

Plus en détails

La première phase de stockage dure environ une minute et consiste en la formation de NO₂ grâce au platine ($\text{NO} + 1/2 \text{O}_2 = \text{NO}_2$) puis s'ensuit le stockage du NO₂ créé par le baryum ($2\text{NO}_2 + \text{Ba} = \text{Ba}(\text{NO}_3)_2$). La seconde phase est la phase de déstockage et de réduction qui dure environ 3 secondes.

Le déstockage consiste en la réaction suivante $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2 = \text{NO}_x + \text{Ba}$ puis la réduction $\text{NO}_x + \text{réducteurs}(\text{HC}, \text{CO}, \text{H}_2) = \text{N}_2 + (\text{H}_2\text{O}, \text{CO}_2\dots)$.

Quelques anomalies de fonctionnement ont été rencontrées :

- Sur certains véhicules, le logiciel de gestion du système de dépollution n'était pas opérant (mauvais paramétrage non détectable avant emploi, car il faut une dizaine de kilomètres pour que le soufre commence à s'accumuler dans le filtre). Ainsi sur certains véhicules (erreur de consigne de température pour l'étape de désulfuration), un rappel des véhicules Renault pour reparamétrer a été nécessaire (qui s'est montré insuffisant).
- La vanne EGR ne fonctionne de manière opérationnelle que sur une plage restreinte de températures ambiantes. Quand l'air ambiant est trop froid ou trop chaud (en dessous de 17 °C ou au-dessus de 35 °C), l'apparition d'un dépôt de suie s'accumule et bouche la vanne. Pour palier cela, le calculateur limite la recirculation des gaz quand ces températures sont dépassées, ce qui entraîne une augmentation de la température des gaz d'échappement, et donc une surproduction de NO_x (et donc surcharge du filtre).

À noter également que Mazda a pensé à diminuer le taux de compression de ses moteurs (presque similaire à l'essence) ; les gaz sont moins chauds (car moins comprimés). Mais cela entraîne des problèmes de démarrage en cas de grand froid.

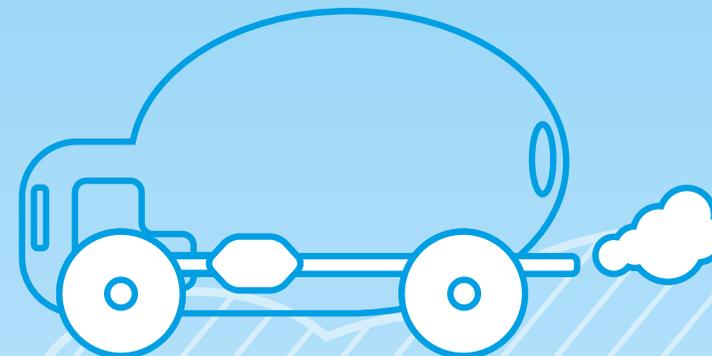
Pour résumer : le piège à NO_x fonctionne un peu comme un filtre à particules. Il retient les oxydes d'azote dans un premier temps, puis les élimine lors d'une phase de régénération.

Le stockage : En fonctionnement "normal" pour un Diesel, c'est-à-dire en mélange pauvre (plus d'air que de carburant), les oxydes d'azote s'oxydent et sont convertis en dioxyde d'azote par le revêtement de platine du catalyseur. Ils réagissent ensuite avec de l'oxyde de baryum pour donner du nitrate de baryum.

Le déstockage : Le déstockage s'effectue grâce aux molécules de monoxyde de carbone (CO) et aux hydrocarbures imbrûlés qui se trouvent en abondance dans les gaz d'échappement lorsque le moteur fonctionne en mélange "riche" (rapport stœchiométrique ou léger excès de carburant). Les NO_x précédemment stockés sont alors transformés en dioxyde de carbone (CO₂) et en diazote (N₂), deux gaz non toxiques. L'opération s'effectue tous les 5 km environ et ne dure que quelques secondes au plus.

le NO_x Trap

“ *Le NO_x Trap (piège à NO_x) fonctionne un peu comme un filtre à particules. Il retient les oxydes d'azote dans un premier temps, puis les élimine lors d'une phase de régénération.* ”



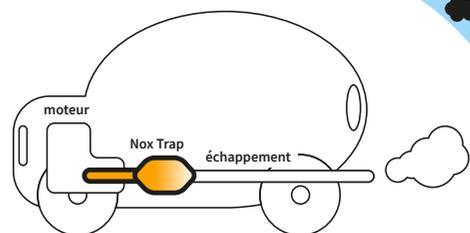
Principes de fonctionnement

Les moteurs thermiques ont connu une évolution, de l'essence au diesel qui émet moins de CO₂, car le mélange air carburant est soumis à des pressions plus hautes (on peut tirer des énergies plus grandes pour les mêmes consommations). Cela vient avec l'augmentation du taux de compression donc de la température et donc des NOx. La vanne EGR abaisse la température de la combustion (employée par tous les constructeurs) et réduit à la source 85 % des NOx.

Deux méthodes différentes sont employées pour se charger des 15 % restants : stocker les NOx pour les catalyser ultérieurement (discontinu, c'est le piège à NOx ou NOx Trap) ou les catalyser en continu (Réduction Catalytique Sélective ou SCR).

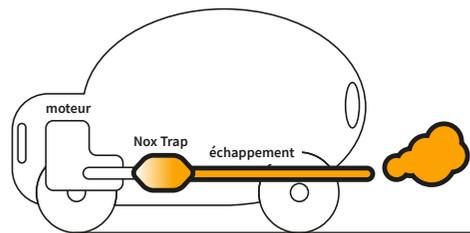
Sur les 100 véhicules évalués par la Commission "Royal", le point commun de ceux dépassant les valeurs seuils est l'utilisation de la technique NOx Trap. La technique la plus performante est le SCR mais étant beaucoup plus chère, elle est souvent uniquement utilisée pour les véhicules haut de gamme (hormis PSA qui l'utilise pour tous ses modèles HDi et optimise son fonctionnement avec un filtre à particules additivé). À l'exception de Mazda, qui propose une troisième solution, les autres constructeurs généralistes ont tous opté pour le piège à NOx, en le combinant parfois à un SCR pour améliorer son efficacité.

Le fonctionnement du stockage d'un NOx Trap est le suivant. Le « pain catalytique » est constitué de platine et de rhodium (pour la catalyse) mais aussi de baryum qui va réaliser le stockage des NOx sous forme de nitrate de baryum. Après une phase de fonctionnement en mélange pauvre (dans le moteur), l'efficacité du stockage diminue et il faut passer par une phase de stockage en mélange riche pour extraire et réduire les NOx.



Phase de fonctionnement classique dite de stockage

Rejet gaz d'échappement avec émissions de NOx et SOx → Les NOx et SOx passent dans le NOx Trap et y sont piégés (le taux stocké dépend du modèle de NOx Trap et de sa capacité → rejet gaz d'échappement sans NOx et sans SOx.



Phase de purge déclenchée (élimination des polluants stockés) dont la fréquence dépend du modèle de NOx Trap

Parmi les gaz d'échappement, on trouve des CO, H₂, NMHC, CH₄... qui en entrant dans le NOx Trap vont réagir avec les NOx et SOx stockés pour donner en sortie du NOx Trap des émissions d'H₂O, CO₂, N₂...

