



Le véhicule électrique

Sommaire

Présentation	page 2
La batterie de traction	page 4
Le moteur électrique de traction	page 10
Le confort	page 16
Les interventions sur circuits électriques	page 19
Conclusion	page 20
Annexe	page 21

Présentation

Le véhicule électrique connu dès 1890 a été utilisé jusque dans les années trente, période à partir de laquelle le véhicule à moteur thermique le supplante en raison de son autonomie.

Depuis 1980, le nombre de véhicules thermiques polluants, augmentent de façon importante ; des solutions de substitution sont envisagées pour les grandes villes.

Les constructeurs de véhicules, de batteries, de moteurs électriques, groupent actuellement leurs efforts de recherche, pour répondre au cahier des charges dressés par les différents services de l'environnement des états de la communauté européenne.

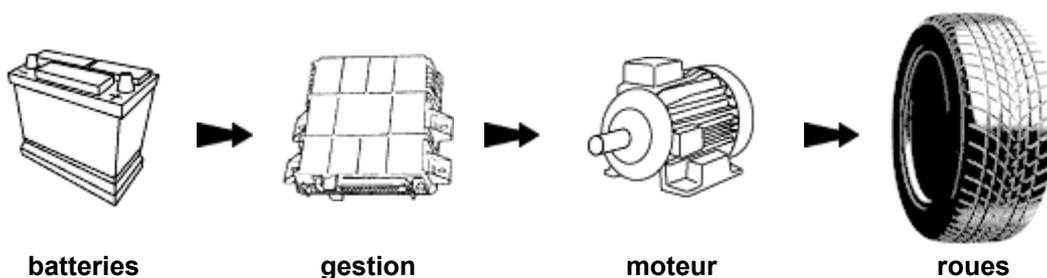
La Solution électrique répond doublement aux exigences de la circulation urbaine, par son absence de pollution gazeuse et de nuisance sonore

Les solutions proposées

Actuellement, trois solutions électriques existent et se différencient par leur chaîne de traction.

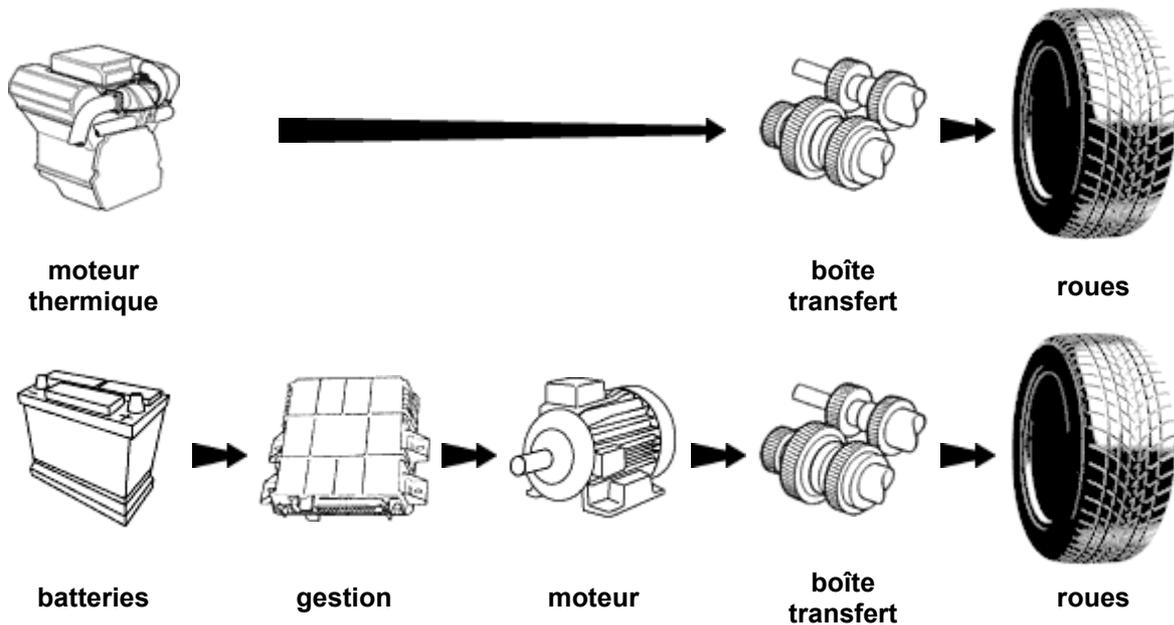
Traction électrique classique

C'est la solution la plus répandue. Elle est composée d'un groupe de batterie, d'une gestion électronique du courant et d'un moteur électrique. Le montage se fait sur véhicules légers de série, poids lourds, chariots élévateurs, tracteurs aérogares, Tracteurs de bagages SNCF et deux roues.



La traction bi-mode

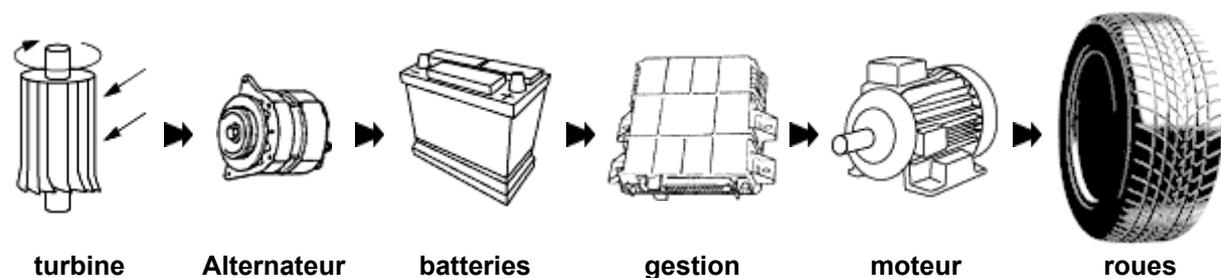
La traction thermique classique est utilisée hors des villes ; la traction électrique classique s'utilise en ville.



