constituer le couple moteur.



Chaque brin actif est soudé à ses extrémités sur deux lamelles du collecteur.

Le collecteur solidaire de l'induit alimente tour à tour chaque brin actif par l'intermédiaire des balais et des lamelles. Il assure ainsi l'alimentation synchronisée de chaque brin.

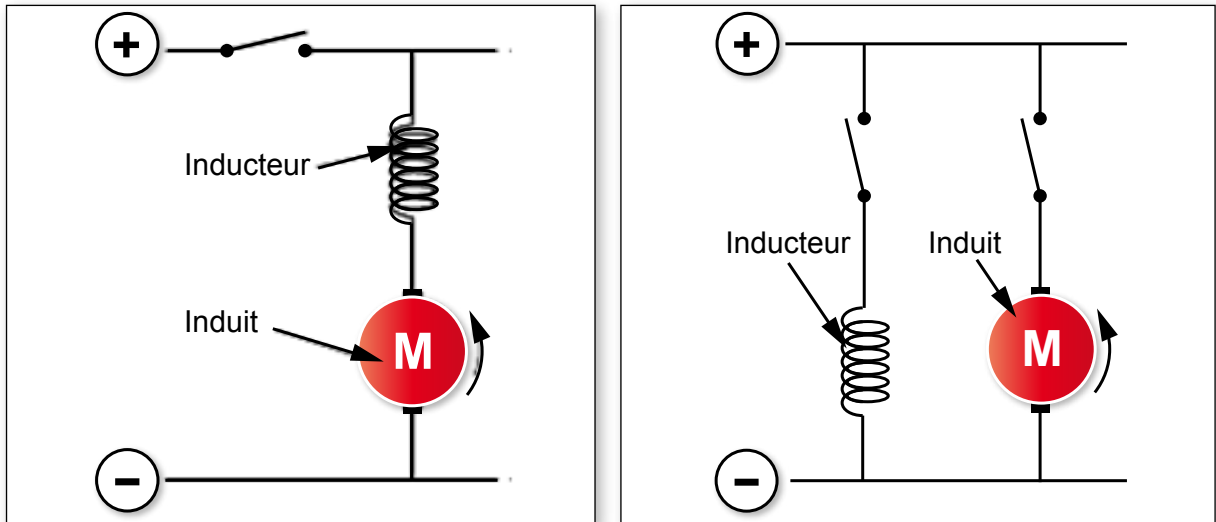
Le champ d'induction est produit par un électro-aimant fixe appelé inducteur, qui correspond à un aimant permanent.



*Assemblage Induit - Inducteur = Moteur électrique*



Pour inverser le sens de rotation, il suffit d'inverser le sens du courant dans l'induit ou dans l'inducteur. Par combinaison des connexions entre induit et inducteur, on réalise un moteur série ou un moteur à excitation séparée.



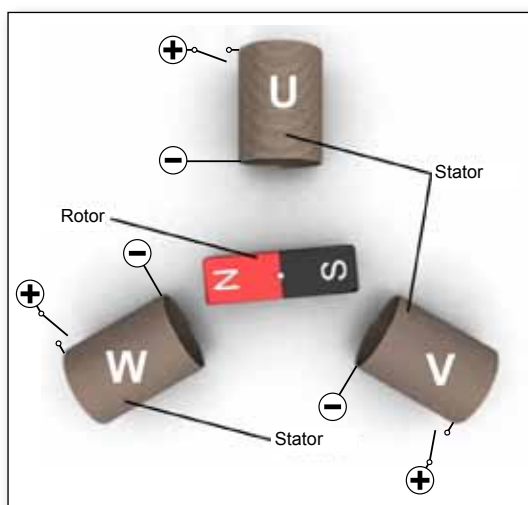
### → Principe de fonctionnement du moteur à courant alternatif SYNCHRONE

Le moteur synchrone triphasé offre le meilleur couple et le meilleur rendement parmi tous les moteurs électriques. Fait important, ce type de moteur ne requiert aucun entretien, ce qui permet d'obtenir un coût d'utilisation moindre que les moteurs à courant continu.

Le moteur synchrone se compose d'un rotor magnétique (généralement à aimant permanent) qui tourne à l'intérieur du stator, lequel comporte trois bobines déphasées de  $120^\circ$ .

L'alimentation d'une bobine crée un champ magnétique qui attire le rotor afin de l'aligner avec lui.

En alimentant successivement les trois bobines, le rotor est entraîné en rotation.



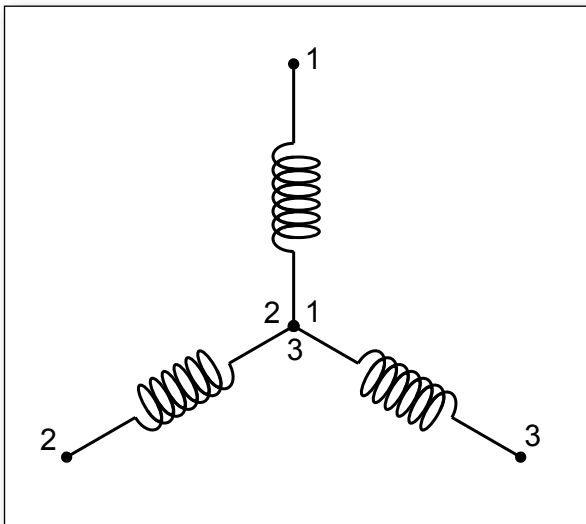
Lorsque le rotor s'est aligné avec la bobine alimentée, l'électronique de puissance inverse le courant dans celle-ci et alimente la bobine suivante. De cette manière, les bobines attirent et repoussent successivement les pôles du rotor, lui donnant ainsi le maximum de couple.

Un capteur informe en permanence l'électronique de puissance de la position du rotor par rapport aux bobines, permettant ainsi d'alimenter celles qui sont les mieux placées pour obtenir le meilleur couple.

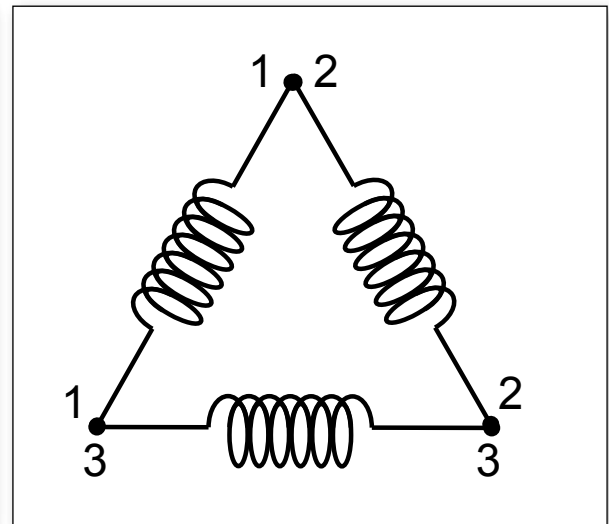
La vitesse de rotation est liée à la fréquence du courant d'alimentation et le sens de rotation est inversé en changeant l'ordre d'alimentation des bobines.

Par combinaisons des connexions, on utilise deux possibilités :

- le montage étoile ;
- le montage triangle.



Montage étoile



Montage triangle

Les moteurs synchrones équipent la majorité des véhicules fabriqués actuellement : vélos, scooters, voitures électriques et hybrides, etc.

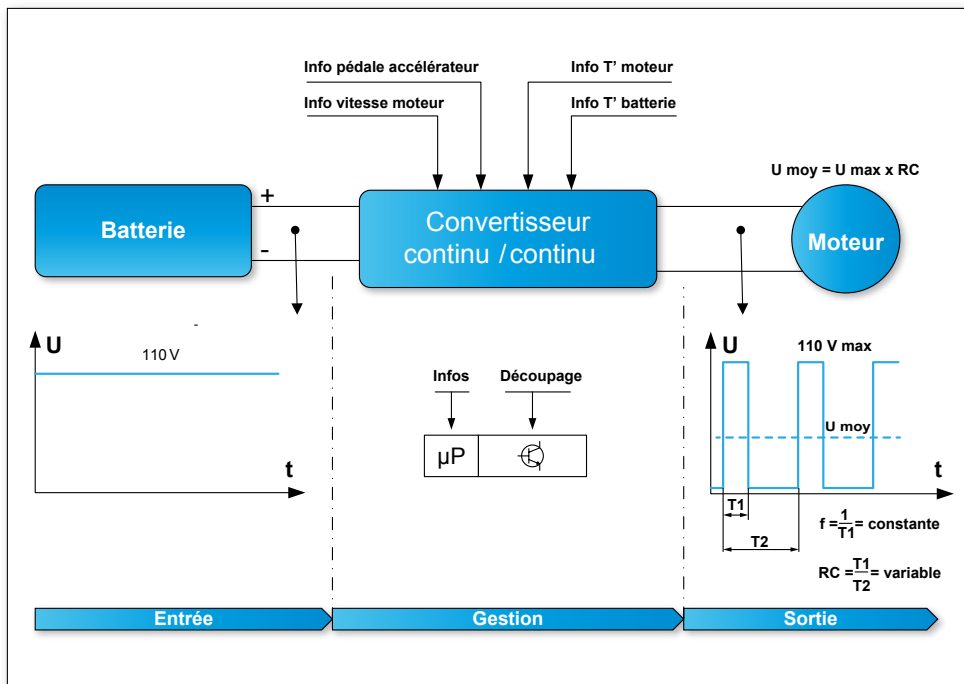
## → C. LES HACHEURS ET ONDULEURS

### → Moteur à courant continu : le hacheur

Le convertisseur électronique, encore appelé hacheur, permet de faire varier la tension aux bornes du moteur et par conséquent la vitesse de rotation. Il agit par découpage de la tension, d'où son nom de « hacheur ».

Le convertisseur PWM (Pulse Width Modulation) présente une fréquence de travail fixe. Il fait varier le rapport cyclique T1/T2, qui provoque la variation de tension (U moyen). Pour un moteur à excitation séparée, le convertisseur est composé de deux « hacheurs » qui permettent d'adapter le moteur à tous les besoins en couple et tension. Il en résulte un fonctionnement très souple et économique.

*Note : les convertisseurs sont gérés par un microprocesseur qui limite ou stoppe le fonctionnement en cas de température et d'intensité excessives.*



Principe de fonctionnement d'un hacheur de courant

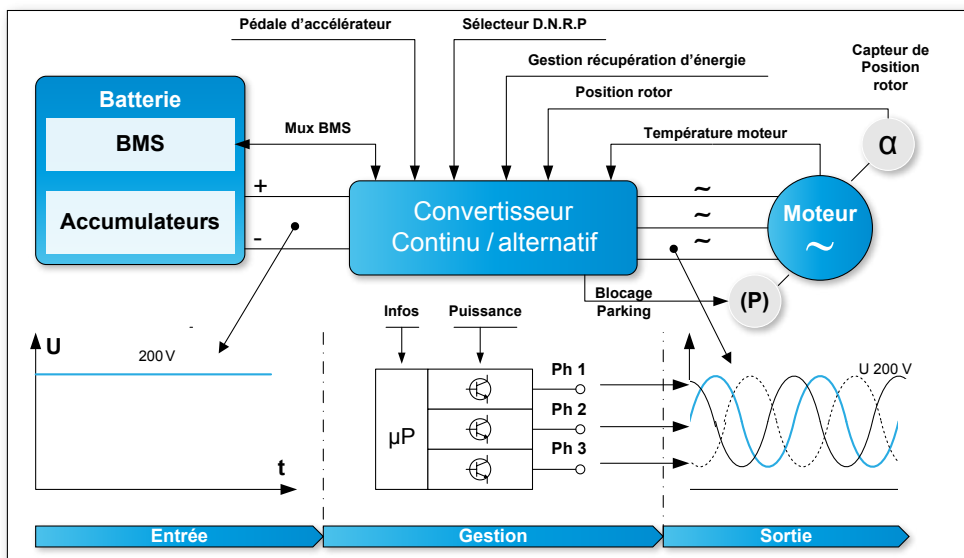
## → Moteur à courant alternatif : l'onduleur

L'onduleur est un convertisseur continu-alternatif qui permet l'alimentation des moteurs alternatifs triphasés à partir de l'énergie fournie par la batterie.

Il fait varier la fréquence qui détermine la vitesse de rotation ( $N = F/P$ ), et contrôle en permanence l'intensité qui définit le couple. Le convertisseur onduleur, en régulant couple et vitesse, maîtrise la puissance du moteur ( $P=C\omega$ ).

Lors des phases de récupération d'énergies cinétiques et potentielles, l'onduleur doit être réversible pour convertir et contrôler le courant alternatif produit par le moteur en courant continu, afin de le stocker dans la batterie haute tension.