Avantages

Les avantages du piège à NOx ne sont pas nombreux : il n'est pas cher et simple à utiliser car ne nécessite pas de refaire le plein d'additif contrairement à la technologie AdBlue.

Inconvénients

Premier problème : à froid ou en circulation urbaine, son rendement de conversion ne dépasse pas 30 %, ce qui est très faible comparé aux autres systèmes de dépollution.

Certains constructeurs, pour camoufler cet écueil, font fonctionner les vannes EGR à leur maximum pendant le cycle d'homologation sur banc à rouleaux. Cela permet de limiter largement les formations de NOx et donc le piège à NOx a beaucoup moins de particules à accumuler. C'est donc la vanne EGR qui fonctionne à plein régime alors que le NOx Trap ne produit aucun travail dans ce cas. Mais en conditions réelles, les températures ambiantes fluctuent, lorsqu'elles sont basses ou supérieures à 30 °C, la vanne EGR est moins sollicitée voire désactivée.

Le piège à NOx reçoit plus de NOx du moteur qu'il ne peut en stocker et finit par s'obstruer ; les gaz s'échappent alors avec tous les NOx.

Lorsqu'on atteint une certaine vitesse, la vanne EGR travaille dans de bonnes conditions (sous réserve qu'il ne fasse ni trop froid ni trop chaud) et le piège à NOx aussi. Son rendement de conversion atteint alors presque 70 % avec une température d'échappement de 230 °C. Cependant à partir de 120 km/h sur autoroute, le rendement de conversion du piège à NOx redescend à 30 %. En effet, à ces vitesses, la vanne EGR ne peut pas être utilisée dans de bonnes conditions, car le véhicule a besoin de puissance et l'énergie des gaz d'échappement ne peut être utilisée.

En résumé : à grande vitesse ou lors des phases de fortes accélérations, la dépollution des NOx par le dispositif NOx Trap est insignifiante, voire nulle alors que c'est dans ces moments-là qu'un Diesel en produit le plus.

Hormis les problèmes de démarrage en cas de grand froid, la surconsommation de carburant peut aller jusqu'à 5 %, ce qui entraîne une baisse de performance (surconsommation nécessaire pour la phase de déstockage comme vu plus haut). Le NOx Trap a donc une faible capacité et est donc rapidement peu opérant (en lien avec l'efficacité de la vanne EGR).

On peut acheter un piège à NOx plus grand, donc avec une capacité plus importante, mais cela implique un surcoût. Ce catalyseur fait appel à des métaux précieux comme le platine, le rhodium et le baryum. Et la quantité de ces métaux est proportionnelle à la capacité du NOx Trap, ce qui explique le surcoût précité. Un piège à NOx de grande capacité nécessite aussi des purges plus longues et/ou plus fréquentes, qui se font en injectant plus de carburant. Ce qui signifie plus de surconsommation.

Les constructeurs choisissent généralement de s'en tenir aux capacités minimum pour conserver les performances. Il convient de noter en outre que les métaux utilisés sont une ressource épuisable.

Amélioration technique

Une autre alternative est l'utilisation d'un solide à la place de l'urée (en remplaçant l'AdBlue par de l'ammoniac dit solide). Faurecia a fait le choix d'investir dans une société danoise Amminex, qui développe une cartouche où l'ammoniac est stocké sous forme solide. Dès que la cartouche atteint la température de 60 °C, l'ammoniac peut être distribué sous forme gazeuse dans les gaz d'échappement. Cette technologie a l'avantage de permettre un traitement des oxydes d'azote bien plus rapide. Dans le cas d'un démarrage à froid, il peut s'écouler 10 minutes avant d'atteindre la température idéale pour convertir les NOx avec l'AdBlue. L'ammoniac solide promet de ramener ce laps de temps à 2 minutes. Non seulement la première réaction chimique qui consiste à décomposer l'urée en ammoniac est supprimée grâce à l'injection directe du gaz NH₃ dans le catalyseur (via l'emploi de cartouches, emplies d'un sel fait de chlorure de calcium ou chlorure de strontium, dont le sel absorbe le gaz à température ambiante et le relâche quand il atteint plus de 30 °C), mais en plus, il ne nécessite pas que le système soit très chaud et donc il n'est plus nécessaire de recourir à un second système de catalyse, comme il était courant, pour doser plus finement le NH₃ injecté. Ce système est également moins cher (puisque un seul système électronique de pilotage est nécessaire, même si on associe parfois les deux technologies SCR liquide et SCR solide, contrairement à lorsqu'on associe NOx Trap et SCR solide) et supprime complètement les dépôts. Ce projet est encore expérimental, mais des bus ont été équipés par Faurecia dans plusieurs capitales européennes. Chez Faurecia, la cartouche est un grand conteneur à faire remplir pendant les révisions par le garagiste et chez Plastic Omnium, ce sont des cartouches que l'on peut remplacer soi-même facilement.

Plus en détail

La centrale électronique gère avec une grande précision l'injection d'AdBlue en fonction de la température des gaz et des NOx émis. Il est préférable d'avoir une quantité égale de NO et de NO₂ pour favoriser le traitement des NOx. Certains constructeurs, comme PSA, place le SCR avant le FàP mais d'autres, le placent après (ce qui entraîne un temps de montée de température du SCR plus grand temps pendant lequel les NOx sont mal convertis, voire pas du tout).

Les réactions précises qui ont lieu sont les suivantes :

- **Le liquide d'AdBlue est injecté dans la ligne d'échappement et sous l'effet de la température des gaz, la solution s'évapore et se décompose en molécules d'ammoniac NH₃ et en acide isocyanique HNCO.**
- **Cet acide va ensuite réagir avec l'eau pour former des molécules supplémentaires d'ammoniac.**
- **Ces molécules d'ammoniac vont à leur tour réagir avec les molécules de NOx des gaz d'échappement dans le catalyseur SCR. La réaction la plus rapide s'opère à partir de 4 molécules d'ammoniac NH₃, 2 de monoxyde d'azote NO et 2 de dioxyde d'azote NO₂. Elle forme alors 4 molécules de diazote N₂ et 6 d'eau H₂O.**

Il est donc nécessaire, en sortie du catalyseur d'oxydation, d'avoir une quantité plus ou moins égale de NO et de NO₂ dans les gaz émis (pour le bon fonctionnement de la dernière réaction du processus).