Le montage se fait sur poids lourds PONTICELLI INDUSTRIES.

La traction hybride

Il s'agit d'un groupe électrogène, entraîné par un moteur thermique ou par une turbine à gaz. Celui-ci produit du courant, qui recharge en permanence un groupe de batteries. Celles-ci débitent dans un moteur électrique de traction. En site urbain, le groupe est à l'arrêt et on recourt au moteur électrique. Actuellement chez PSA, il existe le prototype 406 V.E.R.T. (Véhicule Routier électrique à Turbine) dont la commercialisation est envisagée pour 2004.



Groupe électrogène

Chaîne de traction 406 VERT.PSA.

La présentation simplifiée du véhicule électrique que nous proposons ici, va permettre de se familiariser avec le fonctionnement des systèmes, le vocabulaire technique et de comparer les produits fabriqués actuellement.

La batterie de traction

La batterie de traction est un générateur électrochimique. Son principe de fonctionnement est identique à celui des batteries de démarrage, de servitude, et d'éclairage que nous connaissons.

Toutefois, en raison de son aptitude à générer de très forts courants, pendant des durées importantes, il est très différent des autres batteries, par sa technologie de fabrication, sa gestion de charge et de décharge.

Un générateur électrochimique stocke de l'énergie sous forme chimique et la restitue sous forme électrique.

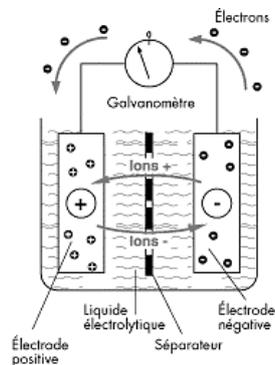
La construction

Les constituants internes d'une batterie sont : l'électrode positive, l'électrode négative, l'isolant et l'électrolyte.

Terminologie utilisée dans le domaine électricité	Terminologie utilisée dans le domaine chimie	Remarque
électrode + ou plaque positive	Corps oxydant ou corps susceptible d'être réduit	L'ensemble oxydant plus réducteur (plaque positive plus plaque négative) s'appelle couple électrochimique Exemples : Plomb-Oxyde de plomb ; Cadmium-Nickel ; Nickel-Fer ; etc...
électrode - ou plaque négative	Corps réducteur ou corps susceptible d'être oxydé	
Isolant poreux	Séparateur	Isolant mécanique entre deux plaques, sa porosité permet le passage des ions
Liquide électrolytique ou électrolyte	Acide ou base ; liquide ou gel	L'électrolyte participe ou ne participe pas à la réaction chimique suivant les couples, mais dans tous les cas assure la conduction ionique

Le processus de décharge

Pendant la décharge, la batterie est génératrice et débite du courant dans le moteur de traction. Pour permettre l'apparition d'un courant électrique, il est nécessaire que les électrons et les ions puissent circuler ; un récepteur va permettre la liaison entre l'électrode + et l'électrode -.



Le principe de fonctionnement pendant la décharge est le suivant :

le galvanomètre joue le rôle du récepteur et le déplacement de son aiguille prouve le passage du courant...

La batterie se décharge...

Il est rappelé que l'intensité est proportionnelle à la quantité d'électrons déplacés et à la quantité de matière mise en œuvre.

Une batterie chargée possède un excès d'électrons à sa plaque négative et un manque d'électrons à sa plaque positive.

Lorsque les deux plaques possèdent le même nombre d'électrons, la batterie ne débite plus de courant (on dit qu'elle est "à plat").

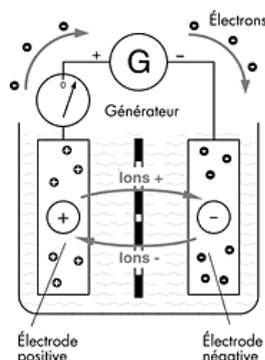
Le processus de charge

Pendant la charge, la batterie est réceptrice du courant fourni par le secteur.

Le procédé est l'inverse de la décharge.

Un générateur de courant (dynamo, chargeur) est placé aux bornes des électrodes et débite en sens inverse dans le système.

Il va permettre de déplacer les électrons de la plaque positive vers la plaque négative et redonner à la batterie son état initial.



Pendant la charge, le courant circule en sens inverse. Le galvanomètre dévie dans le sens inverse à celui de la recharge. L'intensité et la quantité de matière déplacée est toujours proportionnelle au nombre d'électrons en mouvement.

Lorsque la plaque négative est en excès d'électrons, la batterie est rechargée. L'utilisation du générateur électrochimique s'effectue en deux phases, la charge et la décharge. À l'intérieur de la batterie, l'énergie chimique se manifeste par un transfert de matière grâce à une circulation d'ions.

À l'extérieur de la batterie, l'énergie électrique se manifeste par un déplacement d'électrons. La réaction chimique fait apparaître deux autres phénomènes gênants : un dégagement de gaz et une montée en température.

Les chargeurs

Pendant la charge, la batterie se comporte comme un récepteur de courant.

Cette phase de fonctionnement obéit à des valeurs limites à ne jamais dépasser pour :

- la tension ;
- l'intensité ;
- le temps ;
- la température ;
- le dégagement gazeux.

Pour répondre à ces besoins, il existe pour chaque type de batterie un chargeur adapté.

- le chargeur embarqué pour les véhicules légers et les 2 roues (220V ~ 15 A alimentation secteur) ;
- le chargeur stationnaire pour les poids lourds et véhicules industriels (380V ~ 20 A et plus, alimentation triphasée).