Il reçoit de nombreux paramètres, comme la position de la pédale d'accélérateur, de la pédale de frein, la température moteur, etc. Il dialogue avec le BMS (Battery Management System) afin de connaître la puissance disponible par la batterie pour la charge comme pour la décharge, ainsi que ses besoins de réchauffage et de charge en fonction du SOC (State Of Charge).



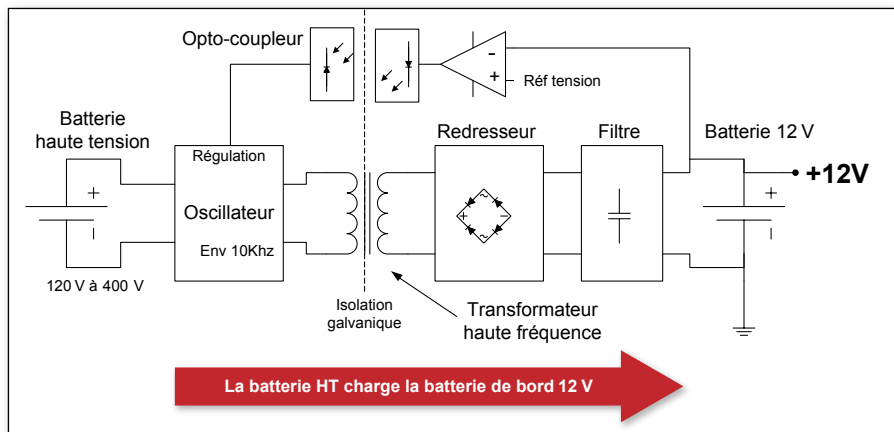
Principe de fonctionnement de l'onduleur

## → D. LES CONVERTISSEURS

Le circuit de bord d'un véhicule électrique ou hybride est identique à celui d'un véhicule thermique et doit être alimenté par une batterie de 12 V.

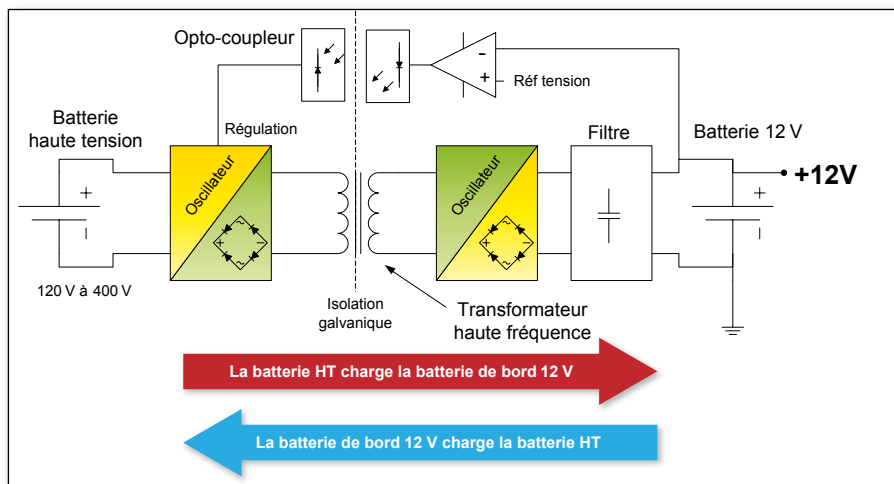
Hormis les véhicules micro-hybrides, tous les autres véhicules électriques et hybrides ne peuvent plus être équipés d'un alternateur pour charger la batterie de bord. Cette fonction est alors confiée à un convertisseur DC/DC, qui puise l'énergie électrique dans la batterie haute tension et la transforme pour charger la batterie 12 V, tout en assurant l'isolement électrique entre les deux batteries (isolation galvanique).

Le schéma synoptique ci-dessous montre le principe de fonctionnement de la plupart des convertisseurs utilisés, lesquels sont de type unidirectionnel.



*Convertisseur DC/DC unidirectionnel*

Pour tous les véhicules hybrides, l'énergie nécessaire au démarrage du moteur thermique est fournie par la batterie haute tension. Lors d'une décharge complète de cette dernière, le démarrage du moteur devient impossible. C'est pour cela que l'on rencontre aussi des convertisseurs bidirectionnels qui permettent une recharge partielle de la batterie haute tension à partir de la batterie 12 V. Il faut pour cela connecter un chargeur, pouvant fournir environ 80 A à la batterie 12 V et mettre le contact (Mercedes S400H, BMW série 7).

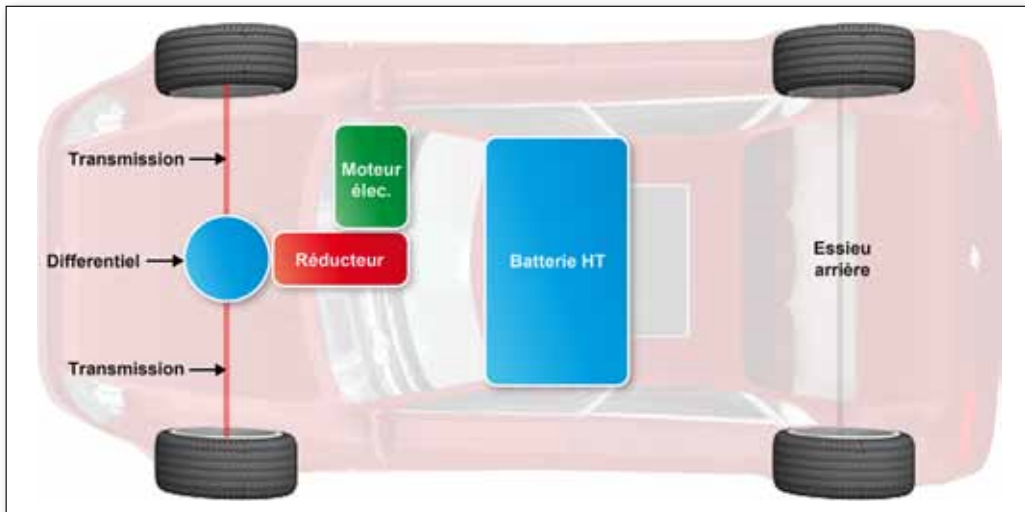


*Convertisseur DC/DC bidirectionnel*

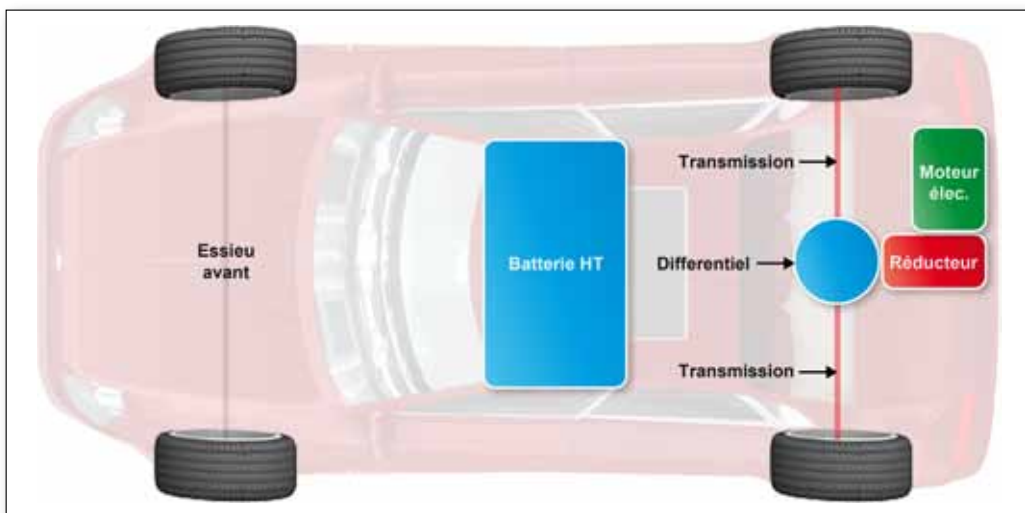
## → A. DIFFÉRENTES ORGANISATIONS

### → Motorisations

La motorisation électrique peut être implantée sur l'essieu avant, l'essieu arrière ou les deux. Elle est alors composée d'un moteur équipé d'un réducteur, généralement épicycloïdal, accouplé à un différentiel. L'ensemble est relié aux roues par l'intermédiaire de transmissions.

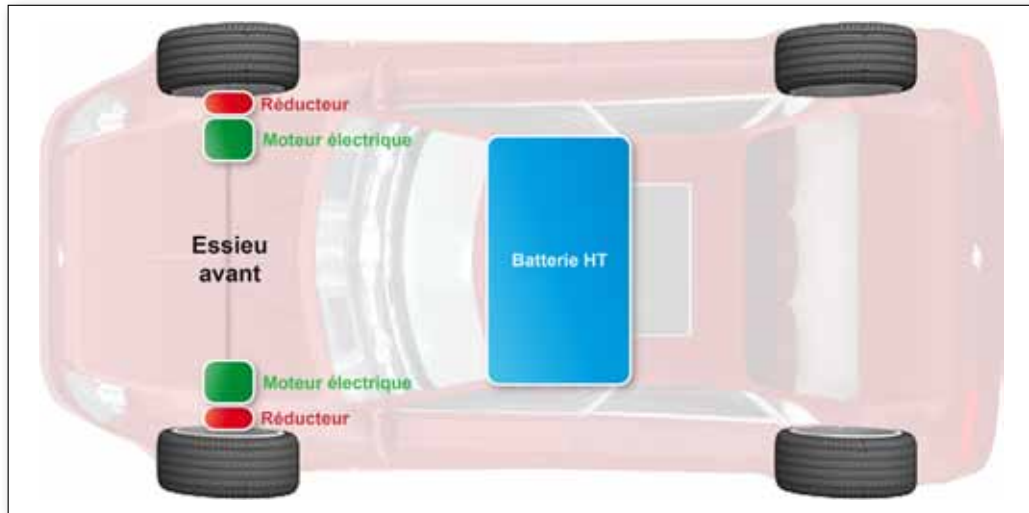


*Implantation des éléments d'un VE à traction avant*



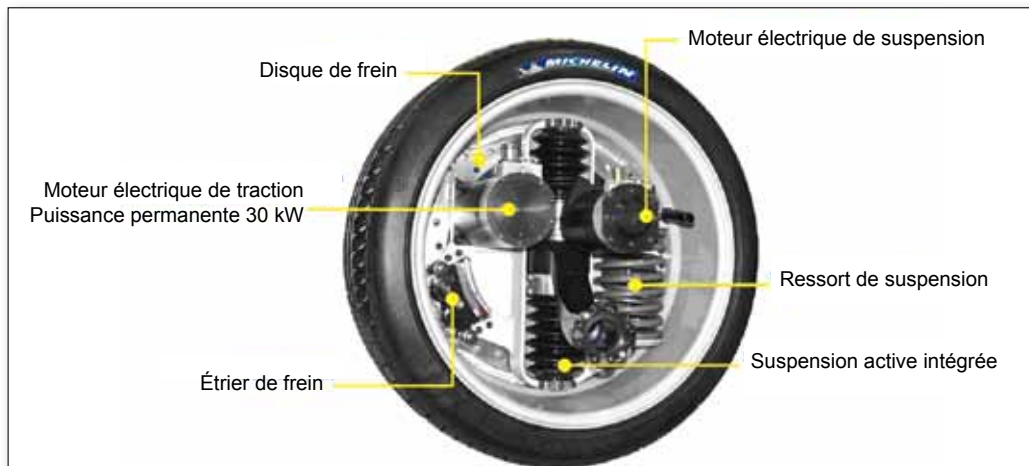
*Implantation des éléments d'un VE à propulsion*

Les moteurs peuvent être incorporés aux moyeux sur l'essieu avant, l'essieu arrière ou les deux. Cette solution présente des inconvénients, car d'une part, on augmente les masses non suspendues et d'autre part, il est nécessaire d'utiliser un convertisseur onduleur par moteur.



*Implantation des éléments d'un VE, moteur dans les moyeux*

→ Exemple de moteur incorporé au moyeu : « Active Wheel » de MICHELIN HEULLIEZ



→ Source : Michelin : [www.viamichelin.co.uk](http://www.viamichelin.co.uk)

## → Implantation de la batterie

La batterie est de préférence monobloc, car la scinder impose un BMS dans chaque pack batterie, ce qui a pour effet une augmentation non négligeable de son coût global.

La répartition des masses la positionne sous le plancher au centre du véhicule permettant ainsi de baisser le centre de gravité et lui offrant la meilleure protection lors d'une collision. Cette localisation oblige à concevoir un châssis spécifique aux véhicules électriques.