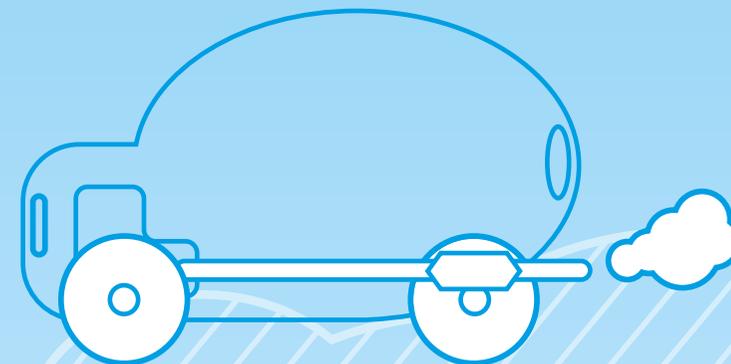
Il est difficile d'évaluer la quantité réelle de NOx émis via les gaz d'échappement. Il est donc difficile d'évaluer la quantité exacte d'AdBlue à injecter et souvent, la quantité injectée est plus importante que nécessaire. L'ammoniac étant un gaz polluant, il faut limiter ses rejets dans l'atmosphère au maximum et pour cela, un autre catalyseur, placé dans le SCR ou après, oxyde les molécules de NH₃ et les transforme en diazote N₂ et en eau H₂O.

Selective Catalytic reduction

“

Le SCR (Selective Catalytic Reduction) est un système de dépollution post-traitement qui tend à se généraliser au vu de son efficacité.

”



Direction Régionale de l'Environnement,
de l'Aménagement et du Logement
Bourgogne-Franche-Comté

Mission Régionale Climat Air Energie
Département Régulation Air Energie

Principes de fonctionnement

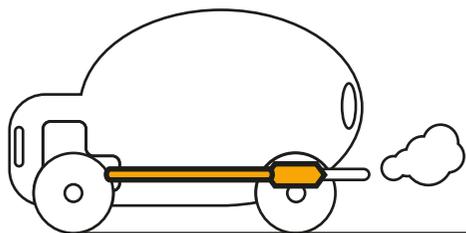
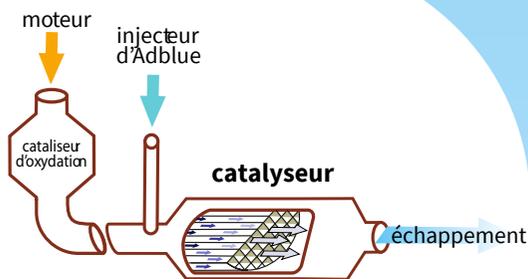
Le SCR est un système de dépollution post-traitement qui tend à se généraliser au vu de son efficacité et sous l'impulsion de l'évolution à la baisse des limites de rejet de la norme Euro 6 (passage d'un seuil à 180 mg/km à 80 mg/km).

Cette technique permettrait d'éliminer jusqu'à 95 % des NOx émis par les moteurs Diesel. Le système est composé d'un injecteur (AdBlue), d'un mixeur, d'un catalyseur (pour accélérer les réactions chimiques qui vont transformer les NOx en éléments non polluants – généralement N2), d'un programme électronique et d'un réservoir AdBlue sous forme liquide. L'AdBlue est un liquide composé à 32,5 % d'urée et de 67,5 % d'eau.

La technologie SCR (choisie par Peugeot et Citroën entre autres) est d'autant plus intéressante qu'elle répondra déjà aux normes Euro 6d en 2021.

Le fonctionnement est le suivant : du NH3 combiné à des métaux rares (ressource épuisable) transforme les NOx par réaction chimique en éléments non polluants (généralement N2). Le problème du transport de l'ammoniac se pose, il faut le diluer dans de l'urée pour former l'AdBlue. Pour ensuite extraire l'ammoniac de l'AdBlue, il faut atteindre des températures entre 180 et 200°C.

Le substrat du catalyseur est en cordiérite (matériau fait de silicate d'aluminium et de magnésium qui résistent à des hautes températures -1200°C- et à des variations rapides de température).



Les gaz traversent le catalyseur par de multiples canaux de petites dimensions, chaque canal étant pourvu d'un revêtement apte à accélérer les réactions chimiques propres au traitement des NOx.

L'injecteur et le mixeur ont pour rôle de distribuer de manière homogène l'AdBlue au sein de la ligne d'échappement en le pulvérisant sous forme de très petites gouttelettes pour faciliter la vaporisation de l'AdBlue.

Puis, le mixeur mélange de manière la plus uniforme possible les gaz d'échappement et l'AdBlue.

Avantages

La réduction catalytique sélective est efficace, c'est actuellement la meilleure pour éliminer les NOx, car elle peut traiter un volume supérieur de gaz d'échappement (meilleure capacité) et n'est donc pas sensible à la baisse d'efficacité de la vanne EGR, contrairement au piège à NOx. Un moyen d'augmenter l'efficacité du SCR est d'assembler SCR et NOx Trap (allier les avantages des deux pour palier les inconvénients).

Le SCR ne serait employé que sur route et autoroute quand les gaz d'échappement sont chauds, tandis que le NOx Trap qui n'est efficace qu'à basses températures serait employé en ville et pour les démarrages à froid.

Les principaux avantages du SCR sont donc : son efficacité, la simplicité de recharge (comme remettre du gazole), l'absence de surconsommation de carburant associée.

Inconvénients

Encombrement, poids et coût (une centaine d'euros de plus que le NOx Trap) sont les principaux inconvénients de cette technologie.

Le catalyseur du SCR s'encrasse lorsque les températures baissent et le filtre à particules, devenant plus froid, perd de son efficacité (de hautes températures sont nécessaires pour sa régénération via l'élimination des suies).

C'est d'ailleurs pour cela que PSA utilise un additif pour réduire la température nécessaire à la régénération du filtre (là encore il faut remettre à niveau l'additif en moyenne tous les 120 000 km). De plus, le système SCR implique, à chaque instant, une vérification de la quantité d'AdBlue à injecter dans la ligne d'échappement dépendant de divers paramètres (température des gaz, débit, etc) impliquant un coût supplémentaire à l'achat et des problèmes de maintenance.

En dessous de -11 °C, l'AdBlue se solidifie et le SCR devient alors inefficace. La norme Euro 6 n'est plus respectée, les émissions NOx s'envolent (mais le moteur n'est pas impacté en termes de puissance et de couple). En guise d'information, le gazole vendu en hiver par les pétroliers est garanti pour que son point de filtrabilité (point au-dessous duquel le carburant ne peut plus passer par le filtre à gazole sans l'obstruer) soit inférieur à -20 °C.

Par ailleurs, les gaz d'échappement devant atteindre une certaine température pour traiter les NOx, le SCR n'est efficace que sur une certaine plage de températures : en dessous de 200 °C, le SCR fonctionne mal, voire plus du tout. Un moteur Diesel Euro 6 avec technologie SCR n'est donc pas adapté pour des courtes distances/les trajets en ville, car les rejets de NOx seraient importants et la ligne d'échappement risquerait l'endommagement.

Un risque de cristallisation de l'urée existe si l'étape de thermolyse n'a pas lieu normalement. L'urée devient alors solide dans la ligne d'échappement et les gaz ne peuvent plus circuler correctement. Le moteur se met en sécurité et une intervention au garage est nécessaire.

Dans le meilleur des cas, il suffira de nettoyer la ligne d'échappement ; mais dans le pire des cas, il faudra pratiquer une intervention plus lourde en changeant le catalyseur SCR qui aura été endommagé par les cristaux d'urée.

