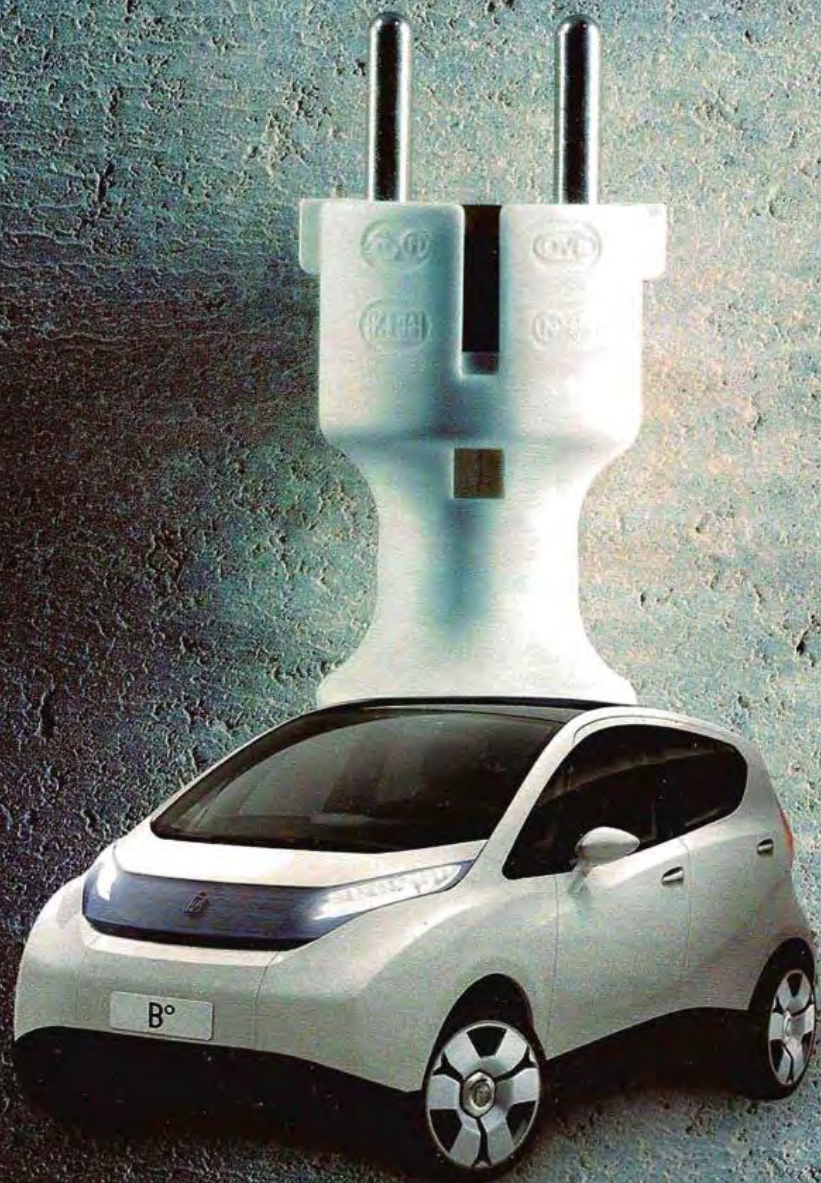


à la une



Roulerons-nous tous bientôt en voiture électrique ? Une chose est sûre : face aux enjeux de l'après-pétrole et de la pollution au CO₂, l'électricité a tout pour s'imposer sous les capots ! Mais avant qu'elle ne signe la voiture de demain, certains défis technologiques doivent encore être relevés. Explications.

AUTOMOBILE

La révolution électrique

Quand ? Comment ? Pourquoi ?

Un pur-sang aux formes rondes et élancées, signées Pininfarina, le plus mythique des carrossiers italiens : voici la Ferrari 599 GTB Fiorano, le rêve automobile concrétisé. Et pourtant, ce n'est pas le bolide qui attire aujourd'hui les visiteurs du Mondial 2008 sur le stand Pininfarina, mais une forme indistincte, cachée sous

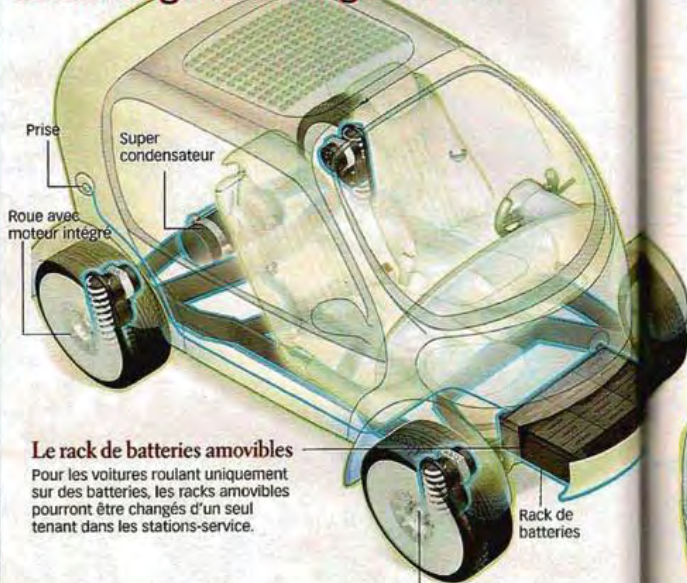
une housse bleue. Qu'y a-t-il dessous ? Peut-être le futur de l'automobile. Un futur dévoilé lors d'une conférence de presse organisée par le constructeur du mystérieux véhicule : l'industriel et PDG d'Havas Vincent Bolloré. Dans une plaquette distribuée, on peut lire que la bête s'appelle la B° et qu'elle est la "solution pour un monde →

Par Pierre Grumberg
et Mathilde Fontez

→ propre: "entièrement électrique", l'"élégante citadine" n'"émet aucun gaz, aucune particule fine". Sans pour autant sacrifier aux performances: si les voitures électriques ne sont pas réputées pour leur endurance, la B⁰ affiche une autonomie respectable de 250 km, avec "une tenue de route hors norme" et des "accélération vigoureuses". Et la durée de vie de la batterie est "de l'ordre de 200 000 km". Personne n'en doute sur le stand: l'heure de la voiture électrique a sonné. D'ailleurs, la B⁰ compte déjà moult rivaux: Toyota, Renault, General Motors, Subaru, Smart et autres présentent au Mondial leur propre "solution pour un monde propre". Le visiteur, en somme, n'aurait déjà plus que l'embaras du choix.