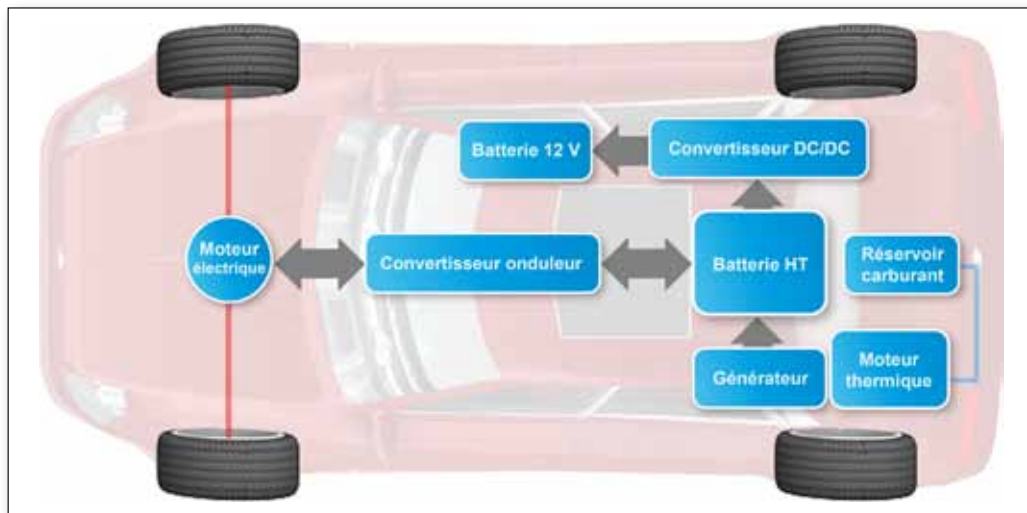
La première étape dans la réalisation d'une motorisation électrique est l'électrification de véhicules initialement thermiques. Cela impose quelques concessions et l'on rencontre des véhicules ayant la motorisation et la batterie sur l'essieu avant (ex : Berlingo avec batterie Zebra).

## → Prolongateur d'autonomie

Le principal problème du véhicule électrique est sa faible autonomie qui conduit à l'immobilisation du véhicule dès que la batterie est déchargée.

Pour réduire ce problème et permettre au véhicule de rejoindre son point de charge, un groupe électrogène peut être installé à bord du véhicule. Ce groupe est trop faible pour alimenter le moteur mais suffisant pour fournir les quelques centaines de Wh nécessaires afin de rallier un point de charge.

Ce dispositif est un prolongateur d'autonomie ; la nuance avec un hybride série réside principalement dans la différence de puissance du groupe électrogène et la taille de la batterie.



*Synoptique d'un VE avec prolongateur d'autonomie*

*(Véhicule KANGOO électrique première génération avec prolongateur d'autonomie)*

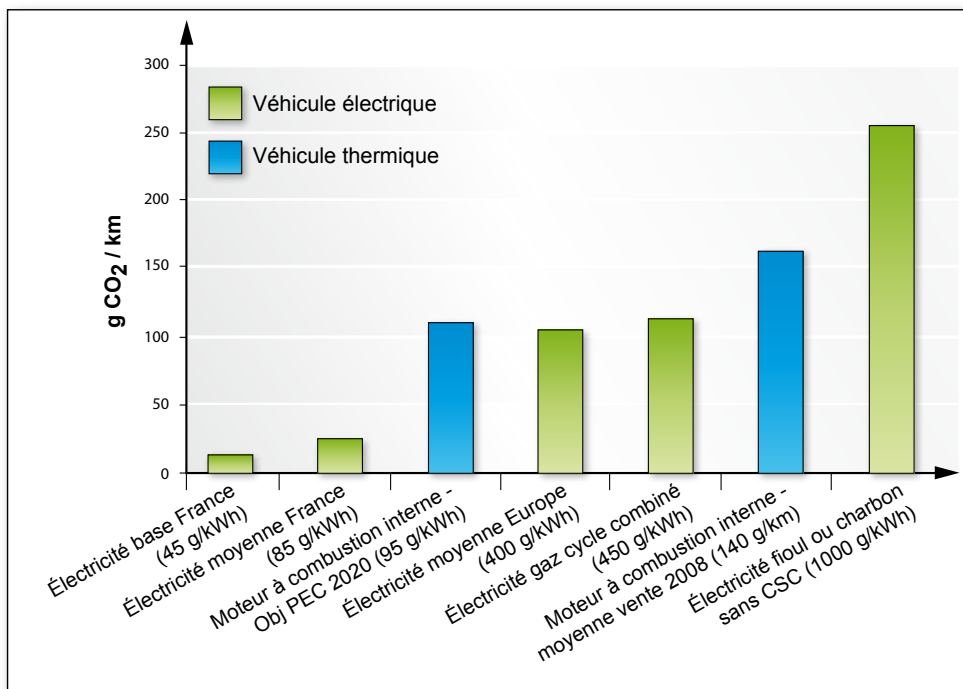
**Note :** ce dispositif augmente la masse du véhicule et donc diminue son autonomie.



## → B. ÉMISSION DE CO<sub>2</sub>

Dans l'objectif de réduction des GES (Gaz à Effet de Serre), l'utilisation de véhicules électriques n'apporte de gains importants que si l'énergie utilisée à la production de l'électricité est faible en CO<sub>2</sub>, ce qui est le cas en France et en Norvège.

Selon EDF et l'ADEME, les émissions de CO<sub>2</sub> pour un véhicule électrique utilisé dans l'hexagone se situent entre 10 et 19 g/km du puits à la roue.



Émissions de CO<sub>2</sub> du puits à la roue, des véhicules électriques et thermiques

→ Source : ADEME

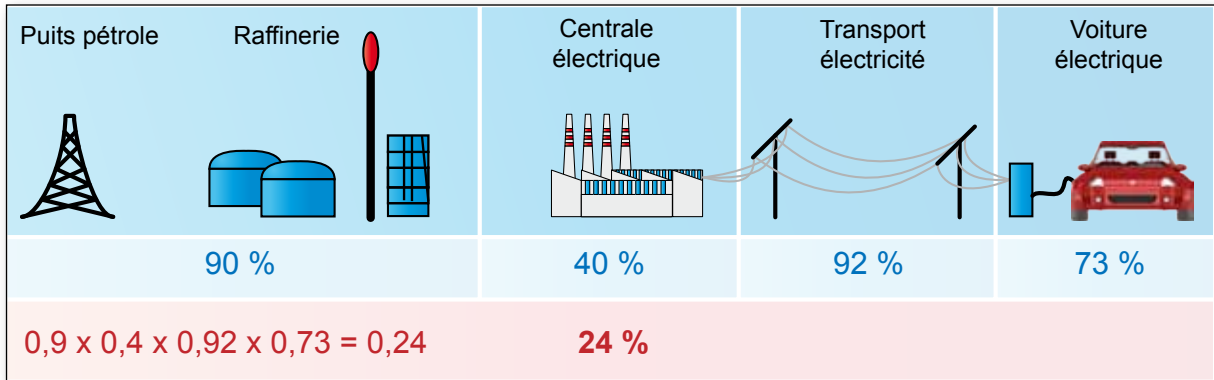
**PEC** : Politique Énergétique Commune

En dehors des pays qui ont choisi une énergie électrique décarbonée, nucléaire ou hydroélectrique, rouler « électrique » ne réduit pas de façon significative les rejets de CO<sub>2</sub>. Cependant, cela permet de centraliser ces rejets en un seul point, hors des villes, permettant ainsi d'envisager le CSC (Captage et Stockage du Carbone). On distingue de multiples méthodes de captage du CO<sub>2</sub> aux sorties des centrales ainsi que divers possibilités de stockage à l'étude. Toutefois, ces méthodes engendrent une surconsommation d'environ 10 % de la centrale, ce qui ne va pas dans le sens de la réduction d'énergie.

# 5 — [ LES VÉHICULES ÉLECTRIQUES ]

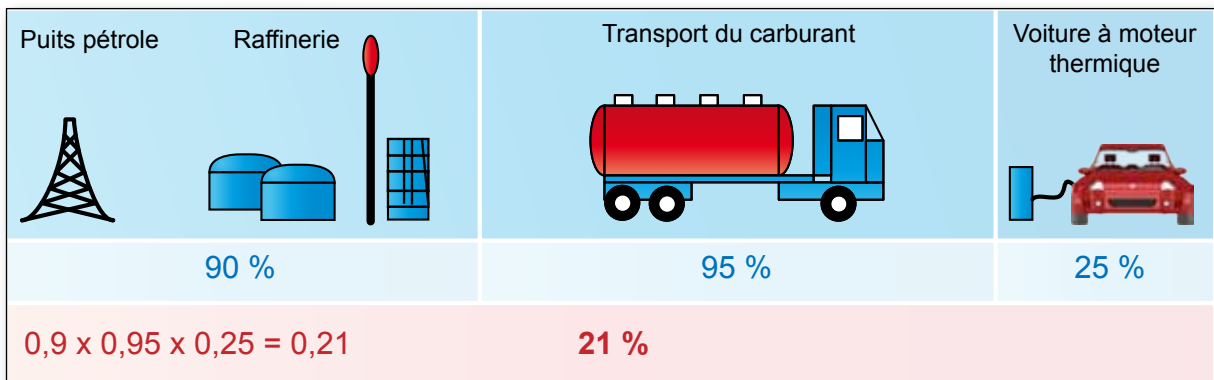
## → C. RENDEMENT GLOBAL

L'analyse du rendement global permet la comparaison énergétique entre les différents modes de traction. Les valeurs retenues sont indicatives et optimistes. Elles proviennent du recoupement de multiples sources, mais permettent une compréhension des besoins énergétiques globaux pour chaque mode de traction.



*Rendement global du puits à la roue pour un véhicule électrique*

Qu'elle soit fossile ou nucléaire, l'énergie primaire ne change pas le rendement global car ces énergies sont converties dans des centrales thermiques ayant les mêmes rendements.



*Rendement global du puits à la roue pour un véhicule thermique*

La comparaison des rendements globaux des véhicules thermiques et électriques ne montre pas un large avantage pour la traction électrique (24 - 21 = 3 %). Toutefois, l'utilisation de cette énergie a de multiples origines : solaire, éolien, hydroélectrique, etc. Utiliser cette énergie nous permettrait donc de réduire notre dépendance au pétrole.

**Note :** une éolienne actuelle d'un diamètre de 112 mètres de diamètre (4.5 MW) peut charger plus de 1000 voitures simultanément.

## → D. SYSTÈMES DE CHARGES

### → Principe de charge et temps

La capacité de charge d'une batterie définit l'intensité maximale et le temps de charge par rapport à sa capacité. Le tableau ci-dessous définit le temps et l'intensité pour une batterie de 100 Ah ayant une capacité de charge C0.1

	C	0.1
	Capacité de la batterie en Ah	Coefficient de charge
Intensité (A) =	C x 0.1	10 A
Temps (h) =	1 / 0.1	10 h

### → Quatre méthodes de charge

On distingue plusieurs méthodes pour assurer la recharge des batteries de traction :

- charge lente ;
- charge rapide ;
- remplacement du pack batterie ;
- charge par induction.

### → Charge lente

La charge lente consiste à recharger une batterie à partir d'une prise 240 V 16 A. Le chargeur est embarqué et dialogue avec le BMS afin de contrôler la charge. Le temps de charge dépend de la capacité énergétique de la batterie (en kWh) et de la puissance de charge (en kW). Le BMS peut aussi dialoguer avec la borne de rechargement.

#### Exemple :

Déterminons le temps pour une charge complète d'une Peugeot Lion dont la batterie a une capacité énergétique de 16 kWh.

Puissance de charge :  $240 \text{ V} \times 16 \text{ A} = 3840 \text{ W}$  soit 3.84 kW

Temps de charge :  $16 \text{ kWh} / 3.84 \text{ kW} = 4.2 \text{ h}$

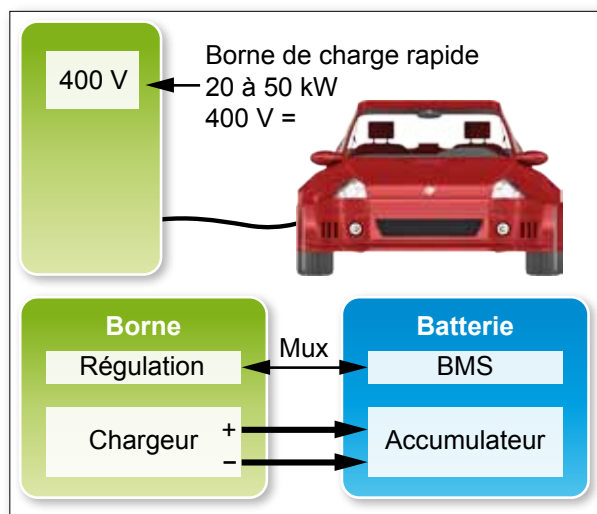
*Ce temps est théorique et doit être majoré de 10 % pour tenir compte des pertes, soit environ 5 heures pour notre exemple.*

Un connecteur, charge lente, derrière une trappe « essence » permet le raccordement d'un câble spécifique à une prise secteur.