Ces chargeurs sont pilotés par un micro processeur.

Ils s'adaptent automatiquement aux besoins de la batterie en restant dans les valeurs permises.

La coupure s'effectue automatiquement en fin de charge.

Les bornes de rechargement en site urbain

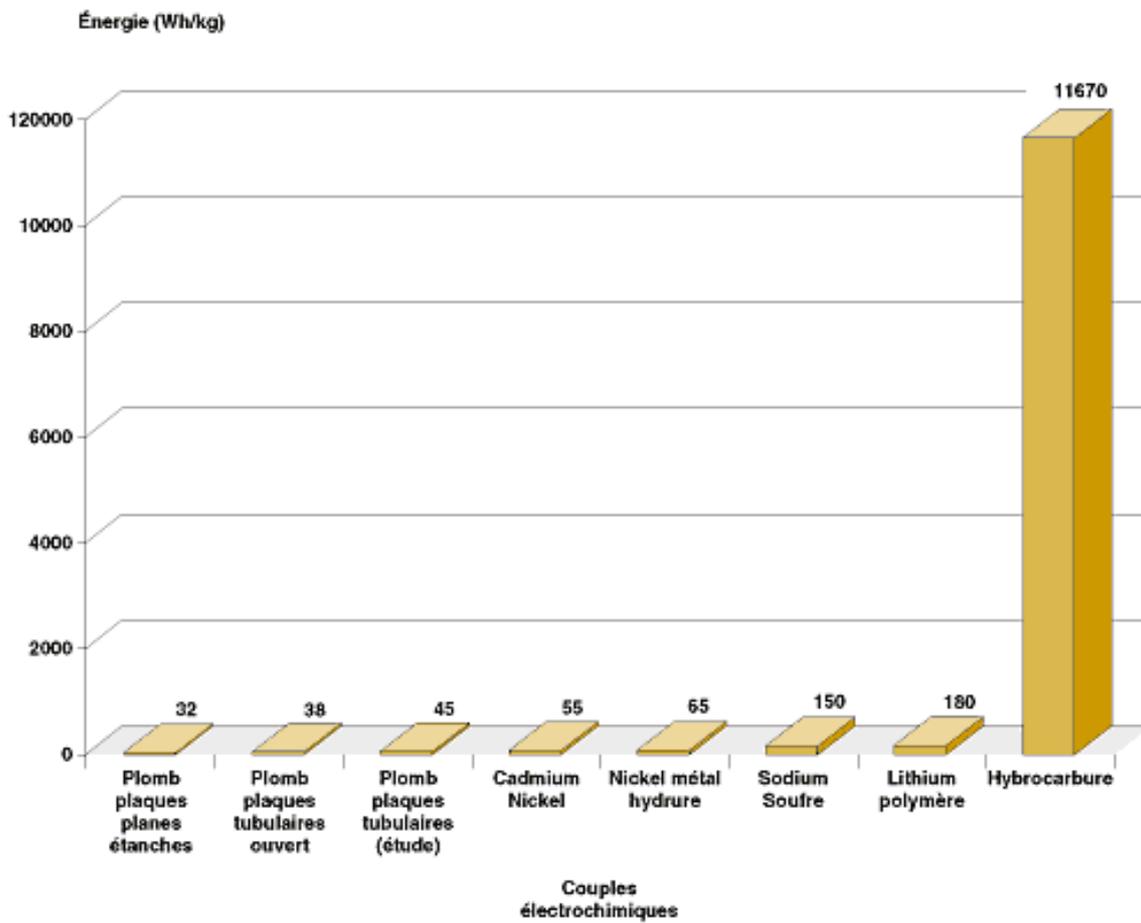
Les borne en parking sont accessibles grâce à une carte à puce. Elles permettent d'effectuer une recharge de jour et de nuit, sur un site en plein air ou souterrain.

Il en existe très peu actuellement. Leur développement est lié à l'évolution du véhicule électrique. Quelques parkings sont déjà équipés dans les grandes villes et sites pilotes.

Les bornes de recharge rapide sont situées en station service et permettent en cas de " panne sèche " de récupérer 20 Km d'autonomie en 20 mm (puissance de la borne 18 KVA). Ces bornes sont manœuvrées par le personnel de la station et sont la propriété exclusive du distributeur.

Très peu existent actuellement.

Comparaison des énergies



L'examen de ce graphique permet de constater les difficultés rencontrées pour stocker une énergie équivalente à celle d'un hydrocarbure.

Comparaison des technologies de fabrication

Couples chimiques	énergie massique Wh/kg	tension nominale par élément Volt	durée de vie en cycles et recharge	recharge rapide	T° de fonctionnement °C	rendement	recyclage et nocivité	prix franc/kWh	utilisation
Plomb acide Pb- PbO2	30 à 40	2	600 à 1200	occasionnel	-20 à 60	68	oui	1000	Volta, 2 roues, chariot élévateur, poids lourds, servitudes SNCF et aéroports Peugeot : 100, 2 roues, Partner. Citroën : AX Saxo, Berlingo.
Nickel cadmium Ni-Cd	50 à 65	1,2	2000	oui	-50 à 50	80	oui	4000	Essais : USA, Europe, Japon.
Nickel hydrure métal Ni- MH	55 à 80	1,2	1500	non	< 50	76			Essais : USA, Europe.
Sodium soufre Na-Ci	80 à 120	2	1000		constante 350°	91			Essais : Europe.
Lithium polymère Li-POE-MO2	150	3	500	non	< 80	85			Essais : USA, France.
Lithium carbone LiC-MO2	140	3,5	1200	oui	-30 à 70	NC			Essais : France Saft.
Aluminium air Al-O2	250	2,75							Essais : USA.
Zinc air Zn-O2	300	1,2	50						Essais : USA, Allemagne

NC > non communiqué

■ > informations non validées

Le choix d'une batterie de traction

La sélection d'une batterie se fait en fonction des critères suivants, par ordre d'importance :

- énergie, poids (Energie/Massique) ;
- recharge (Nombre de cycles) ;
- durée de vie, prix ;
- entretien ;
- tension, encombrement (fonction de l'utilisation) ;
- recyclabilité.