Un mois après ce salon historique, force est de constater qu'aucun des véhicules de cette nouvelle génération ne roule encore. On ne sait même pas combien ils coûteront! Alors? L'automobile électrique ne serait-elle propulsée que par le vent de la communication? Une chose est sûre: si le nombre des projets présentés trahit bien une vague de fond, lancer le véhicule électrique à l'échelle industrielle s'avère plus compliqué que de raccorder un fil à une prise... →

Routière ou citadine, la voiture électrique décollera grâce à 6 organes clés



Le rack de batteries amovibles

Pour les voitures roulant uniquement sur des batteries, les racks amovibles pourront être changés d'un seul tenant dans les stations-service.

La motorisation compacte

Les moteurs électriques deviendront tellement compacts qu'ils ne prendront pratiquement plus de place sous le capot. Mieux encore: sur certains véhicules, ils pourront être directement intégrés dans les roues.

La citadine électrique

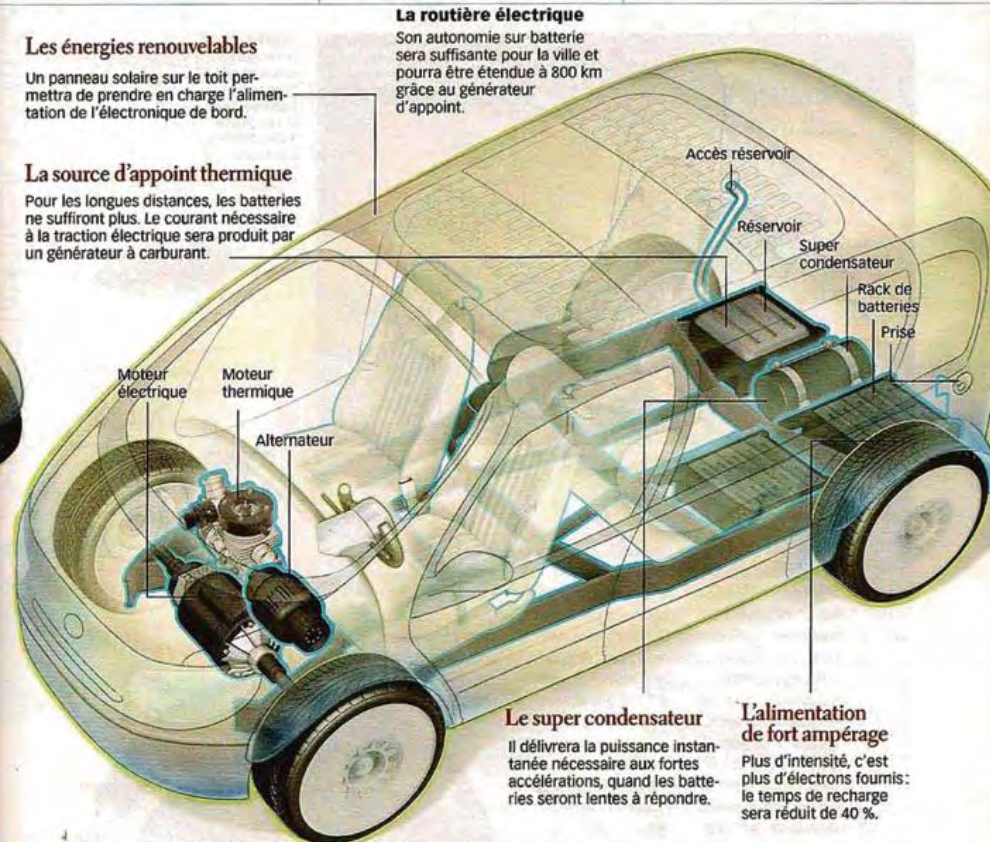
Elle ne parcourra que 50 km maximum par jour: avec une motorisation de faible puissance (5 kW) dans un châssis léger.

Les énergies renouvelables

Un panneau solaire sur le toit permettra de prendre en charge l'alimentation de l'électronique de bord.

La source d'appoint thermique

Pour les longues distances, les batteries ne suffiront plus. Le courant nécessaire à la traction électrique sera produit par un générateur à carburant.



La routière électrique

Son autonomie sur batterie sera suffisante pour la ville et pourra être étendue à 800 km grâce au générateur d'appoint.

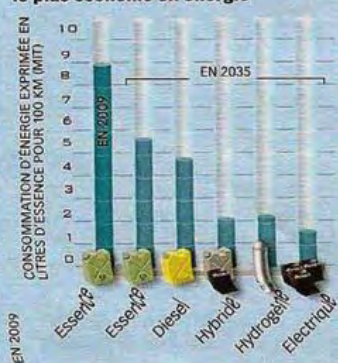
Le super condensateur

Il délivrera la puissance instantanée nécessaire aux fortes accélérations, quand les batteries seront lentes à répondre.

L'alimentation de fort ampérage

Plus d'intensité, c'est plus d'électrons fournis: le temps de recharge sera réduit de 40 %.