## → Charge rapide

Les batteries modernes lithium ne souffrent pas de l'effet mémoire et permettent une capacité de charge C 2. Elles peuvent donc être chargées à 80 % en l'espace de 30 minutes (une charge complète n'étant pas possible en charge rapide) ou recevoir des charges partielles de quelques minutes permettant de prolonger leur autonomie. Toutefois, la succession de charges rapides réduit la longévité de la batterie de quelques pourcents.

Deux types de technologie sont possibles pour effectuer une charge rapide : d'une part, utiliser un chargeur de forte puissance installé dans une borne et dialoguant avec le BMS ou, d'autre part, alimenter en courant alternatif triphasé le convertisseur du moteur qui a déjà toute la technologie nécessaire pour cela ( *dans les phases de récupération, le moteur agit comme un alternateur*).



*Système de charge rapide courant continu*

Un chargeur d'une puissance de 20 à 50 kW est incorporé à une borne de rechargement rapide. Cette borne est reliée au véhicule par un connecteur de puissance YASAKI pouvant fournir 400 V-125 A (50 kW). Une liaison multiplexée entre le BMS et la régulation du chargeur permet d'adapter la puissance de charge aux besoins de la batterie.

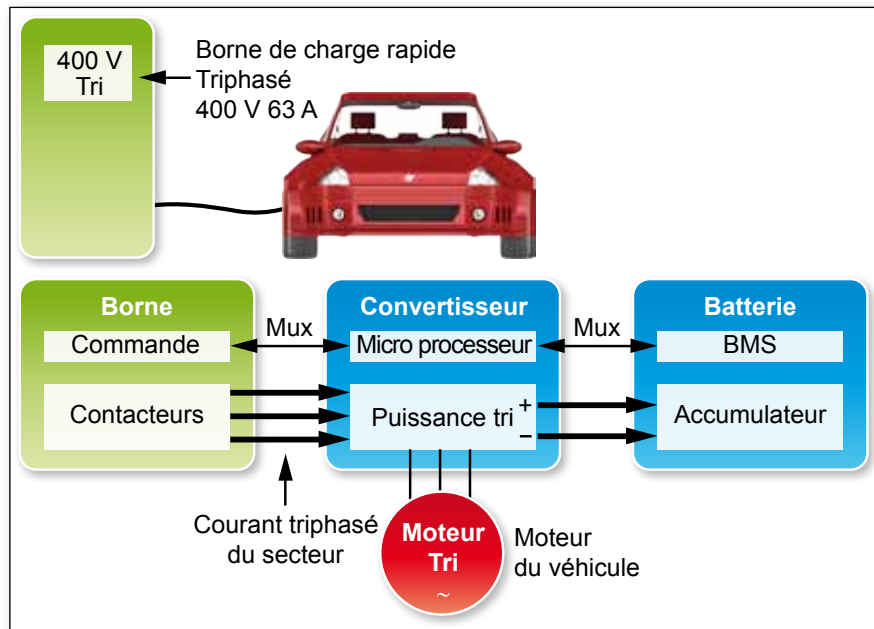
Ce système d'origine japonaise est le fruit du travail de nombreux équipementiers, constructeurs et fournisseurs d'énergie pour définir une standardisation qui a été baptisée CHAdeMO. (*Chademo signifie Charge & Move*). Les véhicules PCA (Peugeot Citroën Automobile) utilisent ce système.

Pour en savoir plus :

Site de l'association : [www.chademo.com](http://www.chademo.com)

Constructeur français de chargeurs : [www.sgte-power.com](http://www.sgte-power.com)

Le système de charge à courant continu requiert des bornes contenant un chargeur de haute puissance, lesquelles bornes sont coûteuses. Afin de permettre une utilisation des véhicules sans contrainte d'autonomie, il est nécessaire de les multiplier, ce qui entraîne des coûts d'infrastructures importants.



Une autre solution consiste à utiliser l'électronique de puissance du moteur électrique de traction afin de redresser et de contrôler le courant de charge fourni par le réseau de distribution électrique triphasé. La borne de charge n'a plus, alors, que des fonctions de sécurisation.

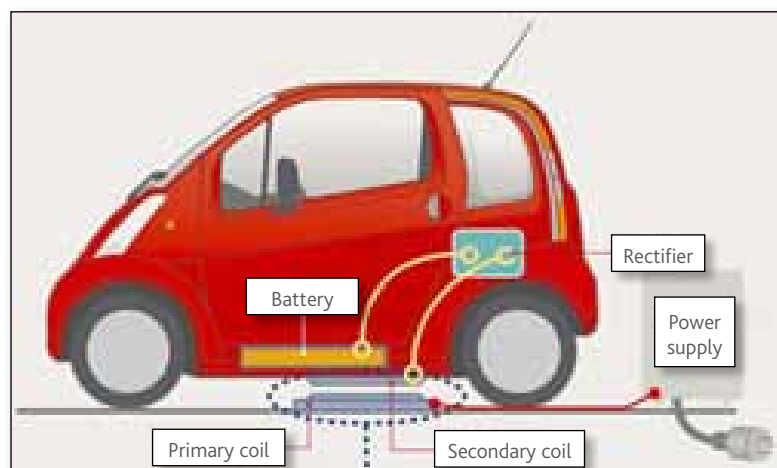
## → Échange pack

Le remplacement du pack batterie déchargé par un autre prêt à l'emploi permet des temps de ravitaillement très courts, limités à la seule durée de maintenance. Ce principe est utilisé pour le ravitaillement de certains bus et permet un service continu.

Renault propose le système QUICK-DROP qui remplace de façon complètement automatisée la batterie en trois minutes dans une station de ravitaillement.

## → Charge par induction

Ce principe de charge supprime toute connexion entre le véhicule et le réseau électrique. Une plaque à induction est installée sur une place de parking réservée au véhicule électrique. Lorsqu'un véhicule y stationne, le capteur d'énergie placé sous le véhicule capte l'induction et la transforme en courant afin de recharger la batterie.



→ Source : [www.avem.fr](http://www.avem.fr)

## → Les prises utilisées

Actuellement, il n'y a pas de prises normalisées. Trois groupes se disputent le marché et proposent leurs connecteurs :

- CHAdeMO
- EV PLUG ALLIANCE
- SIEMENS

L'importation des véhicules Mitsubishi par PCA permet au groupe CHAdeMO, qui utilise les connecteurs YASAKI, d'être précurseur en la matière.



Prise côté borne LEGRAND



Prise côté borne SCHNEIDER



Connecteurs côté véhicule 300 V 30 A courant alternatif YASAKI



Connecteur côté véhicule 500 V 120 A courant continu YASAKI

Pour en savoir plus :

[www.evplugalliance.org](http://www.evplugalliance.org)

[www.chademo.com](http://www.chademo.com)

[www.yasaki-na.com](http://www.yasaki-na.com)

## → La réglementation

Les pouvoirs publics préconisent que 90 % des bornes soient installées au domicile ou sur le lieu de travail du possesseur de véhicule électrique afin d'assurer la rapidité de recharge.

Dès 2012, toute construction de bureaux, d'habitations, de commerces, d'entrepôts... avec parkings, devra disposer de bornes de recharge. Dans les habitations collectives préexistantes, tout occupant pourra faire valoir son « droit à la prise » et obliger la copropriété à respecter la loi.

# 6 — [ LES VÉHICULES HYBRIDES ]

## → A. MICRO HYBRIDE

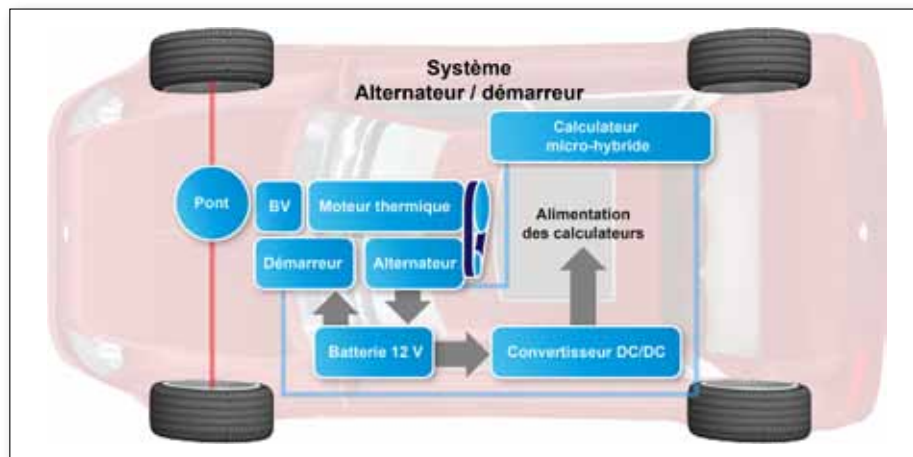
Le micro-hybride est le premier niveau d'hybridation qui consiste à automatiser la coupure et le redémarrage du moteur thermique lors des arrêts. Ce dispositif réduit la consommation et les rejets de CO<sub>2</sub> en évitant que le moteur ne tourne au ralenti inutilement.

Lors d'un arrêt, le calculateur de gestion coupe le moteur et le redémarre lorsque le conducteur appuie sur la pédale d'accélérateur.

Le calculateur gère aussi le débit de l'alternateur afin qu'il ne charge que dans les phases de décélération du véhicule. Cela permet d'utiliser l'énergie cinétique plutôt que celle produite par le moteur thermique ce qui réduit, là aussi, la consommation et les rejets de CO<sub>2</sub>. *Ce dispositif particulier de gestion de charge n'est pas spécifique au micro-hybride et se généralise à d'autres types de véhicules.*

Deux technologies de redémarrage coexistent :

- Démarreur
- Alternodémarrageur



*Redémarrage par démarreur*

Le redémarrage est commandé par le calculateur micro-hybride qui actionne le démarreur. Il s'agit d'un modèle renforcé pour endurer de fortes sollicitations.

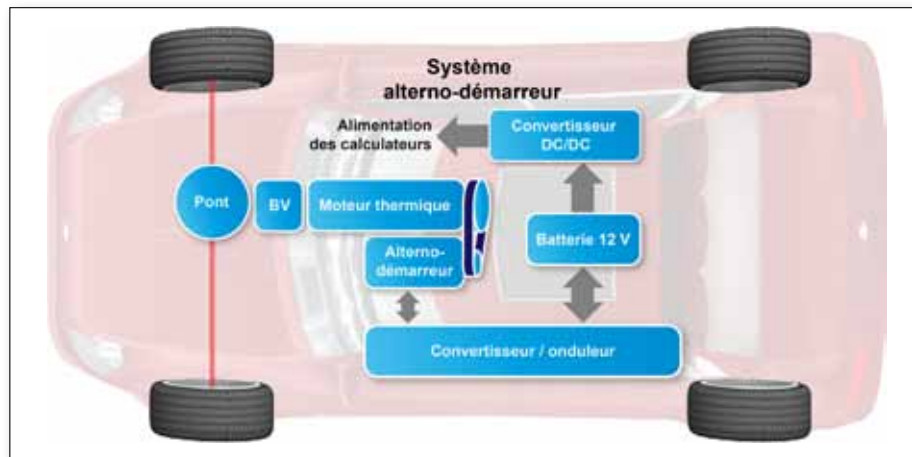
Après le démarrage du moteur, l'alternateur est piloté afin d'optimiser la consommation.

**Note :** *le calculateur micro-hybride est généralement constitué de plusieurs calculateurs reliés entre eux par le réseau multiplexé : gestion moteur, gestion d'énergie, gestion sécurité, etc.*

## → Redémarrage par alerno-démarrreur

Le redémarrage est assuré par l'alternateur qui est utilisé en moteur synchrone, lequel est alimenté par un onduleur triphasé (*électronique de puissance transformant le courant continu en alternatif*).

L'alerno-démarrreur démarre le moteur par l'intermédiaire de la courroie d'accessoires. Il faut que celle-ci soit un modèle renforcé et que le tendeur puisse supporter les efforts supplémentaires. En effet, le côté battant de la courroie devient côté tendu lors du démarrage.



*Redémarrage par alerno-démarrreur*

Après le démarrage, l'alerno-démarrreur devient générateur et fournit un courant alternatif triphasé qui est redressé par l'onduleur / redresseur. Le courant de charge est piloté afin, là aussi, d'optimiser la consommation.

## → Gestion d'énergie

L'objectif est, autant que possible, la récupération de l'énergie cinétique perdue afin de fournir l'alimentation électrique au système de démarrage et au circuit de bord sans pénaliser la consommation.

Pour atteindre cet objectif, il faut d'une part, pouvoir piloter l'alternateur et d'autre part, connaître en permanence :

- L'état de charge de la batterie, car si cet état est trop faible, il pourra compromettre le redémarrage du moteur et, s'il est trop élevé, ne permettra plus de récupérer l'énergie cinétique.
- La consommation électrique des accessoires (et, si besoin est, avoir la possibilité d'en délester).
- Les caractéristiques de la batterie ainsi que son vieillissement.