NB : Actuellement, les constructeurs montent des batteries plomb et Cadmium-Nickel sur les véhicules de série.

Conclusion

La filière Zinc-air pourrait être, avec le lithium polymère, la batterie de demain qui permettrait une autonomie supérieure à 200 Km. (La recharge se fait par remplacement des électrodes de zinc).

Pour la batterie lithium carbone aucune espérance de commercialisation avant 2003. Elle est très prometteuse cependant.

Pour les piles à combustible et hydrogène, les études progressent.

Toutefois, il existe des difficultés de stockage, de sécurité, d'encombrement et de poids.

Le moteur électrique de traction

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, et en fonction du type de véhicule fabriqué, les constructeurs orientent leurs choix sur :

- Le moteur série ;
- Le moteur excitation séparée ;
- Le moteur Brushless (ou moteur synchrone sans balais) ;
- Le moteur asynchrone.

Le principe de fonctionnement du moteur à courant continu

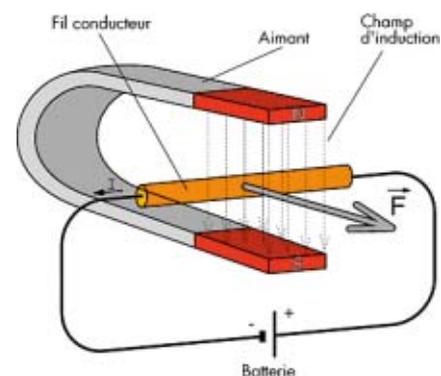
Lorsqu'un conducteur, parcouru par un courant Φ , est placé dans un champ d'induction, il est soumis à une force perpendiculaire au conducteur et au champ d'induction F (loi de Laplace).

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.

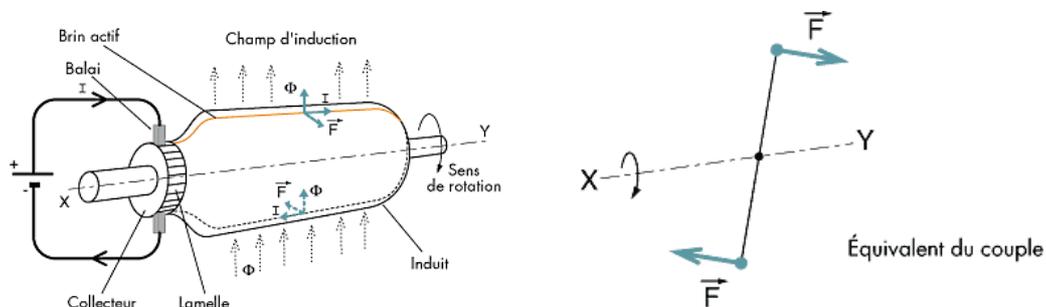
Ces forces d'attraction et de répulsion qu'exercent les aimants et les électros aimants entre eux, permettent à un moteur électrique de fonctionner.



La 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.



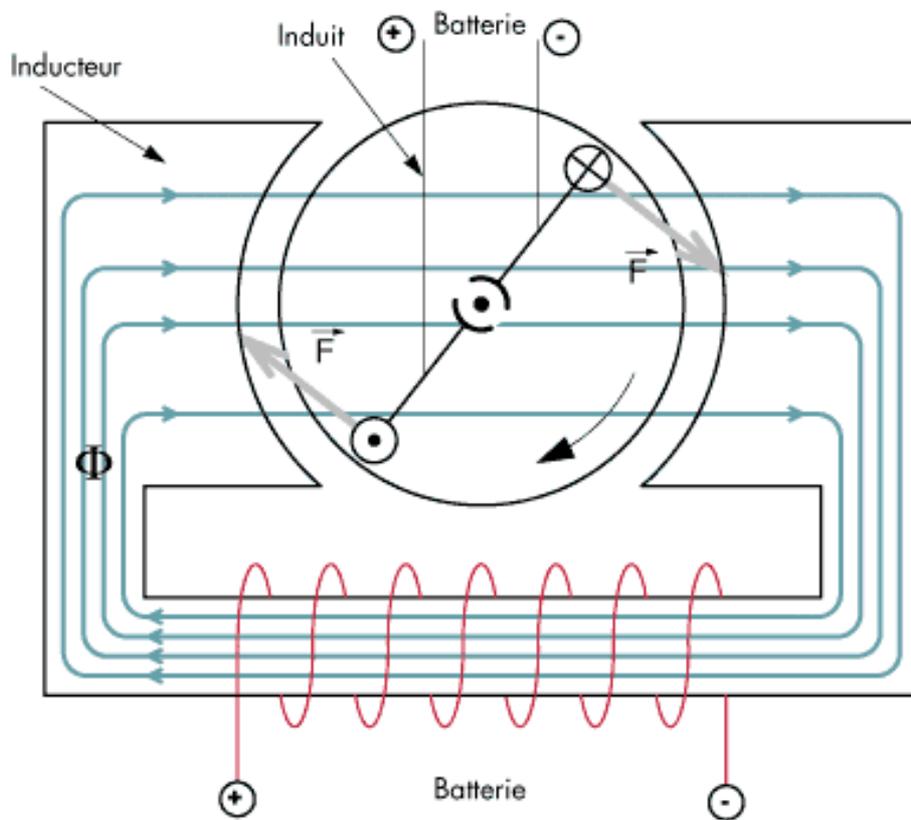
Chaque brin actif est soudé à ses extrémités sur deux lamelles du collecteur.