Le véhicule électrique est le plus économe en énergie



L'ÉLECTRICITÉ A TROIS ATOUTS :

Jouer sur les forces d'attraction et de répulsion entre un aimant permanent et un électroaimant alimenté par intermittence pour faire tourner un axe: c'est toute l'idée du moteur électrique (voir S&V n° 1025, p. 128). Simple! Et de cette simplicité découle son atout principal: un rendement (la quantité d'énergie

investie restituée en énergie mécanique) supérieur à 90 %, contre 35 % pour un moteur à essence et 40 % au diesel. Pourquoi cette différence? C'est qu'un moteur thermique est une machine à chauffer: les deux tiers de l'énergie contenue dans le carburant sont perdus en chaleur et en frottements, à travers une multitude

d'étages mécaniques, du piston à la boîte de vitesses. Rien de tel avec le moteur électrique. Les quelques pour-cent de pertes s'expliquent par des pertes calorifiques liées au passage du courant dans la bobine de l'électroaimant (effet Joule). Comme tous les moteurs thermiques, le moteur électrique n'échappe pas aux pertes par frotte-

RENDEMENT, ÉMISSIONS ET DISPONIBILITÉ

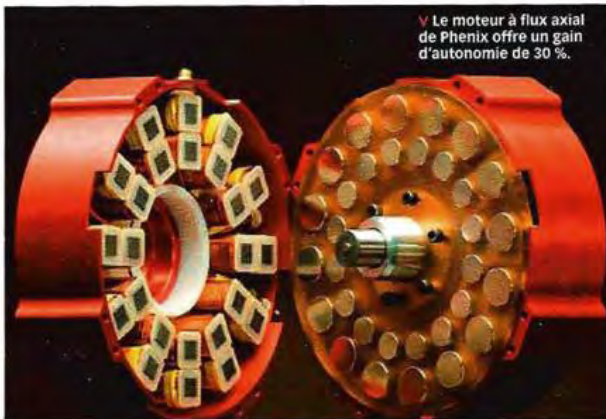
ments, mais celles-ci sont faibles. Car ici, l'axe du moteur tourne directement: pas besoin de convertir le mouvement de haut en bas du piston en mouvement rotatif, comme sur le moteur thermique. Pas besoin, non plus, de boîte de vitesses: un simple mécanisme sait réduire le nombre de tours de moteur en

tours de roue. Même en envisageant une large marge de progression des moteurs thermiques, explique une étude signée par une équipe de chercheurs du MIT parue en juillet 2008, le moteur électrique, à l'horizon 2035, afficherait un net avantage: avec un bénéfice comparable en émissions de CO₂. De quoi faire de la voiture

électrique le fer de lance de la lutte contre l'effet de serre. Avec toutefois des effets variables. En France, où l'électricité est à 80 % d'origine nucléaire et émet donc peu de CO₂, le bilan des émissions d'un véhicule moyen dégringole de 140 à 215 g de CO₂ par km pour une voiture classique à 15 à 20 g/km pour une voiture

électrique. En revanche, l'avantage est moins net (voire disparaît) si l'électricité provient d'une source fossile. Car tirée du charbon, l'électricité devient pire que l'essence! Oui, mais ces émissions de CO₂, étant concentrées, cela facilite leur capture, à la différence des émissions au pot d'échappement... L'ultime grand atout

de l'électricité? Sa disponibilité, bien sûr. Il y a aujourd'hui plus de prises de courant que de pompes à essence. Même si un coûteux effort d'infrastructure sera nécessaire pour permettre, par exemple, de recharger dans la rue et les lieux publics, cet effort s'appuie sur des technologies et des risques maîtrisés.



Le moteur à flux axial de Phenix offre un gain d'autonomie de 30 %.

LE MOTEUR ÉLECTRIQUE PEUT ENCORE PROGRESSER

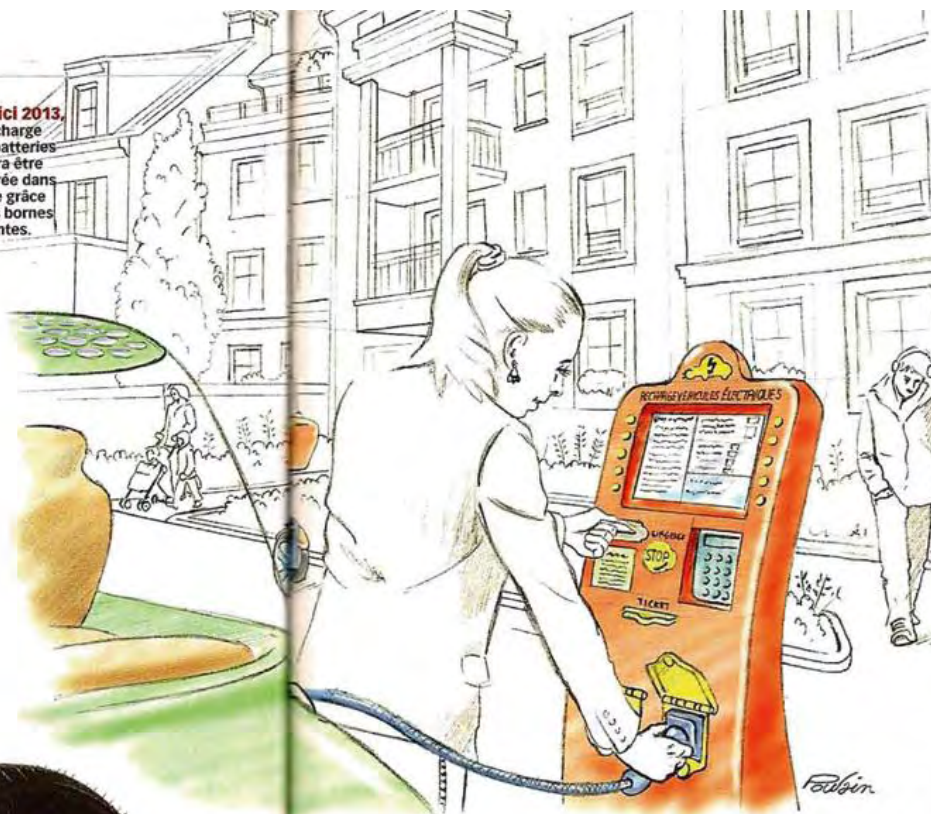
Les moteurs électriques utilisés aujourd'hui pour l'automobile n'ont pas été optimisés pour cet usage: ils viennent d'autres applications industrielles, comme les machines-outils. D'où de gros gains à espérer. Ainsi, en alliant les nouveaux aimants permanents surpuissants à base d'alliage néodyme-fer-bore à une géométrie inédite, la société franco-taise Phenix International est parvenue à concevoir un moteur léger et compact (16 kg pour 30 cm de diamètre et 13 cm d'épaisseur) de 15 kW dit "à flux axial" aux performances remarquables. "L'intérêt est que ce moteur tourne à petite vitesse, ce qui permet l'entraînement direct des roues,