Tous ces paramètres sont gérés par le calculateur de gestion d'énergie.

## → Gestion moteur

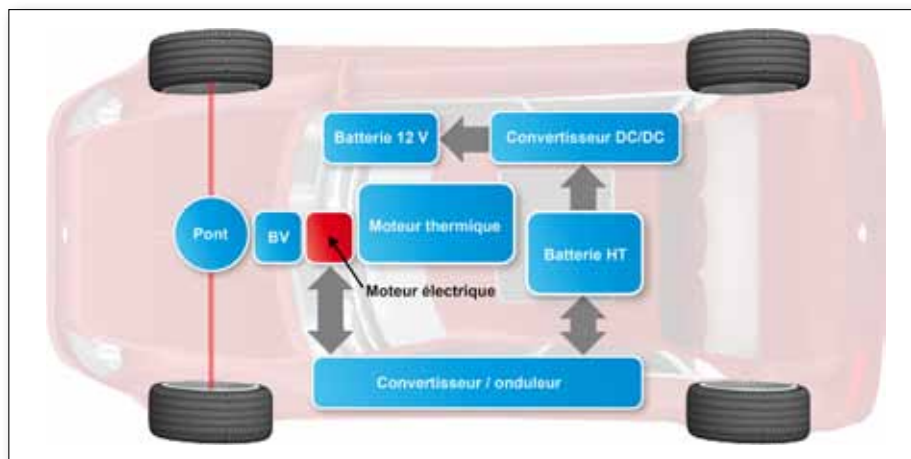
Le redémarrage du moteur doit être le plus rapide possible. Pour ce faire, le calculateur de gestion moteur mémorise la position du vilebrequin lors de l'arrêt du moteur grâce à un capteur spécifique. La remise en route se fait dès cette position. De ce fait, le temps du redémarrage s'en trouve réduit (0.4 à 0.6 seconde selon les constructeurs).



## → B. HYBRIDE PARALLÈLE

Les véhicules hybrides parallèles sont des véhicules ayant une chaîne de traction thermique classique, sur laquelle un moteur électrique a été rajouté. Ce moteur, triphasé, est généralement placé sur le volant moteur entre la boîte de vitesses et le moteur.

Comme tous les véhicules hybrides non rechargeables, l'énergie nécessaire au déplacement du véhicule provient exclusivement du moteur thermique, le moteur électrique n'étant là que pour optimiser son fonctionnement.



*Synoptique d'un véhicule hybride parallèle*

### → Caractéristiques

- Puissance du moteur : environ 15 kW.
- Caractéristiques de la batterie HT : 120 V à 144 V, 6 à 7 Ah Li-ion ou Ni-Mh.
- Réduction de consommation : < 20 %.
- Mild hybride.

### → Fonctionnement

- Le moteur électrique assure le démarrage du moteur thermique.
- Le moteur électrique assiste le moteur thermique lors de fortes accélérations (Boost). Cela permet de réduire la taille du moteur thermique sans altérer les performances du véhicule, tout en améliorant la consommation.
- Lors des arrêts momentanés, le moteur est stoppé : fonction « stop and start ».
- Durant le freinage, le moteur devient générateur et recharge la batterie HT.

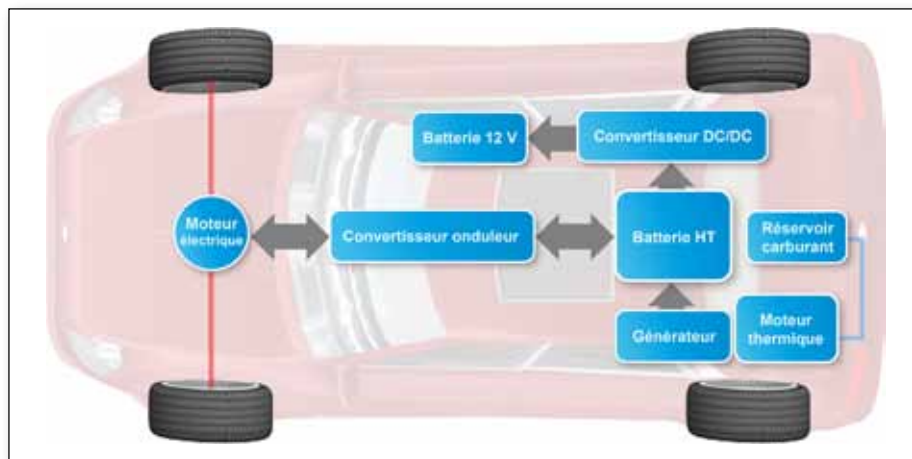
### → Applications

Mercedes S400H, BMW série 7 hybride, Honda CIVIC et INSIDE.

## → C. HYBRIDE SÉRIE

Un véhicule hybride série peut être vu comme un véhicule électrique dont la batterie est rechargée par un groupe électrogène capable de fournir toute l'énergie nécessaire à son déplacement.

Le moteur thermique est intégralement dissocié de la transmission et ne fournit que l'énergie moyenne absorbée par le moteur électrique. Cela lui permet de fonctionner dans des conditions optimales de rendement.



*Synoptique d'un véhicule Hybride série*

### → Caractéristiques

- Puissance du moteur électrique : 115 kW.
- Caractéristiques de la batterie : 360 V-16 kWh Li-ion.
- Puissance du moteur thermique et générateur : 55 kW.
- Consommation annoncée : 2 l aux 100 km.
- Full hybride rechargeable.

### → Fonctionnement

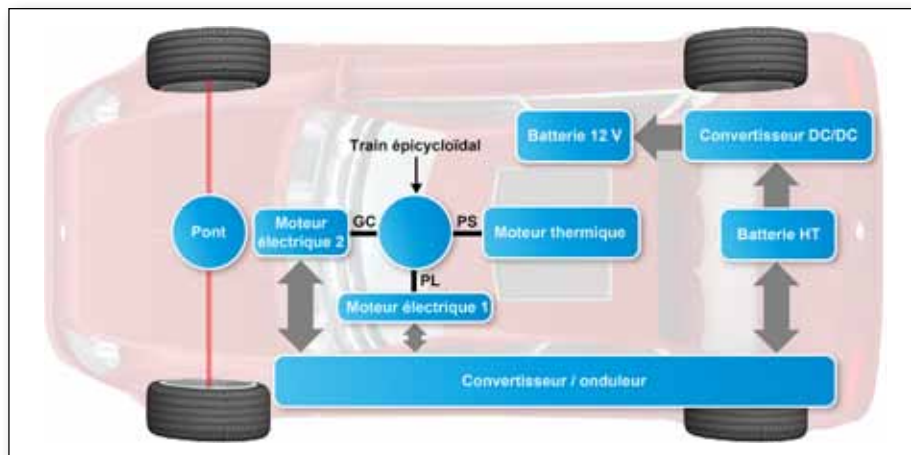
- Tant que la batterie le permet, le véhicule ne fonctionne qu'en mode électrique avec une autonomie d'environ 60 km.
- En dessous d'un certain niveau de charge, le moteur thermique démarre et fournit l'énergie moyenne nécessaire.
- Lors des accélérations, le moteur électrique est alimenté par la batterie et le groupe électrogène.
- En faible charge, le groupe électrogène fournit plus d'énergie que n'en consomme le moteur et la batterie se recharge.
- Lorsque le niveau de charge est repassé au-dessus d'un certain seuil, le groupe électrogène est arrêté car son but n'est pas de recharger complètement la batterie.

### → Application

Chevrolet VOLT, Opel AMPERA.

## → D. HYBRIDE SÉRIE / PARALLÈLE

L'hybridation série / parallèle permet de cumuler les avantages du mode série et du mode parallèle au prix d'une plus grande complexité technologique. Elle est constituée d'un moteur thermique et de deux moteurs électriques. Chacun des moteurs est en liaison avec une entrée / sortie d'un train épicycloïdal. L'ensemble constitue une boîte CVT (transmission à variation continue) électrique.



*Synoptique d'un véhicule hybride série / parallèle*

### → Caractéristiques

- Batterie Ni-MH : 200 à 312 V, 6 à 7 Ah.
- Moteurs électriques : 20 à 123 kW.
- Full hybride.

### → Fonctionnement

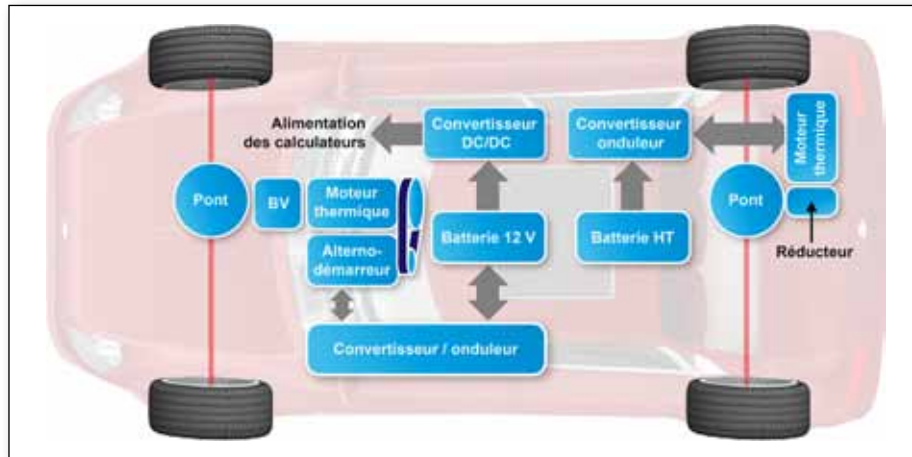
- En mode électrique seul, le moteur électrique 2 (MG2) est alimenté. Le moteur thermique est arrêté et le moteur électrique 1 (MG1) tourne dans le vide.
- Le démarrage du moteur thermique est effectué par MG1 qui est relié au planétaire, ce qui entraîne le porte-satellite en prenant appui sur la grande couronne.
- Le transfert de la puissance du moteur thermique vers MG2 et, par extension, vers les roues, s'effectue en freinant par MG1 (MG1 générateur). L'énergie fournie par MG1 est envoyée vers MG2.
- Lors d'un freinage, le moteur MG2 devient générateur et recharge la batterie HT.
- Le moteur thermique peut aussi recharger la batterie HT par l'entraînement de MG1 en prenant appui sur la grande couronne (MG2).
- Dans les fortes descentes, une fois la batterie HT rechargée par MG2, le moteur MG2 n'offre plus de frein moteur. Son énergie est alors envoyée sur MG1 qui entraîne le moteur thermique et offre un frein moteur similaire à un véhicule thermique.

### → Application

TOYOTA Prius, Auris, LEXUS RX400H et autres, MERCEDES ML, BMW 6, etc.

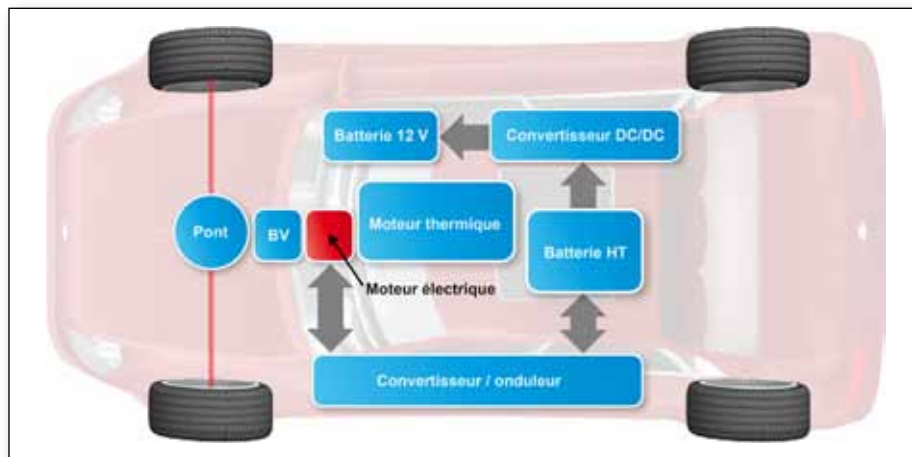
## → Autres configurations

De multiples configurations sont possibles. L'exemple ci-dessous montre le synoptique d'un véhicule en configuration micro-hybride sur l'essieu avant et transmission électrique sur l'essieu arrière. L'association de ces deux techniques constitue un véhicule full hybride dans la mesure où ce véhicule peut utiliser soit le moteur thermique, soit le moteur électrique, ou les deux ensemble.



*Synoptique full hybride sur train arrière*

Cette configuration permet l'hybridation d'un véhicule déjà existant par le simple ajout d'une motorisation sur l'essieu arrière, ce qui, de surcroît, le transforme en quatre roues motrices.