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.

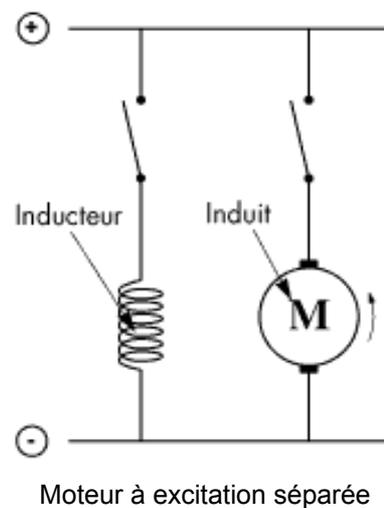
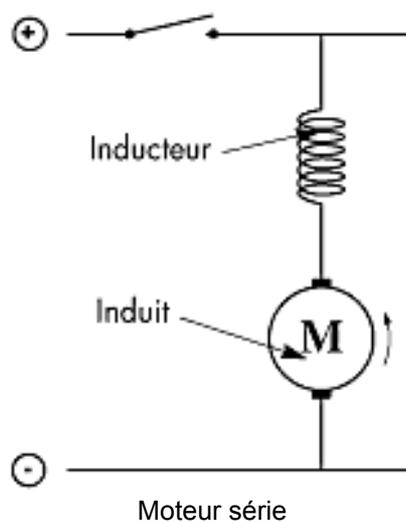
Le champ d'induction est produit par un électro-aimant fixe appelé inducteur, ou un aimant permanent.

* L'induit est la partie tournante du moteur électrique appelée ROTOR.

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 combinaisons des connexions entre induit et inducteur, on réalise un moteur série ou un moteur à excitation séparée.

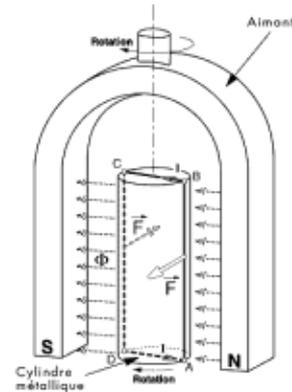


Le principe de fonctionnement du moteur à courant alternatif

L'aimant tournant produit un champ électromagnétique Φ qui traverse un cylindre métallique.

Les génératrices du cylindre placées dans le champ se comportent comme des brins actifs (AB et CD). Elles sont parcourues par un courant Φ proportionnel à F et engendrent des forces perpendiculaires qui constituent le couple.

On constate que le cylindre suit la rotation de l'aimant avec un léger décalage appelé glissement.



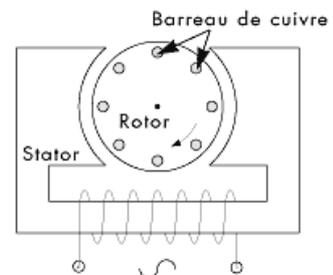
Construction du moteur asynchrone

L'aimant tournant est remplacé par le stator (électro-aimant alimenté par un courant alternatif).

Dans le rotor métallique, des barreaux de cuivre en circuit fermé sont insérés, pour canaliser les courants induits.

De sorte que le rotor bobiné, le collecteur et les balais sont supprimés.

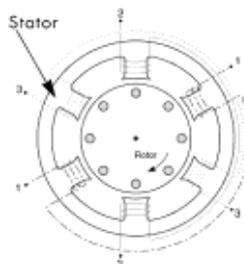
Ce moteur est simple et facile à construire.



Moteur asynchrone monophasé

Moteur asynchrone triphasé

En disposant trois bobines sur le stator, on réalise le moteur asynchrone triphasé adapté aux grandes puissances et utilisé en traction électrique.



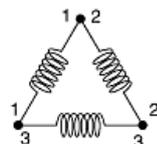
Moteur asynchrone triphasé (principe)

Par combinaisons des connections, on utilise deux possibilités :

- montage étoile ;
- montage triangle.



Montage étoile



Montage triangle

N.B. : Les moteurs asynchrones ne peuvent pas utiliser un courant continu batterie. Un " système interface " permet de transformer le courant continu en courant alternatif (Il s'appelle l'onduleur).

L'électronique de commande

Le moteur à courant continu, le hâcheur

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

Le convertisseur 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 " hâcheurs " qui permettent d'adapter le moteur à tous les besoins en couple et tension.

Il en résulte un fonctionnement très souple et économique.

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

Le moteur à courant alternatif, l'onduleur

En traction électrique, l'onduleur est un convertisseur continu-alternatif, qui permet d'obtenir trois phases de courant alternatif, décalées de $2p/3$ (120°), de fréquence variable de zéro à 50 Hz à partir d'un courant batterie.