Plus en détail

Les filtres à particules sont régénérés (décomposition en H₂O et CO₂) suivant deux modes :

- **La régénération naturelle** : lorsque les conditions de roulage permettent au gaz d'échappement d'atteindre la température de combustion nécessaire au brûlage des particules ; sur route ou à vitesse élevée, la température monte significativement dans la ligne d'échappement et une partie des particules dans le filtre va être brûlée naturellement. Cela conduit à placer le filtre près du moteur pour bénéficier de cette chaleur.

- **La régénération artificielle** : commandée par le calculateur d'injection, cette régénération s'effectue lorsque le véhicule n'effectue pas de longs trajets pendant un certain temps. Des sondes sont placées en entrée et en sortie du filtre pour mesurer les pressions et permettent au calculateur de détecter la perte de charge du FàP. Pour le régénérer, une injection de carburant dans un cylindre du moteur en fin de cycle de détente est déclenchée en conséquence. Le carburant injecté subit une post-combustion et atteint 400 °C, il est refoulé par le piston via la tubulure d'échappement vers le FàP.

Dans le FàP, un catalyseur (injecté automatiquement et instantanément dans le filtre) élève la température du carburant à 550 °C pour provoquer la combustion des suies et donc régénérer le FàP. Une régénération artificielle est également déclenchée, au bout d'un certain kilométrage (tous les 700 à 1000 km dépendant de chaque modèle – pour le Diesel, tous les 300 à 1000 km). Le FàP pour moteur à essence suit le même principe que pour les moteurs Diesel. Les moteurs à essence émettent plus de particules en nombre mais largement moins en masse. La masse de particules à brûler lors des régénérations est donc moindre et nécessite moins d'énergie (et donc une élévation de température plus faible).

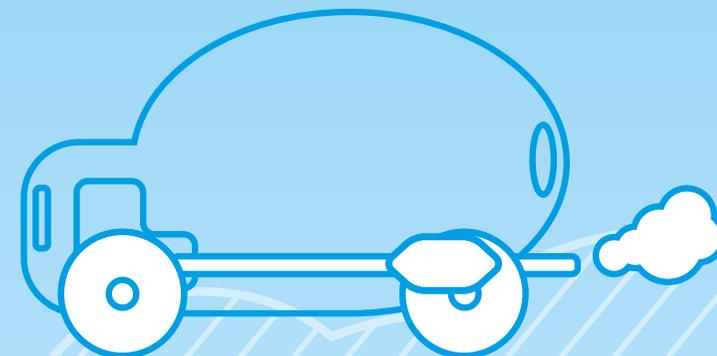
Le FàP pour moteur Diesel est souvent fait d'un matériau fritté (de carbure de silicium SiC comme matériau poreux, matériau coûteux mais permettant de stocker une masse de particules plus importante que le FàP pour moteur essence).

Le coût du FàP pour les véhicules Diesel varie entre 400 et 1500 € selon le modèle. Les coûts élevés sont liés à la présence d'un SCR ou d'un catalyseur en platine (matière plus chère que l'or) et dont la fabrication n'est pas simple. Compte tenu de la masse plus faible de particules émises, le FàP du moteur à essence peut être fabriqué à partir de cordiérite (céramique synthétique). La masse de particules à traiter étant plus faible dans le cas d'un moteur à essence, le risque d'encrassement (filtre bouché) est également amoindri.

Filtre à particules



“ *Le filtre à particules diminue les émissions de ces particules. Il entre en action pendant le parcours des gaz dans le circuit d'échappement.* ”



Principes de fonctionnement

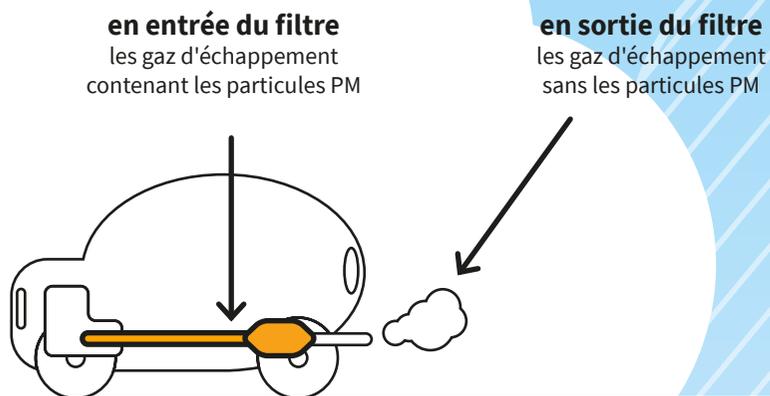
Les particules fines sont dangereuses car entrent facilement dans notre organisme du fait de leur taille microscopique (les plus grosses d'entre elles sont rejetées via le mucus mais les plus petites s'accumulent).

Le filtre à particules diminue les émissions de ces particules. Il entre en action pendant le parcours des gaz dans le circuit d'échappement. Il est fin, possède une structure en nid d'abeille, retient les particules mais laisse passer les gaz. Il est réalisé dans un matériau dont la porosité permet aux gaz d'échappement de passer tout en retenant les particules.

Les premiers filtres apparaissent au début des années 2000 et ils sont rendus quasiment obligatoires pour les véhicules Diesel depuis la norme Euro V qui impose des seuils d'émission maximale de particules faibles pour les véhicules légers, et obligatoires pour les véhicules à injection directe (l'injection directe pour l'essence est une technique qui abaisse nettement la consommation de carburant mais produit en contre-partie des particules fines).

Les particules en suspension dont la taille est comprise entre 10 nanomètres et 1 micromètre s'y trouvent piégées, mais l'accumulation de ces particules obstrue le filtre et gêne le passage des gaz (et donc altère le bon fonctionnement moteur), d'où la perte de charge du filtre généré par le filtre.

Le filtre à particules a la même forme que le pot catalytique.



Avantages

Le filtre à particules permet de réduire de 95 % en masse et 99,7 % en nombre les particules dont la taille est supérieure à 23 nm ainsi que le carbone de suie. Certains filtres pourraient éliminer les particules allant jusqu'à 7 nm.

Il réduit fortement les émissions d'hydrocarbures imbrûlés et de suies (fumées noires).

Inconvénients

Les FàP sur véhicules légers retirent 99,5 % des particules mais présentent des inconvénients : le coût, la régénération, l'inefficacité en démarrage à froid, la surconsommation de carburant et la non filtration des plus petites particules.

Ils nécessitent d'être nettoyés pour prévenir leur encrassement.

Les régénérations créent des gaz à effet de serre et autres gaz polluants (les particules en brûlant peuvent se transformer en NOx, certains constructeurs placent un second SCR après le FàP) et les régénérations abîment le filtre sur le long terme.

La régénération continue se fait dans des conditions précises (température suffisante pour déclencher la combustion des particules mais rarement atteinte en conditions normales d'utilisation).

De plus, le turbocompresseur peut être endommagé, car il a besoin des gaz d'échappement pour fonctionner (cela peut aller jusqu'à des risques de casse moteur lorsque le FàP se bouche, car les gaz ne peuvent plus passer et alimenter le turbocompresseur).