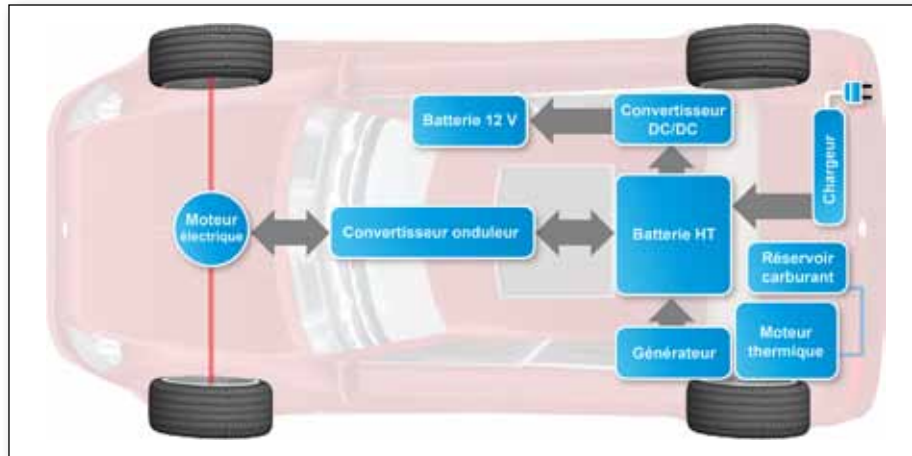
*Synoptique d'un véhicule full hybride (parallèle)*

Autre configuration, un véhicule hybride parallèle sur lequel un embrayage ou une roue libre a été inséré entre le moteur thermique et le moteur électrique devient un véhicule full hybride car il a la possibilité de rouler en électrique seul. À l'instar du PORSCHE CAYENNE hybride.

Bien d'autres configurations sont possibles et l'avenir est prometteur d'innovations.

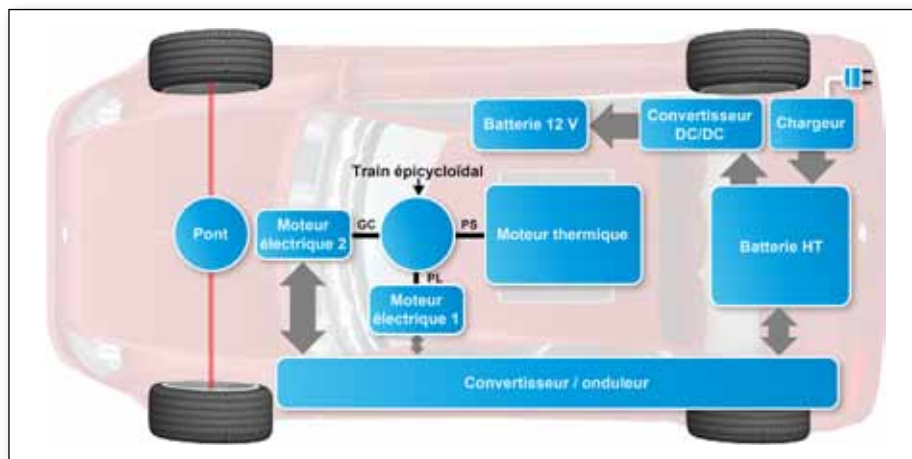
## → E. HYBRIDE RECHARGEABLE

Dans l'objectif de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, toute distance parcourue grâce à une énergie décarbonnée est positive. Dans cet esprit, en augmentant la capacité énergétique de la batterie haute tension, on augmente l'autonomie en tout électrique des véhicules full hybride.



Synoptique OPEL AMPERA, CHEVROLET VOLT

La batterie haute tension n'est plus seulement rechargée par la récupération des énergies cinétiques et potentielles, mais aussi par le courant secteur, tel un véhicule électrique.

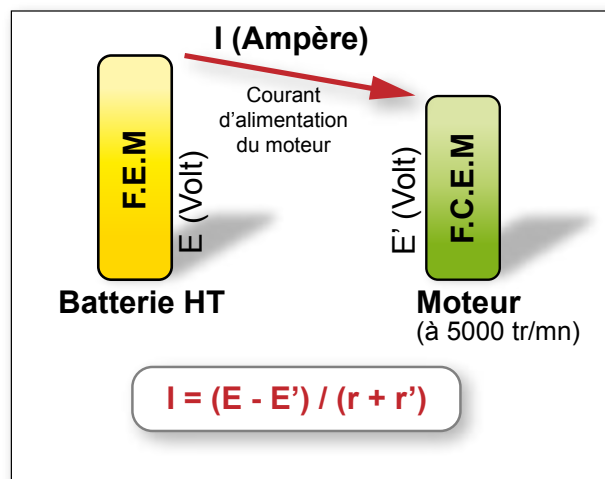


Synoptique PRIUS III Plug in

Par ce principe, la PRIUS III plug-in a reçu une nouvelle batterie de type Li-Ion d'une plus forte capacité en remplacement de la NI-Mh, ce qui lui permet de passer d'une autonomie de 2 km à 20 km en tout électrique.

## → A. PRINCIPE DE LA RÉGÉNÉRATION

Le principe de la régénération, (ou récupération d'énergie), semble simple de prime abord. Le moteur, entraîné par l'énergie du véhicule, devient générateur et fournit le courant permettant la recharge de la batterie haute tension. Seulement, il faut prendre en compte la F.E.M (Force ElectroMotrice) de la batterie et la F.C.E.M (Force Contre-ElectroMotrice) du moteur qui s'inverse lorsque le moteur devient générateur et la batterie réceptrice.



*Circulation du courant en phase moteur*

Afin que le moteur soit alimenté en courant pour fournir un couple, il faut que la F.E.M de la batterie soit supérieure à la F.C.E.M du moteur, l'intensité étant proportionnelle à la différence de ces deux potentiels.

La F.E.M de la batterie reste théoriquement fixe, et ce, quel que soit le courant et le S.O.C.

La F.C.E.M du moteur reste proportionnelle à sa vitesse de rotation.

Le diagramme ci-dessus montre que le moteur a toujours une F.C.E.M inférieure à la F.E.M de la batterie, ce qui rend impossible la régénération. Pour régénérer, il faut que la F.C.E.M du moteur soit plus importante que la F.E.M de la batterie, et ce, afin que le courant s'inverse et ainsi recharge la batterie.

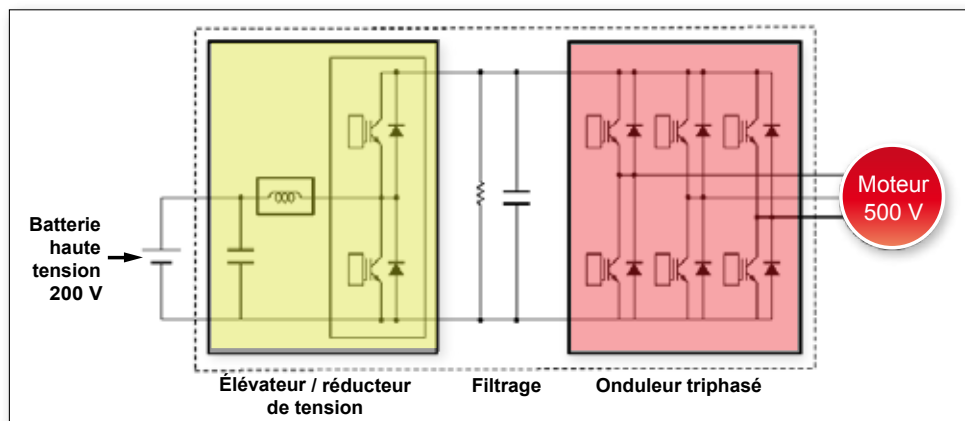
**Note :** en régénération, la F.C.E.M du moteur devient une F.E.M et la F.E.M de la batterie devient une F.C.E.M.

On distingue plusieurs méthodes pour permettre la régénération :

- **Variation du champ inducteur :**

- Pour une même vitesse de rotation du moteur, on peut augmenter la F.C.E.M en augmentant le flux inducteur ( $\Phi$ ), de la même manière que l'on commande un alternateur de charge conventionnel. ( $E = k P n N \Phi$ )
- Ce système a pour avantage une grande facilité du contrôle de la régénération du moteur, au détriment du rendement global car le circuit d'excitation d'un moteur de traction peut atteindre une consommation d'un kilowatt. De plus, comme pour un alternateur classique, il faut un jeu de balais pour alimenter le rotor, ce qui impose une maintenance.
- Cette méthode est utilisée pour la BOLLORÉ BLUE CAR et la KANGOO RENAULT première génération.

- **Répartition de la plage de régime :**
  - Basse vitesse de rotation, la F.C.E.M du moteur est inférieure à la F.E.M de la batterie. Fonctionnement en moteur afin d'assister le moteur thermique.
  - Grande vitesse de rotation, la F.C.E.M du moteur est supérieure à la F.E.M de la batterie. La F.C.E.M devient F.E.M et F.E.M devient F.C.E.M : la régénération est alors possible.
- **Utilisation d'un moteur haute tension :**
  - Cette méthode consiste à utiliser un moteur ayant une F.C.E.M beaucoup plus importante que la F.E.M de la batterie (ex : PRIUS moteur de 500 V pour batterie 201.6 V).
  - Il n'y a pas de circuit d'excitation car le rotor est à aimant permanent : meilleur rendement.
  - Le convertisseur / onduleur dispose d'un élévateur de tension afin d'élever le potentiel de la batterie pour alimenter le moteur.
  - Le convertisseur / onduleur dispose d'un réducteur de tension afin de réduire la tension du moteur dans les phases de régénération pour l'adapter à celle de la batterie.



*Schéma d'alimentation avec moteur HT*

→ Source : TOYOTA

## → Commande de la régénération

La commande de régénération peut être effectuée de deux manières :

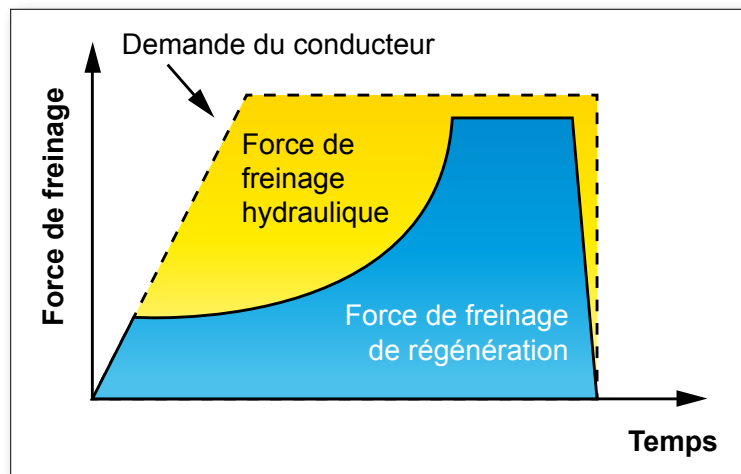
- Par la pédale d'accélérateur, dont la position détermine une vitesse de véhicule : la relâcher commande la régénération, tandis que l'enfoncer commande le couple moteur. Cette méthode est généralement présente sur les petits véhicules.
- L'autre méthode est plus sophistiquée. Elle consiste à dissocier la pédale de frein du circuit de freinage et à mesurer par des capteurs le désir de ralentissement du conducteur. Les signaux de ces capteurs sont exploités par les calculateurs de régénération et de freinage afin de répartir, pour un maximum de régénération, le frein moteur (électrique) et le freinage hydraulique. Cette méthode est utilisée sur TOYOTA, MERCEDES, BMW, PORSCHE, etc.

## → B. LES SYSTÈMES DE FREINAGE

Lors du freinage d'un véhicule électrique ou hybride, il faut récupérer un maximum d'énergie cinétique, et donc n'utiliser le système de frein hydraulique qu'en complément de la régénération. Cela implique de dissocier la pédale de frein de la commande hydraulique et de gérer le freinage par un calculateur et des actionneurs.

Cette technologie, onéreuse en développement et en réalisation, ne peut pas être utilisée sur les véhicules de petites séries ou d'entrée de gamme. Pour ces véhicules, un système de freinage hydraulique conventionnel est utilisé en alimentant le mastervac par une pompe à vide électrique.