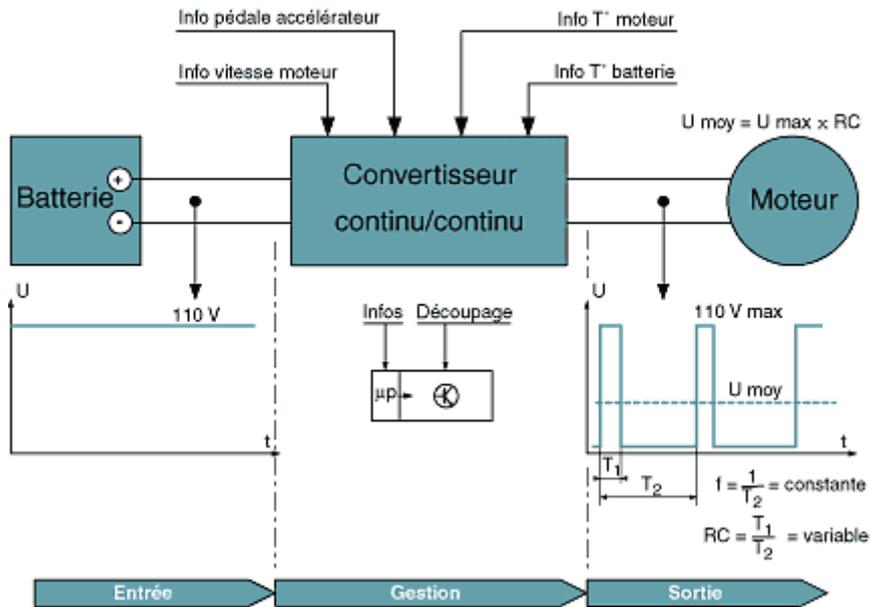
Cette technologie permet d'adapter les moteurs alternatifs fabriqués en grande série, qui sont simples, robustes, et peu onéreux.

Ce type de convertisseur fait varier uniquement la fréquence et permet d'obtenir ainsi une vitesse de rotation variable.

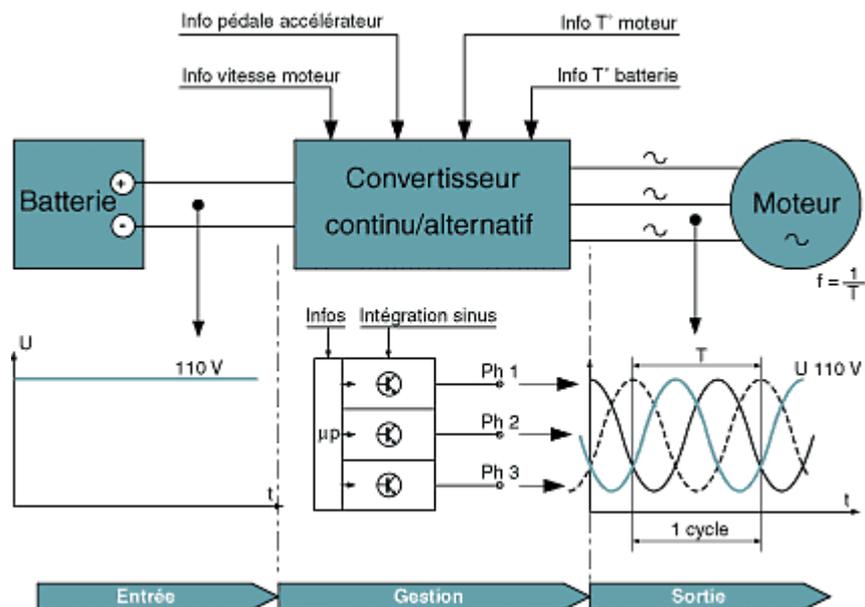
Ce procédé possède une puissance et un rendement correct à tous les régimes. (la vitesse de rotation d'un moteur courant alternatif est fixée par la fréquence ; la tension fixe le couple).

NB : Avec l'évolution de ce type de traction, la boîte de vitesse disparaît. Un réducteur suffit. Bientôt le moteur sera intégré dans la roue. Cette solution présente un inconvénient car on augmente les masses non suspendues.

Principe de fonctionnement d'un hâcheur de courant



Principe de fonctionnement de l'onduleur



Quelques exemples d'utilisation

Moteur	deux roues	Véhicule électrique	Poids lourds	Industriels	Essais
Aimants permanents	vélos	Étude			
Série	Scooter Simpson Scooter Sun	Volta Microcar Agora	Renault Samvat Ponticelli	Chariots élevateurs	
excitation séparée	Scooter Peugeot Scooter Barigo	AX Saxo 106 Clio Express	Master Berlingo Partner		
Asynchrone		Ligier			Nissan Honda BMW USA (VE)
Synchrone à aimants permanents	Essais	Toyota			Nissan Honda BMW Chrysler Renault

Le confort

Le circuit de servitude 12 V

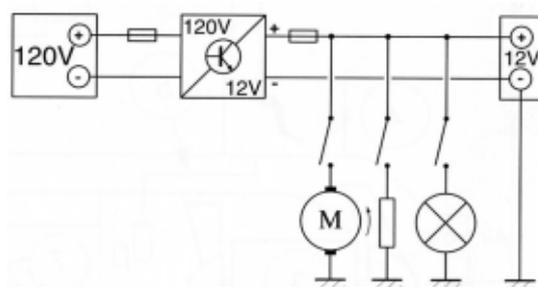
Il est identique à celui d'un véhicule thermique.

Ce circuit est alimenté par un CVS (convertisseur statique de courant), qui transforme la haute tension continue de la batterie de traction en 12 V continu et quelques dizaines d'ampères, suivant la demande.

Le CVS alimente les éclairages, le circuit de commande, le circuit de sécurité, les essuie-glaces, la ventilation et maintient chargée la batterie 12 Volts.

Le CVS est piloté par un micro processeur ; la distribution du courant est gérée par de l'électronique de puissance :

- il stoppe automatiquement le débit pour une tension supérieure à 13,8 Volt ;
- il régule ou coupe la charge en cas de sur intensité ;
- il est protégé par des fusibles sur son entrée et sur sa sortie ;
- il sépare galvaniquement (séparation galvanique = isolement) la haute tension du 12 Volt.