sans mécanisme intermédiaire, explique Michel Roze, directeur général et directeur technique. On obtient ainsi un rendement supérieur à 90 %, qui, associé à un poids divisé par deux par rapport aux moteurs actuels, se transforme en un gain d'autonomie de 30 % environ." Phenix travaille également à un moteur plus puissant. 60 kW (de quoi tracter une Renault Clio) tiennent dans un cylindre de 30 x 30 cm, pour 40 kg. Avec un gain espéré de 20 %. Cette compacité offre même la possibilité d'implanter un moteur dans chaque roue. Cette nouveauté, expérimentée en France par Michelin



Plus compacts, les moteurs peuvent s'intégrer dans les roues.

> D'ici 2013, la recharge des batteries pourra être assurée dans la rue grâce à des bornes payantes.



Au vu de ces formidables atouts, on peut s'étonner que le parc français de voitures électriques se limite à quelques milliers d'unités sur près de 31 millions de voitures! La raison? Elle pourrait d'abord tenir à la réticence des industriels à changer leur modèle de production: "Les constructeurs automobiles sont avant tout des motoristes, glisse un ingénieur spécialiste de la propulsion électrique dans les allées du Mondial. Pour eux, se convertir à l'électricité, c'est perdre leur raison d'être pour devenir de simples assembleurs de pièces sous-traitées."

DES CHIFFRES OBSCURS

Les constructeurs, eux, ont une autre explication impliquant, non le moteur, mais le réservoir (voir article p. 56): "Le problème, c'est la batterie, la batterie et la batterie", martèle André Douaud, directeur technique du Comité des constructeurs français d'automobiles. On ne peut pas lui donner tort... La quantité d'énergie stockée dans une batterie (30 à 200 Wh/kg) est, au mieux, 50 fois inférieure à celle stockée dans un carburant liquide (10 000 Wh/kg)! En pratique, cela signifie que l'autonomie des voitures électriques ne dépasse guère quelques centaines de kilomètres. Bel exemple de l'état de l'art, la Bolloré B⁹ emporte ainsi 30 kWh en un gros rack de 300 kg de batteries (réalimentées en partie par récupération de 80 % de l'énergie de freinage) pour une

→ Ce n'est pas une nouveauté: depuis plus d'un siècle, les ingénieurs connaissent les multiples qualités de la voiture électrique: silence, absence d'émissions polluantes, nervosité... et surtout rendement, c'est-à-dire la quantité d'énergie réellement convertie en effort mécanique. Celui du moteur électrique est exceptionnel: supérieur à 90 %, contre 35 % pour le moteur à essence et 40 % pour le moteur Diesel (voir encadré p. 46). C'est ce paramètre clé qui justifie aujourd'hui l'attention des ingénieurs. Car un meilleur rendement se traduit directement en économies d'énergie. "Il est plus efficace de brûler du carburant dans une centrale pour le transformer en électricité et charger des batteries de voiture plutôt que d'alimenter un moteur thermique, résume Didier

Marginedes, PDG de BatScap, la filiale batteries du groupe Bolloré. Au final, on va trois fois plus loin avec un kWh d'électricité qu'avec un kWh d'essence!" De cette équation simple découlent deux avantages majeurs. D'abord, une réduction des émissions de CO₂

Production, poids, prix, des progrès sont annoncés du côté des batteries

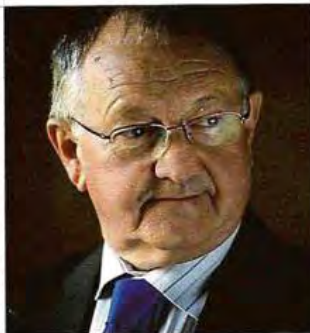
qui font de ce véhicule une solution intéressante pour lutter contre l'effet de serre. Ensuite, pour l'utilisateur, une belle économie: eu égard à la différence du prix du kWh sous forme d'essence à la pompe et de courant au compteur, le kilomètre électrique, explique l'Ademe, revient sept fois moins cher que le kilomètre à essence!

autonomie annoncée de 250 km. Mais ce chiffre s'entend à vitesse stabilisée, ce qui n'a rien à voir avec un usage urbain. Difficile de savoir ce que recouvrent les chiffres donnés par les constructeurs. "L'autonomie peut être amputée jusqu'à 50 % par le fonctionnement des auxiliaires comme le chauffage et le conditionnement →

A.P.E.X. - MICHELIN/TOMAS NICOLAS BUSSON - F.FOULAIN

→ d'air", peut-on ainsi lire dans un rapport encore confidentiel sur les perspectives de l'automobile en 2030, rédigé sous la direction de Jean Syrota, président de la commission énergie du Centre d'analyse stratégique et destiné au ministre des Transports. On comprend mieux pourquoi il est si difficile de faire sortir la voiture électrique de la ville. D'autant plus que, deuxième difficulté, le plein d'électricité exige non pas quelques minutes mais plusieurs heures! La déplorable capacité des batteries serait moins problématique si l'on pouvait en embarquer en quantité. Après tout, un véhicule électrique s'allège de nombre d'équipements propres au moteur thermique: réservoir, pot, boîte de vitesses, et même, pourquoi pas, arbres de transmission grâce au moteur dans la roue (voir encadré p. 48).