### → Gestion électronique du freinage



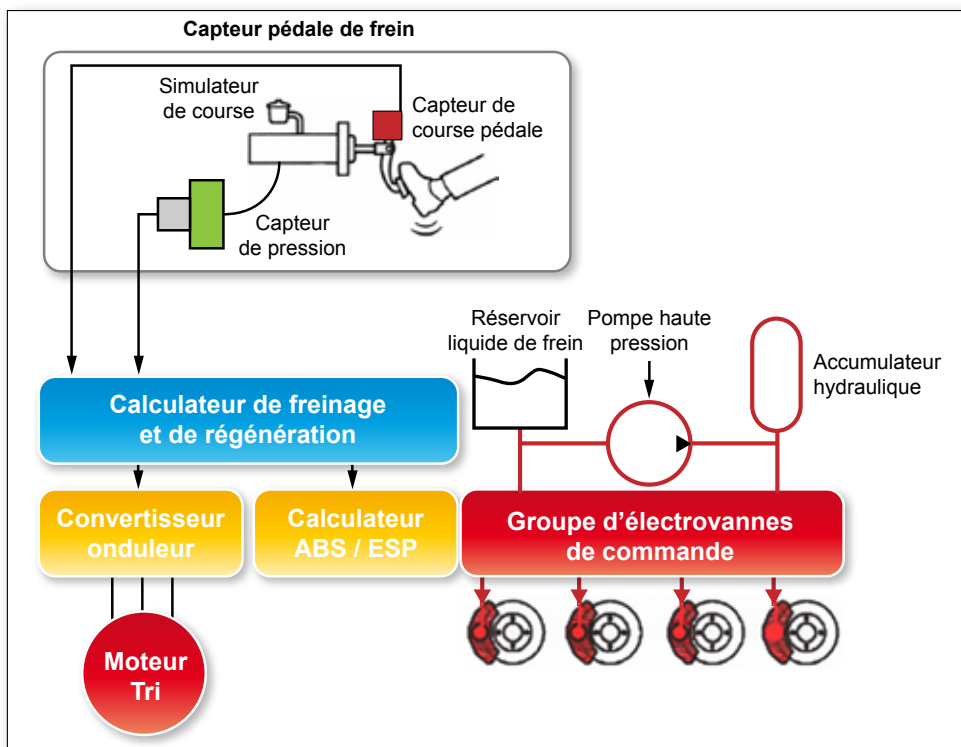
*Répartition des forces de freinage*

Le graphique ci-contre montre, de façon générale, la répartition des forces de freinage d'un véhicule avec gestion électronique de la récupération d'énergie et de freinage.

Deux systèmes de freinage « X by wire » sont utilisés : le premier représenté ci-dessous intègre un bloc hydraulique.



## → Fonctionnement



*Synoptique du freinage par groupe hydraulique*

La pédale de frein est composée d'un simulateur de course et de capteurs qui informent le calculateur de freinage et de régénération du souhait du conducteur. Celui-ci répartit la force de freinage sur le moteur et sur les freins.

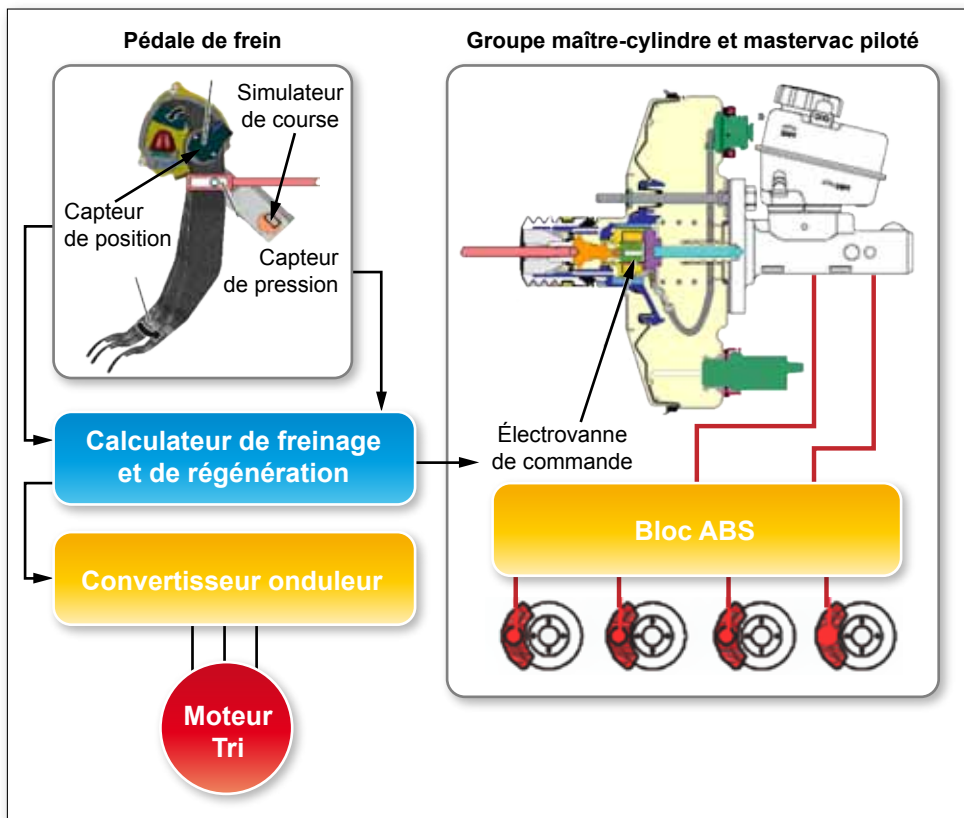
Le bloc hydraulique d'ABS comporte une pompe HP fournissant la pression nécessaire à la commande des freins. Cette pression est stockée dans un accumulateur. Elle alimente un groupe d'électrovannes, ce qui permet de faire varier la pression dans les étriers de frein. Chacun des capteurs de pression (un par roue) assure la boucle de contrôle.

Montage TOYOTA, LEXUS.

## → Modes dégradés

- En cas de défaillance du circuit d'alimentation électrique, une alimentation de secours composée d'une batterie de condensateurs permet, en utilisant la réserve de pression contenue dans l'accumulateur hydraulique, trois freinages.
- En cas de coupure totale de toutes les alimentations électriques ou pour toute autre défaillance, la pression générée par le maître-cylindre du simulateur de course est envoyée uniquement sur les deux roues avant par l'intermédiaire de deux électrovannes ouvertes au repos.

Le second système de freinage piloté utilise un mastervac commandé par une électrovanne.



*Freinage par mastervac piloté*

## → **Fonctionnement**

La pédale de frein a deux courses de fonctionnement.

La première est la course normale d'utilisation : la tige poussoir de la pédale n'atteint pas le mastervac, seul un contre-effort est exercé par un simulateur de course donnant ainsi l'illusion complète d'une commande conventionnelle.

Les capteurs de position et de pression de la pédale envoient au calculateur de freinage et de régénération le souhait du conducteur.

Celui-ci répartit les forces de freinage sur le moteur et sur les freins.

La pression dans le circuit hydraulique de freinage est générée par la poussée de la membrane du mastervac sur le piston du maître-cylindre. Pour son pilotage, une électrovanne a été implantée en parallèle de sa valve de commande lui conférant ainsi un fonctionnement de poumon pneumatique.

Le mastervac est alimenté en dépression par une pompe à vide électrique. Un capteur de pression surveille son fonctionnement tandis qu'un autre capteur mesure le déplacement de la membrane du mastervac.

## → **Mode dégradé**

En cas de défaillance du système ou de perte d'alimentation électrique, la coupure de l'alimentation d'une électrovanne permet l'effacement du simulateur de course permettant ainsi à la pédale de frein de s'enfoncer plus profondément et de commander directement le mastervac (deuxième course de fonctionnement).

## → A. SPÉCIFICITÉ DU CIRCUIT DE BORD

Les circuits de bord des véhicules électriques et hybrides sont semblables à ceux des véhicules thermiques que nous connaissons. Seules quelques spécificités les distinguent. Les véhicules micro-hybrides ont leur spécificité dans le mode d'alimentation des calculateurs alors que les véhicules électriques, mild hybride et full hybride, l'ont dans l'alimentation du circuit de bord (notamment en raison de l'absence d'alternateur).

### → Spécificité des véhicules micro-hybrides

Les véhicules micro-hybrides arrêtent leur moteur à chaque immobilisation (feux rouges ou autres) et les redémarrent lorsque le conducteur appuie sur la pédale d'accélérateur.

Le redémarrage d'un moteur thermique nécessite un fort couple pour passer la première compression. Cela engendre des pointes d'intensité de plusieurs centaines d'ampères dans le circuit d'alimentation du démarreur ou de l'alternateur-démarreur.

Ces pointes d'intensité répétitives provoquent des chutes de tension dans le réseau de bord qui perturbent le fonctionnement des calculateurs.

Deux solutions ont été adoptées par les constructeurs :

- soit l'ajout d'une petite batterie tampon de l'ordre de 10 Ah alimentant les calculateurs et rechargée par l'alternateur durant ses phases actives ;
- soit l'utilisation d'un convertisseur DC/DC électronique qui transforme une tension continue pouvant varier de 4 à 16 V en une tension continue fixe de 12 V.

### → Spécificité des véhicules électriques, mild et full-hybride

La batterie n'ayant plus à assurer le démarrage du moteur thermique, ses dimensions peuvent être réduites. Sa recharge ainsi que l'alimentation électrique du réseau de bord sont confiées à un convertisseur DC/DC (pour rappel, ces véhicules ne possèdent plus d'alternateur).

Ce convertisseur DC/DC puise son énergie dans la batterie haute tension et la transforme en 12 V. Pour cela, il faut que le contact soit activé (voir chapitre 4D).

Lorsque la batterie HT (Haute Tension) d'un véhicule hybride est déchargée, le moteur thermique démarre automatiquement afin que la fonction « générateur » du moteur électrique puisse la recharger. Ce fonctionnement se produit lorsque le véhicule reste longtemps immobile avec le contact activé (*en fonctionnement normal, la recharge de la batterie haute tension est assurée par la récupération des énergies cinétiques et potentielles*).

**Attention :** le moteur thermique peut démarrer à tout moment lorsque le contact est activé.

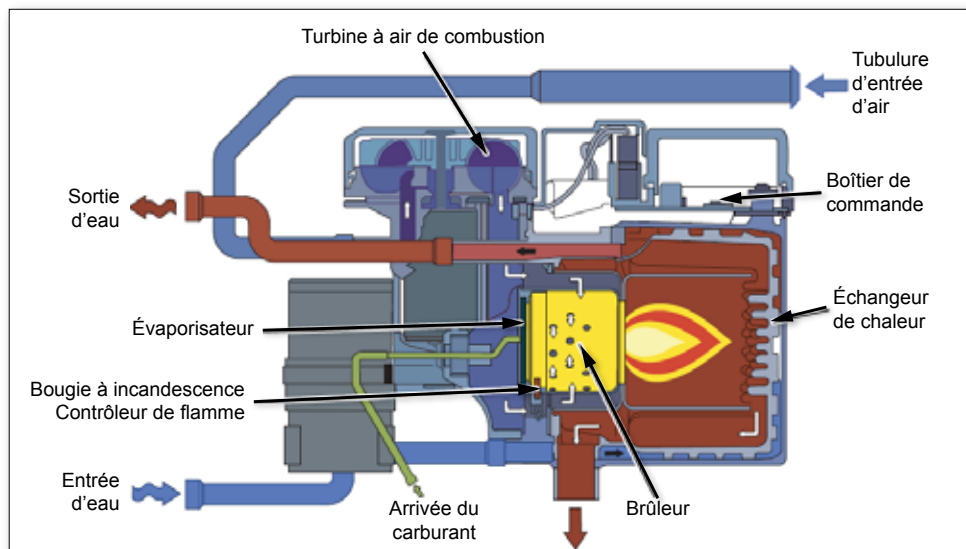
## → B. LA CLIMATISATION

### → Chauffage des véhicules électriques

À la différence d'un véhicule thermique, le rendement énergétique d'un véhicule électrique est élevé. En conséquence, il n'y a donc pas d'énergie perdue qui puisse être utilisée pour chauffer le véhicule.

Deux systèmes de chauffage sont utilisés :

- Par un radiateur électrique :
  - Ce radiateur est placé dans le bloc de chauffage en lieu et place d'un radiateur classique de chauffage à eau.
  - Les éléments chauffants sont des résistances CTP (Coefficient de Température Positif) qui permettent une autorégulation.
  - La consommation électrique est très importante ( $\approx 2$  kW), ce qui pénalise fortement l'autonomie du véhicule.
  
- Par un WEBASTO :
  - La chaudière WEBASTO est placée dans le circuit de chauffage à eau et maintient sa température entre 70 ° et 80 °C.
  - La circulation est assurée par une pompe à eau électrique.
  - Un réservoir d'essence ou de gasoil fournit l'énergie à la chaudière.
  - Un boîtier de commande, incorporé, régule le fonctionnement de la chaudière.



*Schéma d'une chaudière WEBASTO*

→ Source : PSA

## → Chauffage des véhicules hybrides

Le système de chauffage des véhicules hybrides est identique à celui des véhicules thermiques. Seuls les modes de fonctionnement hybrides changent. La mise en action du chauffage provoque ainsi la mise en marche du moteur thermique afin qu'il fournisse au circuit de refroidissement l'énergie nécessaire au chauffage. Le mode « stop and start » est désactivé. Lorsque la température souhaitée dans l'habitacle est atteinte, le système hybride retrouve un mode de fonctionnement normal.