Plus en détail

Pour que la combustion dans les cylindres moteur soit optimale, le rapport de l'air par rapport à l'essence devrait être de 14,7. Or dans les faits, cela ne se produit jamais. Pour palier cela, les constructeurs mettent en place une sonde lambda pour mesurer en continu le taux d'oxygène en sortie de moteur et transmettre cette donnée à un ordinateur, pour moduler l'injection d'essence dans le moteur en conséquence.

Le pot catalytique doit pouvoir s'adapter aux modifications de la composition des gaz : c'est l'oxyde de cérium ajouté au support en alumine qui va stocker l'oxygène s'il est en excès et le restitue quand il est en défaut. Ces procédés permettent de maintenir le taux d'oxygène à une constante.

Les réactions qui ont lieu sont, par exemple pour le C₉H₂₀ comme hydrocarbure, les suivantes :
2 oxydations : C₉H₂₀ + 14O₂ → 9CO₂ + 10H₂O et 2CO + O₂ → 2CO₂
1 réduction : 2NO_x + 2xCO → 2xCO₂ + N₂

Le monolithe en céramique est construit avec des métaux précieux qui, combinés à de fortes températures, accélèrent les réactions chimiques présentées sur le schéma précédent. La natte maintient le monolithe en place au sein d'une coque en acier et après la montée en température, la natte se dilate pour maintenir en position la céramique malgré la pression des gaz et des vibrations. Le volume total du catalyseur est environ égal à la cylindrée du moteur (avec environ 70 cellules par cm²).

Le pot catalytique est aussi appelé catalyseur (3 voies ou 2 voies). Les catalyseurs 3 voies, à la différence des catalyseurs 2 voies (uniquement l'oxydation), procèdent également à une réduction et traitent également les NO_x (en plus des HC et CO). Les catalyseurs 2 voies oxydent les HC et les CO mais nécessitent pour cela, une quantité importante d'oxygène présente dans les gaz d'échappement.

Comme les moteurs Diesel fonctionnent en excès d'air, cela est simple, mais pour les NO_x, cet excès d'air empêche leur réduction. Dans ce cas, c'est la vanne EGR qui se charge de réduire les oxydes d'azote émis. Le palladium ou le platine accélèrent l'oxydation tandis que le rhodium accélère la réduction.

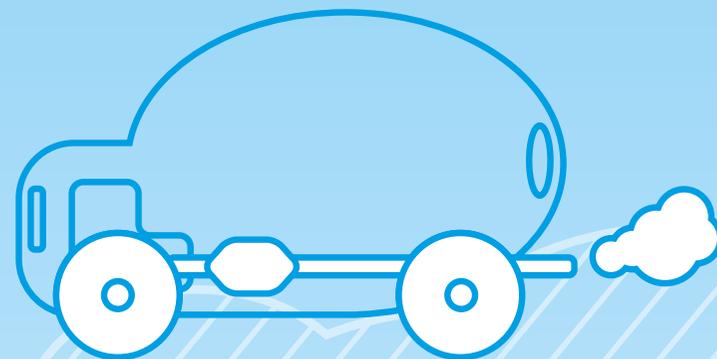
Pot catalytique



“

En fonctionnement optimal, le pot catalytique élimine jusqu'à 99 % des composés toxiques des gaz d'échappement.

”



Principes de fonctionnement

Les pots catalytiques deviennent obligatoires sur les voitures neuves en 1993 bien qu'inventé 20 ans auparavant. Les pots catalytiques transforment les imbrûlés en composés inoffensifs (oxygène, dioxyde de carbone).

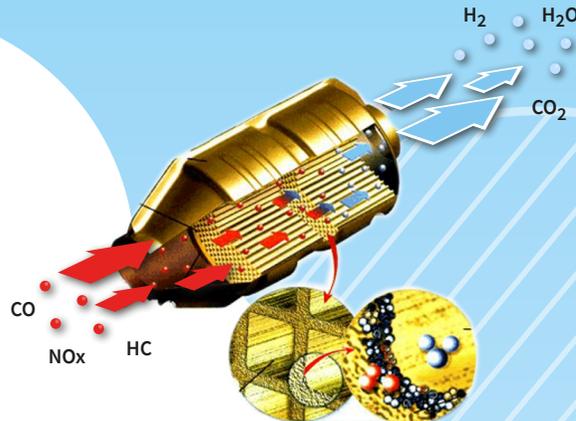
À ses débuts, le plomb étant important dans le carburant, le pot s'encrassait rapidement devenant inopérant. Cette technologie a donc fleuri de manière exponentielle depuis l'apparition de l'essence sans plomb.

Les combustions n'étant pas complètes, le carburant ne se transforme pas entièrement en dioxyde de carbone, azote et vapeur d'eau comme il le devrait. Les gaz d'échappement sont composés de monoxyde de carbone, d'hydrocarbure imbrûlés voire de particules (pour les moteurs à injection directe plus récents, pour les moteurs à essence et pour tous les moteurs Diesel).

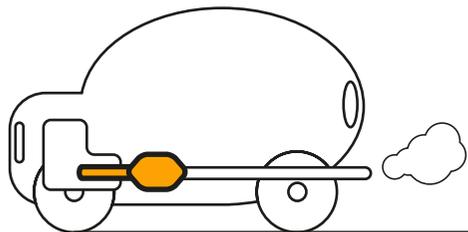
Le pot catalytique, via l'oxydation par l'oxygène ou la réduction par le monoxyde de carbone, les transforme.

Il est constitué en nid d'abeilles fait en céramique pour résister à de fortes montées de température et fait un volume de 2 litres. Les petits canaux de section carrée contiennent des particules de métaux précieux, comme le rhodium, le platine et le palladium, de l'ordre du micron.

Dans le pot catalytique à l'entrée les gaz d'échappement contenant NOx, CO et HC (en rouge) réagissent à l'intérieur du pot avec le matériau constitutif du pot pour former des gaz dits neutres N₂, H₂O et CO₂



En sortie du pot catalytique les gaz d'échappement avec à la place des NOx CO HC les N₂ H₂O et CO₂



Avantages

En fonctionnement optimal, le pot catalytique élimine jusqu'à 99 % des composés toxiques des gaz d'échappement.

Pour atteindre les hautes températures rapidement (au démarrage par exemple), les sociétés Emitec, Alpina et BMW ont collaboré dans les années 1990 pour mettre au point un pot à chauffage électrique. Le système contient des résistances électrifiées juste après le démarrage, augmentant ainsi la température du pot.

Les nouveaux modèles de pot sont fixés au plus près du moteur et ont ainsi une efficacité presque instantanée après le démarrage du moteur. La surface catalytique active étant très grande (environ la taille d'un terrain de football), les gaz d'échappement sont traités et convertis à 98 %. Les nouveaux modèles sont aussi de plus en plus résistants aux forts gradients de température : les matériaux ne s'accumulent plus en agglomérat, évitant ainsi les risques d'obstruction.

Une autre solution est d'utiliser un deuxième catalyseur dont l'oxydation serait générée et accélérée par l'or à basses températures. Toutes ces méthodes permettent de palier les problèmes, liés au démarrage, traités dans la partie inconvénients ci-dessous.