Le chauffage de l'habitacle

Pour chauffer correctement un véhicule électrique en utilisant une partie de l'énergie contenue dans les batteries de traction, on constate statistiquement, une réduction de l'autonomie de 10 à 15 %.

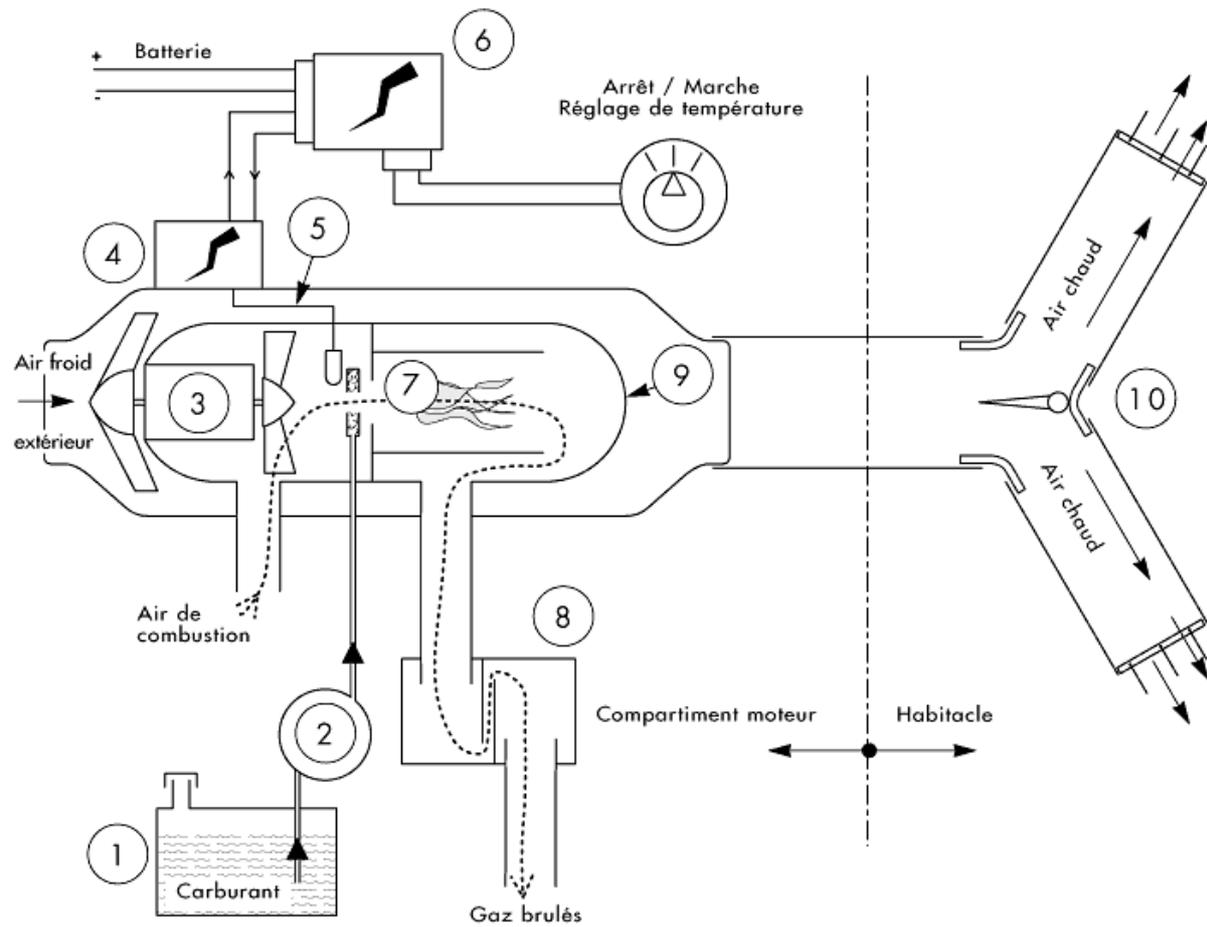
Pour éviter ces désagréments, les constructeurs équipent les véhicule électrique d'un chauffage additionnel.

Ces chauffages thermiques sont appelés chauffage par évaporation.

Caractéristiques

Puissance de chauffe	1,8 à 5 kW
Autonomie	12 heures à plein régime
Energie	Essence ou gasoil
Pollution	CO (+ ou -) = 0,1%, HC (+ ou -) = 12 ppm
Gestion	Par calculateur électronique
Programmation	De l'heure de démarrage, de l'heure d'arrêt, de la température
Commande à distance	Montage facile à intégrer sur tous les modèles
Distribution	Par les marques Webasto et Eberspacher

Principe de fonctionnement d'un chauffage additionnel



- 1 - réservoir
- 2 - pompe à carburant
- 3 - double turbine d'air
- 4 - allumage électrique
- 5 - bougie d'allumage
- 6 - bloc électronique de gestion
- 7 - chambre de combustion
- 8 - silencieux d'échappement
- 9 - échangeur
- 10 - distributeur d'air chaud

Autres éléments

La direction assistée

Son fonctionnement est identique à celui des véhicules thermiques.

La pompe hydraulique est entraînée par un moteur 12 V.

La consommation maximum de ce moteur est d'environ 35 Ampères en orientation.

Le freinage : la pompe à vide

Elle est également entraînée par un moteur électrique et permet d'utiliser un circuit de freinage assisté, identique à celui d'un véhicule thermique.

Le moteur 12V a une consommation moyenne de 8 A.

Les pneumatiques

On peut noter ces particularités : pour équiper l'AX, la 106 et la SAXO, Michelin a créé le pneu " GREEN " PROXIMA (gain d'autonomie 5 %) fabriqué et utilisé uniquement pour les véhicules électriques.