Hélas, troisième difficulté, "les batteries sont chères: environ 1 euro du Wh électrique, résume André Douaud. Multipliez par 20 000 pour obtenir la capacité de 20 kWh nécessaire à un petit véhicule pour faire 200 km... Vous constatez tout de suite qu'à 20 000 euros pour les seules batteries, ce véhicule n'est pas vendable. L'objectif des industriels



"L'objectif des industriels est de réduire le prix des batteries par trois"

ANDRÉ DOUAUD, COMITÉ DES CONSTRUCTEURS AUTOMOBILES FRANÇAIS

est aujourd'hui de réduire le prix par trois. Reste à savoir quand ils l'atteindront..." Cette cherté est due en partie à une production embryonnaire: de quoi équiper quelques dizaines de milliers de véhicules! Si les industriels montent déjà en régime, il reste que les effets d'échelle ne suffiront pas à abaisser les tarifs. Car ce sont les composants de la pile même, notamment le cobalt de son électrode, qui coûtent très cher (voir article p. 56).

Autonomie réduite, gros prix pour petites performances... La belle affaire, pourraient rétorquer les statisticiens: l'usage ultramajoritaire de l'automobile n'est-il pas un usage urbain? Selon l'Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité (Inrets), 80 % des déplacements des Français se font dans un rayon de 5 km, avec des distances journalières de 25 à 30 km en moyenne. 75 % des trajets domicile-travail sont assurés en voiture, sur une distance inférieure à 15 km en moyenne... Quant à la vitesse, elle est inférieure en moyenne à 20 km/h en ville et limitée à 130 km/h sur autoroute... Autrement dit, un petit véhicule suffirait, quitte à louer une voiture plus grande à l'occasion. "Le problème, c'est que conduire est plus une affaire de cœur que de tête, résume Stephen Stradling, psychologue des transports à l'université Napier d'Edimbourg (Ecosse). La voiture n'est pas un moyen de transport, c'est un manifeste identitaire." Son choix est régi par des fantasmes: l'automobile "offre la possibilité d'aller où je veux et quand je veux" affirment 95 % des automobilistes britanniques, tandis que 81 % s'accordent sur le fait que l'automobile "donne un sentiment d'indépendance",

conclut une vaste étude comportementale réalisée par Stephen Stradling en 1999. "Peu importe donc que vous n'utilisiez quasiment jamais la possibilité d'aller loin ou d'aller vite, reprend le chercheur. Ce qui compte, c'est que vous le pourriez si vous le vouliez. Regardez comment la publicité vend les voitures: un conducteur solitaire, roulant vite sur une route dans un paysage désolé... Manifestement, avec son autonomie et sa vitesse limitées, une voiture électrique ne vous y emmène pas." Cette

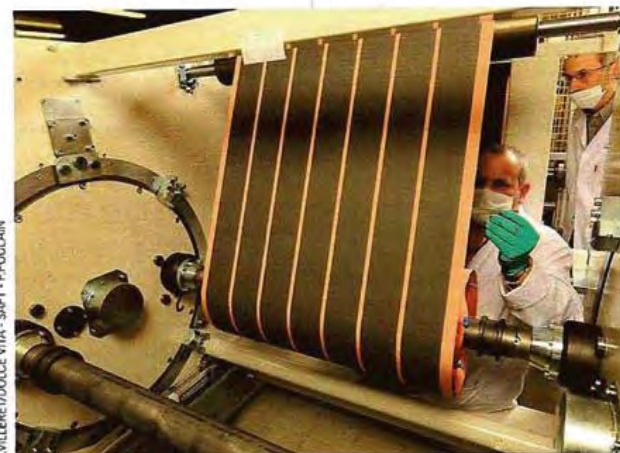
réticence à renoncer au fantasme de la "voiture-liberté" est un frein à ne pas ignorer, même s'il est difficile d'évaluer son impact réel.