Inconvénients

Tout d'abord, la catalyse n'a lieu qu'à partir de 300 °C voire 400 °C et cela prend environ une dizaine de kilomètres au moteur pour atteindre de telles températures. Le pot catalytique ne fonctionne donc pas au démarrage et pendant plusieurs minutes (le catalyseur est opérationnel au bout de 60 à 90 secondes après le démarrage moteur), alors que les émissions sont les plus conséquentes au moment du démarrage. Par ailleurs, le soufre, bien que sa teneur ait atteint des niveaux faibles de nos jours, peut boucher le pot catalytique en s'agrippant aux particules métalliques que le pot contient (dans les nouveaux moteurs Diesel, les canaux des pots sont beaucoup plus larges pour ne pas être bouchés par les particules de suies).

Le pot catalytique est très fragile : un jet d'eau peut créer un choc thermique et briser le support et la paroi en métaux précieux, mais un mauvais réglage de la combustion peut également l'abîmer, entraînant le passage d'essence non brûlée par exemple, qui s'enflammerait dans le catalyseur et détruirait les métaux. De manière générale, sa durée de vie est limitée, varie selon les modèles (environ 160 000 km) et nécessite un changement (alors que c'est une technologie chère, quelques centaines d'euros plus ou moins selon les modèles). Malgré son action élargie sur plusieurs composés, le dioxyde de carbone (gaz à effet de serre) n'est pas traité par ce système et est même augmenté, via une augmentation de consommation de carburants entre autres.

La température de fonctionnement du pot provoque parfois une réaction indésirée qui génère du N₂O (protoxyde, également gaz à effet de serre). Le benzène et certains métaux lourds qui ont remplacé le plomb dans les carburants (voire les autres alcools qui remplacent le benzène) causent des dommages écologiques et sanitaires. Les fortes variations de température (et donc de pression), la corrosion et l'encrassement arrachent au fil du temps les métaux de leur support (ils sont alors évacués avec les gaz d'échappement). Au cours de leur dégradation, les pots dégagent des nanotubes de carbone (élément constitutif du pot catalytique) avec des effets sanitaires potentiels.

Pour les moteurs Diesel, il s'agit souvent de catalyseurs 2 voies (en association avec d'autres technologies) qui filtrent jusqu'à 99 % des particules mais nécessitent une étape de régénération supplémentaire pour brûler les suies bloquées dans le pot (un additif, de la cérine CeO₂ souvent, permet d'abaisser la température de brûlage et de diminuer le taux de suies issues de la combustion) d'où une surconsommation et des rejets supplémentaires de CO₂. La question du recyclage des pots catalytiques se pose également.

Plus en détail

Production de l'hydrogène

Malgré sa forte abondance sur terre, l'hydrogène ne se trouve pas à l'état pur mais lié à d'autres éléments (comme l'oxygène pour l'eau ou le carbone pour les hydrocarbures).

Il est présent dans tous les organismes vivants (biomasse). C'est pour cela qu'on parle de vecteur énergétique car pour extraire l'hydrogène, il est nécessaire d'apporter une énergie au préalable. Le dihydrogène utilisé de nos jours est produit à 95 % par vaporeformage, soit en utilisant des combustibles fossiles (on casse les molécules d'hydrocarbures pour obtenir l'hydrogène en utilisant de la chaleur, un catalyseur pour accélérer la réaction et de la vapeur d'eau).

Du dioxyde de carbone est libéré en même temps que l'hydrogène par cette méthode.

Une autre méthode est l'électrolyse de l'eau (réaction inverse de la pile à combustible). L'eau se transforme en dioxygène et dihydrogène par réaction avec un courant électrique. L'électricité utilisée peut être d'origine renouvelable ou nucléaire. Une autre méthode de production est l'emploi de la biomasse par gazéification avec vapeur d'eau avec comme produits l'hydrogène, le monoxyde de carbone et le CO₂, auxquels on enlève les éléments polluants par la suite.

Dans ce cas, contrairement au nucléaire, le bilan carbone est nul car le CO₂ produit aurait été le même si on avait laissé la biomasse se décomposer naturellement. Les deux dernières méthodes de production sont l'extraction des gisements sous-marins (qui est encore à l'état expérimental car difficilement accessible) ou le réemploi du dihydrogène comme sous produit d'autres réactions dans des usines qui produisent d'autres composés (c'est le cas à Tavaux sur la plateforme Inovyn).

Stockage de l'hydrogène

Concernant le stockage de l'hydrogène, il est très varié et dépend des applications (son coût varie aussi) : il faut assurer des conditions de sécurité strictes puisque l'hydrogène est très léger et volatil. Sur les automobiles, deux soupapes de sécurité sont installées et en cas d'incendie (une soupape thermique et une soupape de surpression). Pour de petits volumes et des systèmes stationnaires, l'hydrogène peut être conservé sous forme gazeuse à pression basse (en dessous de 100 bars), ce qui est peu coûteux et facile à mettre en œuvre (dans ce cas, les gaz sont injectés en régulant leur pression, l'humidité, etc).

Ce qui est privilégié est donc le stockage à l'état gaz sous haute pression (500-700 bars selon le modèle avec un rapport massique entre le poids du réservoir et celui du gaz de 5 % seulement), le stockage doit être composé de matériaux imperméables résistants aux vibrations et aux fortes pressions. Les dernières pistes se portent sur les hydrures (capable d'absorber puis restituer l'hydrogène) pour stocker de manière réversible l'hydrogène sous forme solide. On obtient ainsi une meilleure densité volumique d'énergie, mais on augmente en même temps le poids puisque le matériau où l'hydrogène est inséré est très lourd.

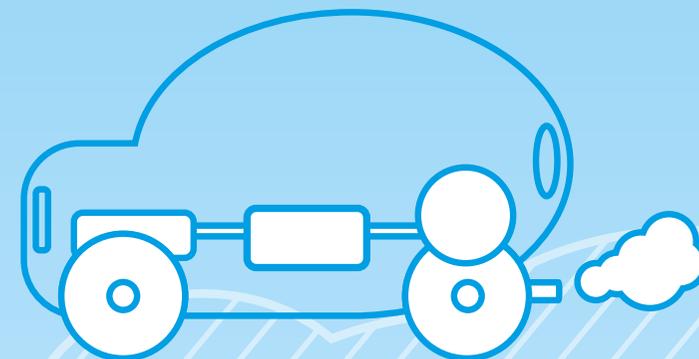
Pile à combustible



“

L'avantage majeur de la pile à combustible est qu'elle ne produit aucun gaz à effet de serre et ne rejette que de l'eau !

”



Direction Régionale de l'Environnement,
de l'Aménagement et du Logement
Bourgogne-Franche-Comté

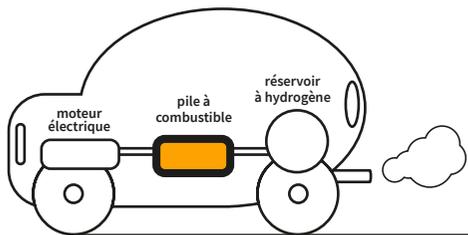
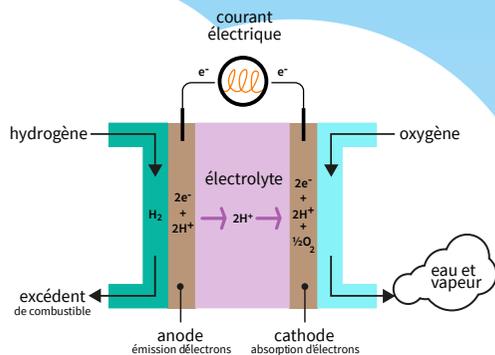
Mission Régionale Climat Air Energie
Département Régulation Air Energie

Principes de fonctionnement

L'hydrogène est le premier élément du tableau de Mendeleïev. C'est l'élément le plus simple dont le noyau ne contient qu'un proton et l'atome qu'un électron. C'est un élément extrêmement énergétique puisqu'un seul kilo d'hydrogène est générateur de trois fois plus d'énergie qu'un kilo d'essence.