Les caractéristiques de ce pneumatique sont les suivantes :

- tubeless marqué GREEN PROXIMA ;
- dimensions 155/70/R13 ;
- radial XSE, charge 387 Kg, renfort latéral ;
- extrêmement adhérent, très silencieux ;
- pressions conseillées : AV 2,6 bars, AR 2,8 bars.

Il convient de préciser que le montage du pneu basse vitesse est interdit sur tout autre type de véhicule.

Les interventions sur les circuits électriques

Actuellement, les VE sont alimentés par des tensions supérieures à 100 V. Dans un proche avenir, des tensions supérieures à 400 V sont prévues.

Dans ces conditions, un personnel non qualifié et mal informé risque de :

- s'électrocuter ;
- se brûler en cas de court-circuit ;
- endommager le véhicule et l'outillage confié.

Tout personnel intervenant sur un véhicule électrique doit posséder un titre d'habilitation pour réaliser des travaux d'ordre électrique dépassant des tensions de 50 V.

Le titre d'habilitation est obligatoire (la réglementation relative au titre d'habilitation est contenue dans le recueil de normes UTE C18-510 de l'union technique de l'électricité 92052 Paris la Défense CEDEX 64).

Pour l'obtenir il est nécessaire de satisfaire aux conditions d'une visite médicale, d'être électricien confirmé par un diplôme, d'effectuer un stage dans un centre agréé pour faire valider les compétences exigées par le niveau des interventions.

En cas d'accident induit par le non respect des procédures légales et ayant entraîné des blessures graves, des poursuites peuvent être engagées.

Conclusion

Les handicaps du véhicule électrique sont actuellement :

- une autonomie moyenne comprise entre 80 et 100 km ;
- un temps de recharge batterie de 6 à 8 heures.

Les améliorations apportées aux batteries, permettent d'annoncer des autonomies supérieures à 150 km, ainsi que des temps de recharge réduits.

Grâce à ces recherches, le véhicule électrique pourra s'intégrer plus facilement dans les parcs de véhicules urbains où il correspond de plus en plus aux besoins des utilisateurs et aux évolutions de la législation.

Annexes

Rappel des caractéristiques de l'énergie électrique

Mesure de l'énergie électrique

La batterie est un réservoir d'énergie.

Le contenu d'un réservoir exprime sa capacité.

La capacité d'une batterie dépend du couple chimique, de la quantité de matière mise en oeuvre et de sa température.

La **capacité** s'exprime en Ampère x heure (Ah).

La **quantité de courant** s'exprime en coulomb (C).

$$1 \text{ Coulomb} = 1 \text{ ampère} \times 1 \text{ seconde}$$

$$Q = I \times t$$

et 1 Ah = 3600 C.

La quantité de courant libérée ou absorbée dans une réaction chimique pour une valence gramme est de 96500 coulombs (Loi de Faraday).

$$\text{Soit : } \frac{96500}{3600} = 26,8 \text{ Ah}$$

$$\text{Valence gramme} = \frac{\text{masse atomique (gr)}}{\text{nombre d'électron participant à la réaction}}$$

$$\text{Capacité massique (théorique)} = \frac{26,8 \text{ Ah}}{\text{valence gramme}} = \text{Ah par gramme}$$

Exemples

- **Batterie plomb :**

Masse atomique : 207,19 g

Nombre d'électrons échangés : 2

$$\text{Valence gramme} = \frac{207,19}{2} = 103,6 \text{ g}$$

$$\text{Capacité massique théorique} = \frac{26,8}{103,6} = 0,25 \text{ Ah/g}$$

- **Batterie Cadmium :**

Masse atomique : 112,4 g

Nombre d'électrons échangés : 2

Même calcul

$$\text{Capacité massique théorique} = 0,47 \text{ Ah/g}$$

- **Batterie à Hydrogène** (pile à combustible) :

Masse atomique H₂ : 2 x 1 = 2 g

Nombre d'électrons échangés : 2

Même calcul

$$\text{Capacité massique théorique} = 26,8 \text{ Ah/g}$$

La tension

La valeur de la tension est donnée par la formule suivante :

$$FEM = \frac{\text{Energie libéré}}{\text{Capacité}}$$

Sachant que 1 Watt = 1 Ampère x 1 Volt

$$FEM = \frac{\text{Wh}}{\text{Ah}} = \text{Volts}$$

Unités :

FEM : Force électromotrice (Volts)

Énergie : Watt heure

Capacité : Ampère heure

Exemple

Un élément d'une batterie plomb possède une énergie de 320 Wh.

Sa capacité est de 160 Ah.

$$FEM = \frac{320}{160} = 2 \text{ V}$$

Comparaison* des moteurs utilisés en traction électrique

Paramètres	Moteur à courant continu	Moteur à courant alternatif**
Contrôle de la vitesse	Tension, flux	Tension, fréquence
Contrôle du couple	Courant, flux	Courant, fréquence de glissement
Plage de vitesse	4	2
Vitesse maximum	2	5
Puissance massique	2	3
Encombrement	4	5
Rendement	4	5
Récupération freinage	4	2
Facilité de construction	2	5
Refroidissement	2	3
Robustesse	2	5
Bruits	5	5
Simplicité de commande	3	2
Prix	1	2
Pollution	5	5
Entretien	4	5
Total	44	54

5 = excellent

1 = médiocre

* d'après appréciation d'un groupe d'experts sur les performances des deux types de moteur.

** Le moteur à courant alternatif est de plus en plus employé pour la traction électrique. Les mêmes experts attribuent au moteur thermique la note de 21 (en rapport final, véhicule routier électrique, CFE).