L'ÉLECTRICITÉ, IL FAUT LA GÉNÉRER

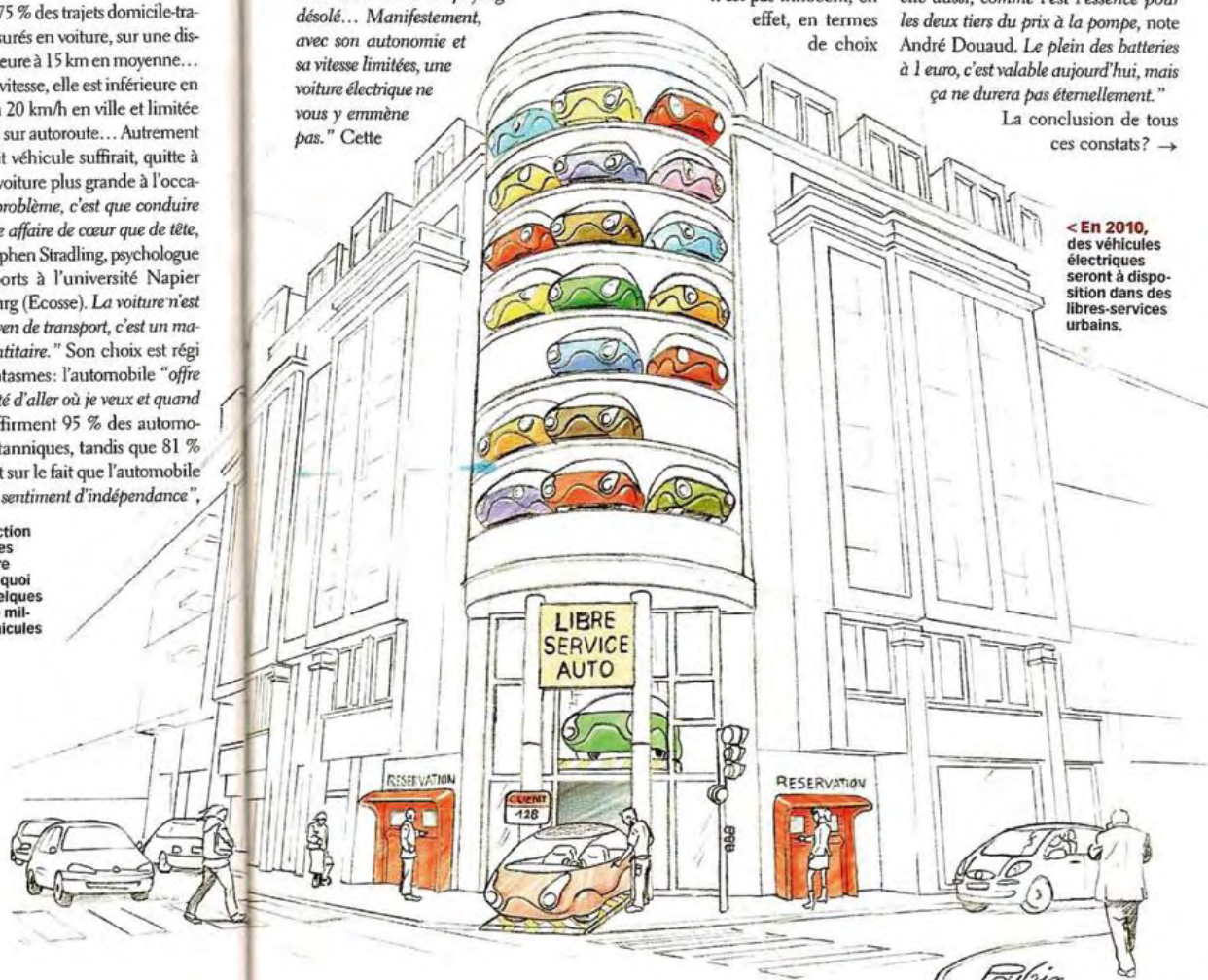
Difficile également d'évaluer l'impact des choix de société qu'impose le véhicule. Opter pour la voiture électrique n'est pas innocent, en effet, en termes de choix

énergétiques. Car l'électricité, il faut la générer! Ce qui n'est pas rien: convertir aujourd'hui 30 millions de véhicules français à l'électricité aboutirait à augmenter d'au moins 25 % le parc actuel de centrales (voir encadré). Quant au prix bas du kWh, il n'est nullement garanti à terme. "L'électricité finira bien par être taxée, elle aussi, comme l'essence pour les deux tiers du prix à la pompe, note André Douaud. Le plein des batteries à 1 euro, c'est valable aujourd'hui, mais ça ne durera pas éternellement."

La conclusion de tous ces constats? →



< La production des batteries reste encore limitée: de quoi équiper quelques dizaines de milliers de véhicules par an.



< En 2010, des véhicules électriques seront à disposition dans des libres-services urbains.

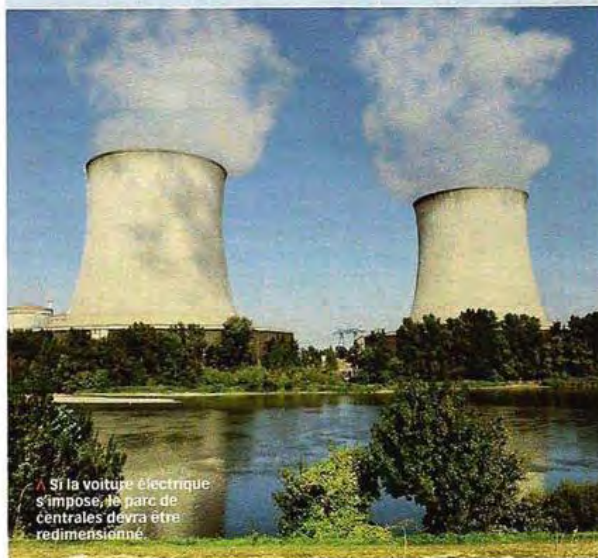
L.VILLERET/DOLCE VITA - SAFT - FROULAIN

DES VOITURES ÉLECTRIQUES AVEC QUELLE ÉLECTRICITÉ ?

Convertir tout ou partie du parc automobile à l'électricité n'est pas une proposition gratuite : pour faire rouler plus de voitures, il faudra évidemment produire plus d'électricité ! Electrifier les 30 millions de voitures françaises nécessiterait l'équivalent de 25 à 50 % de la production électrique française actuelle, soit entre 137 et 275 TWh, selon Jean-Marc Jancovici, ingénieur et consultant spécialisé dans les questions liées au réchauffement global. Voilà qui impliquerait donc de construire 12 à 24 réacteurs nucléaires de 1600 MW du type EPR, ou

d'opter pour le gaz naturel, au prix d'une dégradation du bilan CO₂... Quant à produire l'électricité à base de charbon – solution envisagée en Asie et aux États-Unis – le bilan CO₂ serait ici plus mauvais qu'avec des voitures classiques ! Inacceptable ? Pas forcément. D'abord, parce que tous les véhicules ne seront pas convertis, une bonne partie étant "hybridisée". Surtout, le chiffre ne prend pas en compte les progrès réalisables dans la motorisation électrique et dans la production d'électricité : des centrales à charbon "propres" sont envisageables