La première pile à combustible et son principe sont établis en 1838 par un chimiste allemand se basant sur des recherches datant de quelques années déjà. Le premier prototype industriel sera réalisé par un ingénieur français (les prototypes seront réutilisés et améliorés par la NASA). Cette technologie prend plus d'ampleur notamment lors des chocs pétroliers et les problèmes environnementaux pressants, menant à son adaptation aux véhicules.

Une pile à combustible est constituée de deux électrodes : une anode et une cathode, séparées par un liquide électrolyte qui permet d'empêcher le passage des électrons. Dans l'anode, de l'hydrogène contenu dans un réservoir sous hautes pressions, est injecté et dans la cathode, c'est l'oxygène de l'air qui est injecté. Il se passe alors le phénomène inverse de l'électrolyse de l'eau : du dihydrogène H_2 va se séparer en deux molécules d'hydrogène ionisées après avoir réagi avec deux électrons. Les ions positifs H^+ traversent ensuite le liquide électrolytique et atteignent la cathode où des électrons circulent également. Là, une réaction entre le dioxygène, les électrons et les ions H^+ va former de l'eau et de la chaleur (par exothermie de la réaction). L'électricité ainsi produite va alimenter un moteur électrique qui va se charger de mettre en mouvement les roues motrices puis revenir en circuit fermé (les électrons ne peuvent passer à travers l'électrolyte). Le modèle de la pile à combustible va dépendre de la température de fonctionnement (qui dépend elle-même de l'électrolyte utilisé).



Ce qu'il se passe exactement dans la pile à combustible

À l'anode entrée d' H_2 du réservoir à hydrogène. H_2 réagit avec l'anode pour créer des électrons (qui partent vers le moteur électrique pour l'alimenter) et des ions H^+ qui traversent l'électrolyte au milieu.

À la cathode les H^+ arrivent et il y a une entrée d' O_2 de l'air qui vont réagir avec les électrons qui reviennent (boucle fermée) depuis le moteur pour former de l'eau H_2O et de la chaleur (par exothermie des réactions).

Avantages

L'avantage majeur de la pile à combustible est qu'elle ne produit aucun gaz à effet de serre (à condition que l'hydrogène soit produit par électrolyse en employant uniquement des énergies renouvelables ou obtenu en tant que sous produit dans la fabrication d'autres éléments) ni aucun polluant (la $PàC$ ne rejette que de l'eau !).

Un autre avantage est la production de chaleur lors du procédé d'électrolyse inversée qui peut être en partie réemployée pour chauffer l'habitacle en hiver. Les $PàC$ sont par ailleurs à rendement élevé (50 à 70 % sans prendre en compte la récupération de chaleur), sans odeur, sans danger (compte tenu des technologies actuelles) et silencieuses.

Inconvénients

La réaction est rendue possible par la présence d'une membrane humide en polymère, mais ce fonctionnement est impossible en dessous de $0^\circ C$ et au-dessus de $85^\circ C$. Deux systèmes (de refroidissement et de chauffage) permettent de rester dans cette plage de températures. Des catalyseurs en platine, pour accélérer les réactions, sont parsemés sur la membrane, rendant cette technologie assez chère.

De même, pour purifier l'air aspiré et rendre l'oxygène pur, il faut un second catalyseur. Ces technologies ont des coûts élevés et ne sont donc pas accessibles à tous (les premiers acheteurs sont donc les entreprises).

Sans compter que, malgré toutes les avancées technologiques, l'hydrogène a mauvaise image : risque de fuite, gaz qui se répand vite, explosif et difficilement obtenu parfois. S'il est obtenu par reformage de combustions fossiles, il émet des gaz à effet de serre et des polluants (CO_2 , NO_x et CO principalement) lors de son processus de fabrication et perd son utilité environnementale. La faible densité de l'hydrogène par rapport à l'air entraîne la nécessité d'un grand espace de stockage et une forte pression pour le comprimer (200 bars généralement).

Pour transporter l'hydrogène, il faut en moyenne 20 fois plus de camions-citernes que pour transporter une même quantité d'essence (en équivalent énergétique) par exemple et cela entraîne des émissions de gaz à effet de serre aussi (si ces camions ne sont pas électriques). Comme cette technologie n'a jamais eu de réel essor à travers les décennies, il existe encore trop peu de stations de distribution (notamment car celles-ci entraînent de lourds investissements en amont).

Pour palier les coûts d'investissement nécessaires à l'émergence de cette technologie, des coalitions de constructeurs se regroupent pour diminuer les coûts et les états financent parfois une partie (par subventions directes ou baisse de fiscalité). Au contact de l'eau, l'anode et la cathode s'abîment. Une technologie a été mise en place à MinesParisTech où l'eau est stockée au milieu des électrodes dans un compartiment hermétique, ce qui permet d'obtenir une pile réversible – qui recrée de l'hydrogène avec l'eau et l'oxygène – et d'augmenter l'autonomie et la durée de vie de la pile. De plus les coûts des électrodes sont moindres puisqu'elles nécessitent une technologie moins pointue.

Plus en détail

La batterie a un pôle positif et un pôle négatif, le courant électrique se déplaçant du + au - et les électrons, à l'inverse, se déplaçant du - au +. La batterie, aussi appelée accumulateur, est rechargeable (contrairement à la pile). Le moteur électrique consiste en un rotor (fait de bobines recouvertes d'un matériau isolant) entouré d'un stator fixe à l'axe moteur qui génère un champ magnétique (créé par induction ou par des aimants) qui traverse le rotor.

Les théorèmes de Laplace stipulent que lorsqu'un conducteur, soumis à champ magnétique B_1 , est traversé par un courant i_1 , il est alors soumis à une force F perpendiculaire au plan formé par i_1 et B_1 , entraînant le mouvement du rotor. Concernant le stockage de l'énergie dans la batterie, il est similaire au principe d'oxydoréduction : deux cations sont reliés par un pont électrolytique et au moment de la décharge de la batterie, la première électrode libère des électrons par oxydation et l'autre les capte par réduction, créant ainsi une différence de potentiel $\Delta E_p = U_2 - U_1$. Plus ΔE_p sera élevé, plus la tension délivrée par la batterie le sera.