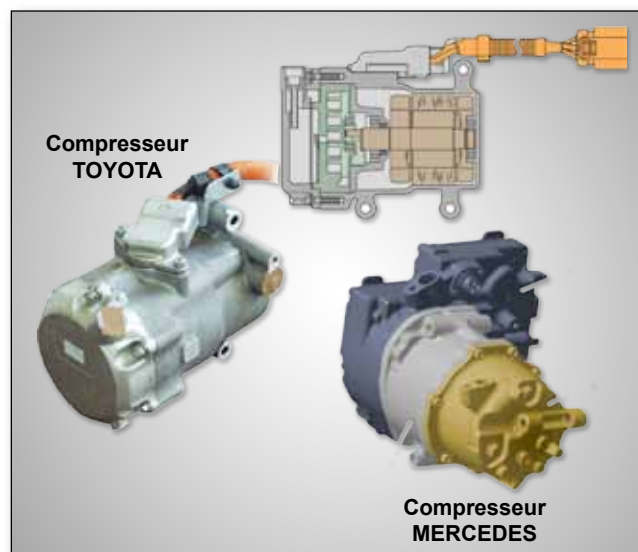
Des véhicules hybrides « haut de gamme » sont équipés d'une chaudière WEBASTO, ce qui réduit les fortes consommations que leur moteur thermique aurait provoquées lors du chauffage (le rendement thermique du WEBASTO étant largement supérieur à celui du moteur).

## → Climatisation

Le moteur thermique d'un véhicule hybride ne tournant pas en permanence, surtout s'il est full-hybride, il est difficile d'obtenir une climatisation satisfaisante dans de nombreux cas de fonctionnement (ex : bouchons en plein été).

La solution consiste à dissocier l'entraînement du compresseur de climatisation du moteur thermique et de l'entraîner par un moteur électrique triphasé haute tension, commandé par un onduleur.

Le calculateur de climatisation, par l'intermédiaire du réseau multiplexé, dialogue avec l'onduleur et régule la boucle de froid par la variation du régime de rotation du compresseur.



*Compresseur de climatisation à spirale*

Le moteur électrique est incorporé au compresseur, qui est du type à spirale, afin de n'avoir aucun couple résistant au démarrage. L'onduleur peut lui aussi être incorporé au compresseur (ex : MERCEDES, BMW).

La hausse inéluctable du coût des produits pétroliers ainsi que la nécessité impérieuse de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> imposent de trouver de nouvelles voies technologiques pour nos véhicules de demain.

L'électrification peut être l'une de ces voies. En prenant appui sur ses deux modalités principales de déploiement, la traction électrique et l'hybridation, l'électrification permet une réduction importante de la consommation de carburant tout en favorisant l'utilisation d'énergies renouvelables.

Le véhicule électrique ne constitue pas pour autant une solution miracle. Plusieurs limites sont ainsi identifiables. Première chose, il faut, sur le plan environnemental, rappeler que la production mondiale d'électricité est majoritairement d'origine thermique. Ce mode de production dégrade considérablement le rendement énergétique global du véhicule électrique. En effet, les rejets de CO<sub>2</sub> produits « indirectement » par un véhicule électrique deviennent très proches de ceux d'un véhicule thermique. Il en va tout autrement pour les pays qui ont choisi un autre mode de production. Pour ces pays, la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> liée au déploiement des véhicules électriques s'appuie ainsi majoritairement sur l'utilisation d'énergies primaires non productrices de CO<sub>2</sub> (éolien, solaire, hydraulique, nucléaire), ce qui contribue effectivement à la réduction de ces émissions.

Autre frein, le coût des véhicules électriques, au même titre que celui des véhicules hybrides, reste, pour l'heure, élevé. Le déploiement et la démocratisation de ce type de véhicule passeront donc nécessairement par une baisse des coûts de production, ce qui peut prendre encore quelque temps...

Par ailleurs, l'électrification des véhicules requiert des interventions qui ne sont pas, au vu des tensions rencontrées, sans risques pour les opérateurs. Les procédures d'intervention doivent pour cela être encadrées par la norme UTE C18-550, laquelle impose que les opérateurs aient reçu une habilitation pour pouvoir effectuer leurs interventions.

Dernière réserve, l'autonomie et le temps de ravitaillement demeurent les principaux points faibles des véhicules électriques. Si la standardisation des systèmes de recharge électrique apparaît comme une voie importante du déploiement du véhicule électrique, la mise en place de ce nouveau type de véhicule ira sans doute, à moyen terme, de pair avec un nouvel usage des véhicules : mise à disposition de véhicules électriques en milieu urbain, reconfiguration des stratégies de stationnement, etc.

Cela étant, le véhicule électrique demeure à ce jour une solution alternative intéressante au pétrole. Les niveaux de rejets (émissions de CO<sub>2</sub> et sonores) de ce type de véhicule restent en deçà de ceux affichés par le véhicule thermique. Par ailleurs, l'indépendance énergétique de ce type de véhicule est avérée. En faisant le choix du véhicule électrique, les gouvernements pourraient s'émanciper des contraintes économiques liées à leur consommation d'énergies non-renouvelables. Reste pour ces gouvernements à harmoniser leur stratégie de déploiement et leurs politiques d'accompagnement du véhicule électrique afin de préparer au mieux l'essor de cette nouvelle filière.

## → A. POUR EN SAVOIR PLUS

→ **Les véhicules**

Le site de l'AVEM (Association pour l'Avenir du Véhicule Électrique Méditerranéen) présente tous les véhicules électriques et hybrides du marché ainsi que l'identification des acteurs commerciaux.

→ [www.avem.fr](http://www.avem.fr)

Pour se plonger dans la longue histoire des véhicules électriques, ces deux sites réalisés par des passionnés permettent le voyage d'hier à aujourd'hui.

→ [www.voitureelectrique.net](http://www.voitureelectrique.net)

→ [www.cartype.com](http://www.cartype.com)

→ **L'environnement**

Issu d'un partenariat entre le ministère de l'Éducation nationale et l'ANFA, le Centre National de Ressources pour la Formation Automobile propose diverses publications sur de nombreux domaines parmi lesquels les transports routiers et le réchauffement climatique.

→ [www.educauto.org/infoTech](http://www.educauto.org/infoTech)

Ce site donne accès aux résultats et recommandations des groupes de travail du Grenelle de l'environnement.

→ [www.legrenelle-environnement.info](http://www.legrenelle-environnement.info)

Ce site offre une multitude d'informations sur le fonctionnement de notre planète.

→ [www.notre-planete.info/](http://www.notre-planete.info/)

→ **Les moteurs**

Fabricant de moteurs électriques, LEROY SOMER présente sur ce site les différents moteurs synchrones.

→ <http://dyneo.leroysonmer.com>

Pour en savoir plus sur le système ACTIVE WHEEL de MICHELIN HEULLIEZ.

→ [www.viamichelin.co.uk](http://www.viamichelin.co.uk)

→ **Les batteries**

La société EVPST assemble des batteries lithium et fournit sur son site de multiples informations sur ce domaine.

→ <http://evpst.com>

La société LIION BMS est un fabricant de BMS (Battery Management System) et nous livre sur ce site de nombreuses informations ainsi qu'un simulateur permettant de se mettre à la place du BMS afin de gérer un groupe d'accumulateurs.

→ <http://liionbms.com>

EVL Technologie distribue les batteries Lithium fer phosphate sur ce site et présente toutes les caractéristiques techniques de ses produits.

→ [www.lifepo4.fr](http://www.lifepo4.fr)

Entreprise du groupe BOLLORÉ, la société BATSCAP produit des batteries LPM (Lithium métal polymère) ainsi que des supercapacités.

→ [www.batscap.com](http://www.batscap.com)



## → **Recyclage des batteries**

Acteur incontournable dans le recyclage des accumulateurs au plomb, la société METAL BLANC se présente.

→ [www.metalblanc.fr](http://www.metalblanc.fr)

S.N.A.M (Société Nouvelle d’Affinage des Métaux) recycle les batteries utilisées dans la construction des véhicules électriques et hybrides (Cd-Ni, Ni-Mh, etc.).

→ [www.snam.com](http://www.snam.com)

## → **Systèmes et prises de charge**

Site officiel de l’association CHAdeMO qui normalise les systèmes de charge de batteries au Japon.

→ [www.chademo.com](http://www.chademo.com)

Constructeur français de bornes de charge rapide pour véhicules électriques.

→ [www.sgte-power.com](http://www.sgte-power.com)

EV PLUG ALLIANCE est l’association de plusieurs industriels proposant une normalisation des prises de charge pour véhicules électriques.

→ [www.evplugalliance.org](http://www.evplugalliance.org)

Fabricant de connecteurs, l’entreprise YASAKI produit les prises de charge pour les véhicules japonais. Leur site donne toutes les caractéristiques de ces prises.

→ [www.yasaki-na.com](http://www.yasaki-na.com)







### [ SIÈGE NATIONAL ]

#### → ANFA

41-49 rue de la Garenne  
92313 Sèvres Cedex  
Tél. : 01.41.14.16.18 ; fax : 01.41.14.16.00  
[www.anfa-auto.fr](http://www.anfa-auto.fr)

### [ DÉLÉGATIONS RÉGIONALES ]

#### → ANFA Aquitaine, Poitou-Charentes

Parc technologique de Canteranne  
15 avenue de Canteranne - 33600 Pessac  
Tél. : 05.56.85.44.66 ; fax : 05.56.49.34.02  
e-mail : [bordeaux@anfa-auto.fr](mailto:bordeaux@anfa-auto.fr)

#### → ANFA Auvergne, Limousin

1 rue Képler - 63100 Clermont-Ferrand  
Tél. : 04.69.16.78.40 ; fax : 04.69.16.78.41  
e-mail : [clermont@anfa-auto.fr](mailto:clermont@anfa-auto.fr)

#### → ANFA Bretagne, Pays de la Loire

2 cours des Alliés - CS 21242 - 35012 Rennes Cedex  
Tél. : 02.72.01.42.50 ; fax : 02.72.01.42.51  
e-mail : [rennes@anfa-auto.fr](mailto:rennes@anfa-auto.fr)

#### → ANFA Centre, Basse-Normandie, Haute-Normandie

Parc d'Activité de la Saussaie  
98 rue des Hêtres - 45590 Saint Cyr en Val -  
45075 Orléans Cedex 2  
Tél. : 02.72.01.42.20 ; fax : 02.72.01.42.21  
e-mail : [orleans@anfa-auto.fr](mailto:orleans@anfa-auto.fr)

#### → ANFA Franche-Comté, Bourgogne

Le Forum - 5 rue Albert Thomas - 25000 Besançon  
Tél. : 03.69.32.23.20 ; fax : 03.69.32.23.21  
e-mail : [besancon@anfa-auto.fr](mailto:besancon@anfa-auto.fr)

#### → ANFA Île-de-France

41-49 rue de la Garenne - BP 93 - 92313 Sèvres Cedex  
Tél. : 01.41.14.13.07 ; fax : 01.41.14.16.56  
e-mail : [sevres@anfa-auto.fr](mailto:sevres@anfa-auto.fr)

#### → ANFA Languedoc-Roussillon, Midi-Pyrénées

570 cours de Dion Bouton - 30900 Nîmes  
Tél. : 04.83.07.10.20 ; fax : 04.83.07.10.21  
e-mail : [nimes@anfa-auto.fr](mailto:nimes@anfa-auto.fr)

#### → ANFA Lorraine, Alsace, Champagne-Ardenne

1 rue Jean-Antoine Chaptal - 57070 Metz  
Tél. : 03.69.32.23.10 ; fax : 03.69.32.23.11  
e-mail : [metz@anfa-auto.fr](mailto:metz@anfa-auto.fr)

#### → ANFA Picardie, Nord-Pas-de-Calais

Immeuble Sanelec - ZAC La Vallée  
Rue Antoine Parmentier - 02100 Saint-Quentin  
Tél. : 03.61.32.14.40 ; fax : 03.23.64.30.36  
e-mail : [stquentin@anfa-auto.fr](mailto:stquentin@anfa-auto.fr)

#### → ANFA Provence-Alpes-Côte d'Azur, Corse

Parc Club des Aygalades - 35 boulevard du Capitaine Gèze -  
Bâtiment D - 13014 Marseille  
Tél. : 04.83.07.10.00 ; fax : 04.83.07.10.01  
e-mail : [marseille@anfa-auto.fr](mailto:marseille@anfa-auto.fr)

#### → ANFA Rhône-Alpes

40 rue Hélène Boucher  
69140 Rillieux-la-Pape Cedex  
Tél. : 04.72.01.43.93 ; fax : 04.72.01.43.99  
e-mail : [rillieux@anfa-auto.fr](mailto:rillieux@anfa-auto.fr)