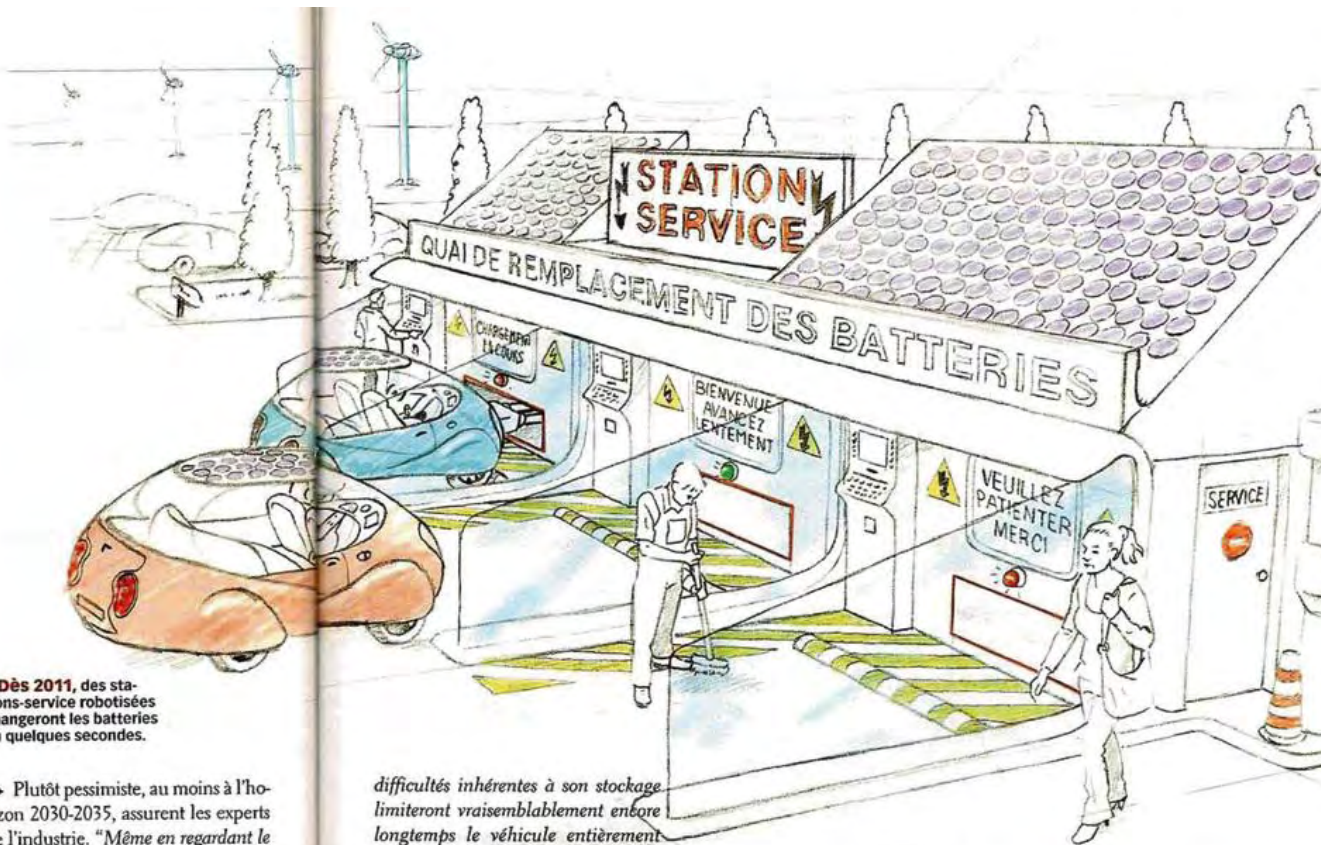
d'ici 2030. Cet effort à consentir en infrastructures apporte par ailleurs des bénéfices : plus besoin d'acquitter l'énorme facture pétrolière liée aux transports routiers, soit 13 milliards d'euros pour la France en 2007. Il n'en reste pas moins qu'opter pour telle ou telle source d'électricité pose des questions de stratégie globale, d'autant plus épineuses que les décisions d'aujourd'hui engagent pour des décennies... A ceux qui hésitent, Jean-Marc Jancovici propose une solution universelle, sans risques, et non polluante : rouler moins.



Si la voiture électrique s'impose, le parc de centrales devra être redimensionné.

→ Plutôt pessimiste, au moins à l'horizon 2030-2035, assurent les experts de l'industrie. "Même en regardant le problème des batteries sous un angle optimiste, le véhicule électrique n'est pas compétitif dans le contexte d'un marché de masse", conclut un rapport prospectif sur l'automobile à l'horizon 2035 publié en avril 2008 par Matthew Kromer et John Heywood, chercheurs du Massachusetts Institute of Technology (MIT, Boston), pour qui une "autonomie relativement modeste" de 200 miles (320 km) impliquerait un rack de batteries prohibitif tant en masse (l'énergie perdue à déplacer ce pack ruine les gains de rendement) qu'en prix (de 7000 à 10000 dollars de surcoût par voiture, impossible à amortir même sur quinze ans d'exploitation). "L'électricité constitue la seule source d'énergie qui permet d'éviter les émissions polluantes locales, mais les

> Dès 2011, des stations-service robotisées changeront les batteries en quelques secondes.



difficultés inhérentes à son stockage limiteront vraisemblablement encore longtemps le véhicule entièrement électrique à des flottes captives ou à un usage urbain", résume pour sa part le rapport Syrota.

LA SOLUTION : L'HYBRIDATION ?