Les batteries lithium-ion sont rechargeables en quelques heures (des pleins accélérés sont aussi possibles) et elles sont recyclables (les composés les plus difficiles à recycler sur une voiture étant les pneus et les composés au lithium-ion sont peu toxiques et recyclables à 100 %). Le moteur électrique chauffe beaucoup moins que le moteur thermique (ce qui peut être un inconvénient en hiver puisqu'une part de l'énergie devra être utilisée pour chauffer l'habitacle), ce qui entraîne une durée de vie supérieure du moteur électrique par rapport au moteur thermique avec des frais d'entretien supérieurs (le seul élément coûteux des véhicules électriques étant les batteries) et in fine, un meilleur rendement (la quasi-totalité de l'énergie transformée en mouvement).

Les différentes méthodes de production du vecteur énergétique électricité :

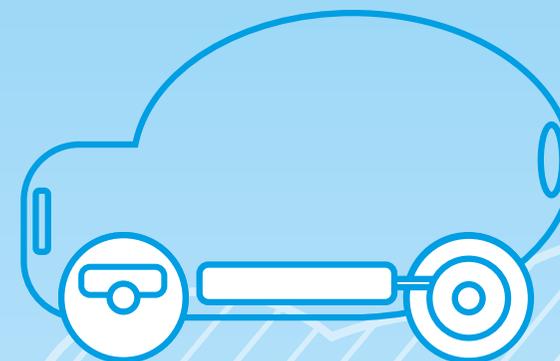
- par raffinement du pétrole, centrale à gaz ou à charbon ou centrale nucléaire, méthodes toxiques et dangereuses pour l'environnement,
- par centrales hydrauliques (l'écoulement d'eau est contrôlé par des turbines et le rendement est élevé),
- éoliennes (électricité générée par une hélice via le vent s'il est supérieur à 18 km/h et en dessous de 90 km/h pour ne pas risquer de détériorer l'éolienne, en mer le vent reste à peu près constant et le rendement varie selon la fréquence et l'intensité),
- ou solaires (panneaux solaires faits en silicium qui sous l'impact des rayons du soleil génèrent de l'électricité ou de miroirs qui font chauffer de l'eau qui va ensuite entraîner des turbines, rendement faible et seulement viable dans des régions ensoleillées), dites méthodes « propres ».

Véhicule électrique à batterie

“

Pas de pollution sonore, de rejets de polluants nocifs, recharge moins chère qu'un véhicule thermique et peu d'entretien nécessaire.

”



**Direction Régionale de l'Environnement,
de l'Aménagement et du Logement**
Bourgogne-Franche-Comté

Mission Régionale Climat Air Energie
Département Régulation Air Energie

Principes de fonctionnement

Le véhicule électrique apparaît fin des années 1830 et à l'époque, il était plus performant que les équivalents thermiques, puis la balance s'inverse au 20^e siècle.

Les 20 dernières années ont apporté des avancées majeures en termes de stockage d'énergie et l'apparition des batteries au lithium-ion (une voiture électrique est beaucoup plus simple à schématiser, la transmission et le moteur sont plus petits et les batteries sont placées de telle manière à répartir les masses idéalement ; si la batterie fait partie du châssis, la tenue de route du véhicule est améliorée puisque le centre de gravité est plus bas). Leur poids allégé et leur petite taille participent à augmenter le rendement énergétique. Ils peuvent délivrer une grande puissance pour une petite fréquence de rotation (d'où les accélérations très rapides).

Le terme véhicule électrique comprend plusieurs techniques de motorisation qui varient en rejet CO2 et en autonomie.

Les voitures hybrides alternent entre moteur thermique et moteur électrique via des batteries rechargeables, grâce à l'alternateur couplé au moteur (avec réemploi de la force de freinage).

Les voitures à prolongateur d'autonomie sont des véhicules électriques dont l'autonomie est prolongée par un stock d'hydrogène ou un petit moteur thermique.

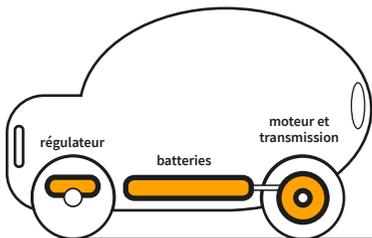
Les voitures entièrement électriques ne reposent que sur un système entièrement électrique, ce qui abaisse fortement leur autonomie et les limite à des utilisations urbaines sur de courts trajets.

D'après certaines estimations, le marché des véhicules électriques représentera 7 % des ventes mondiales en 2020. La France compte à ce jour plus de 85 000 véhicules particuliers électriques. Le déploiement de 7 millions de bornes de recharge électriques est prévu avant 2030 par la loi de programmation de la transition énergétique.

Les batteries utilisées sont principalement des batteries lithium-ion, qui pèsent lourd, coûtent cher et dont la durée de vie est limitée.

L'électricité se transportant facilement, mais se stockant mal (80 fois moins de Wh/kg stocké sur les derniers modèles) : c'est le point de travail le plus important (d'où un couplage intéressant entre hydrogène et électrique).

Les moteurs thermiques actuels ont des rendements aux alentours de 20 % (avec d'importantes pertes de chaleur) mais la densité énergétique massive des carburants étant élevée, l'autonomie des voitures thermiques est importante.



Avantages

Les principaux avantages : pas de pollution sonore, pas de rejets de polluants nocifs, recharge moins chère qu'un véhicule thermique et peu d'entretien nécessaire.

De nouvelles technologies sont expérimentées : le lithium-titanate, le lithium-fer-phosphate, le lithium-air, le lithium-fer, le lithium-fer-polymère, le graphène... qui permettraient d'obtenir des batteries moins chères pour des autonomies supérieures.

Les avancées continuent concernant l'autonomie de ces véhicules qui peuvent aller jusqu'à 400 km aujourd'hui en cycle NEDC soit 300 en conditions réelles (c'est le cas de la Renault Zoé) voir 500 en cycle NEDC (soit 380 en cycle réel) pour l'Opel Ampera-e. La Blue Car utilisée par Auto-lib a une autonomie de 250 km et la Tesla Model X de 300 km (batterie 90 kWh).

Inconvénients

Les problèmes principaux posés par les batteries lithium-ion sont la question du recyclage (les recherches sur cette question étant assez récentes) et de l'extraction du lithium peu favorable à l'environnement (quelques kilos par batterie qui peuvent néanmoins être réemployés car ne sont pas altérés dans la batterie. Les batteries elles-mêmes, peuvent être réutilisées pour stocker de l'énergie).

De plus, les batteries entraînent des risques d'emballement thermique si surcharge de la batterie il y a, ce qui peut être très dangereux (les pompiers reçoivent une formation spécifique et les batteries sont surveillées de près).

Plus généralement, les batteries électriques impliquent des temps de recharge longs et des autonomies plus faibles que les véhicules thermiques (pour le moment). Elles coûtent cher et les bornes sont encore trop peu présentes dans le paysage régional. Sans oublier que les véhicules électriques perdent tout leur intérêt si pour produire l'énergie, on n'utilise pas d'énergie renouvelable.

Pour les voitures électriques, l'autonomie est faible mais le rendement peut atteindre 80 %.

La voiture électrique n'émet en revanche que jusqu'à 100 grammes de CO2/km contre 200 pour les moteurs thermiques. Mais ces émissions dépendent principalement des moyens de production et de stockage de l'électricité.