La voiture électrique ne serait-elle donc, au final, qu'une utopie coûteuse pour centres-villes ? Tout le monde ne partage pas cette vision. D'abord, parce que tous les rapports s'accordent à donner à l'électricité une place centrale, à condition de l'hybrider. L'idée est fort simple : dimensionner le nombre (donc le coût et le poids) des batteries pour satisfaire à l'essentiel des besoins (des trajets courts), avec possibilité de recharge en stationnement (plug-in). Et pour les longs trajets occasionnels, ajouter un moteur thermique, capable ou de recharger les batteries, ou d'alimenter

directement le moteur électrique. Au final, un fonctionnement entre 60 et 70 % électrique. Incarné dans la Volt de Chevrolet, l'"hybride plug-in" ou "hybride rechargeable" emporte les suffrages des prospectivistes. "Ce véhicule, qui cumule les avantages du thermique et de l'électricité, a toutes les chances d'être le véhicule de l'avenir", proclame ainsi le rapport Syrota. Les analyses du MIT démontrent, elles, que cet "hybride plug-in" présente les meilleures perspectives d'amortissement à long terme.

Que l'hybride ait un bel avenir, nul n'en doute aujourd'hui. Reste que le moteur électrique pur n'a pas dit son dernier mot. Car de tous récents progrès pourraient lui permettre de →

"Autonomie et vitesse limitées... la voiture électrique ne fait pas rêver"

STEPHEN STRADLING, PSYCHOLOGUE DES TRANSPORTS À L'UNIVERSITÉ NAPIER, ÉCOSSE



→ décoller. Une première surprise, en effet, semble s'annoncer du côté du secteur industriel des batteries. "Tant en capacité de production, qu'en termes d'autonomie, de poids et de prix, les informations que nous recevons d'Asie montrent que l'on peut attendre des progrès significatifs dans les 18 mois à venir", confie Philippe Chican, directeur de programmes du pôle "Véhicule du futur" qui fait le lien entre industrie et recherche en Alsace et Franche-Comté. Difficile de chiffrer l'ampleur du "progrès significatif". "Mais le financier américain Warren Buffett, au flair réputé, vient d'investir massivement en Chine. Cela mérite considération." Et les batteries ne sont pas, loin de là, le seul secteur de progrès pour améliorer l'autonomie, souligne Philippe Chican: "Les moteurs électriques, par exemple, n'ont jamais été vraiment optimisés pour l'automobile." Or, il y a là des gains formidables – de 20 à 30 % d'autonomie – à réaliser (voir encadré p. 48).

RÉVOLUTION CONCEPTUELLE ?

Par ailleurs, à ces progrès techniques s'ajoutent des progrès conceptuels. Ainsi, les ingénieurs du projet international Better Place envisagent dès 2011 de louer les racks de batteries interchangeables en quelques secondes dans des stations-service robotisées. L'avantage d'une telle proposition, d'ores et déjà retenue en Israël et au Danemark, est double: rendre plus acceptable le surcoût des batteries et allonger l'autonomie, au prix d'un changement de rack tous les 150 km environ. Renault, partenaire de Better Place, travaille ainsi déjà à une version électrique de sa Mégane. Quant aux réticences psychologiques, il est possible de les vaincre grâce à une politique d'encouragement, à l'image du bonus de 5 000 euros accordé en France depuis fin 2007 pour l'achat d'un véhicule électrique.

Dans ces conditions, la vraie question désormais est: quand? La réponse est entre les mains des constructeurs. Que valent vraiment les projets présentés au Salon? "Il ne s'agit pas pour nous d'une astuce marketing, assure Patrick Pélata, directeur général délégué de Renault. Nous pensons réellement que nous sommes à la veille d'une rupture qui va transformer toute l'industrie automobile." Les objectifs de Renault sont ambitieux: de 20 000 à 40 000 véhicules en 2011, puis 100 000 dès 2012. Même enthousiasme (mais non chiffré) chez GM, qui joue, il est vrai, une partie de sa survie sur le succès de la Volt, en production fin 2010. La concurrence, elle, reste... prudente, misant plutôt sur l'hybride, au besoin Diesel comme PSA. "Les grands constructeurs hésitent à s'engager tant que la disponibilité des batteries n'est pas garantie et qu'ils n'ont pas de marché assuré, explique Philippe Chican. La baisse récente du pétrole n'aide pas non plus..." Les projets publics comme Autolib (4 000 voitures en libre-service dans Paris et sa couronne d'ici fin 2010) devraient créer un premier appel d'air autour d'un usage urbain limité. 2010 et 2011, pour toutes ces raisons, seront des années révélatrices. La suite n'est pas encore écrite. "Si le moteur électrique répond bien aux besoins de l'Europe occidentale, il est inadapté aux pays en développement où l'infrastructure électrique est à créer", souligne ainsi André Douaud. Ce qui est certain, c'est que la France, de par son parc nucléaire, possède à la fois un kWh bon marché et exempt de CO₂ qui en font un terrain favorable et pourrait lui donner une place de leader, au moins pour un temps. Car la Chine a, elle, quelques atouts à faire valoir: le Tibet renfermerait 50 % des réserves mondiales de lithium, cet or blanc indispensable aux batteries du futur. De quoi regarder la géopolitique sous un autre angle.

L'OFFRE ACTUELLE PRÉPARE L'AVENIR

La voiture électrique est une belle promesse sur papier glacé. Mais que vaut-elle aujourd'hui? Nous avons fait le tour de l'offre, déclinée au futur, présentée au Mondial de l'auto. Et pris les commandes d'un prototype... Bilan? C'est facile, confortable, silencieux... Tellement qu'il faut prévenir les piétons!

TEST

Premières impressions au volant de la Cleanova II

Enfin, je vais essayer une voiture électrique. Il s'agit de la Cleanova II de SVE: un Kangoo de Renault, équipé de batteries lithium-ion.



Sur le tableau de bord, la jauge d'essence est remplacée par un compteur qui indique l'autonomie de la batterie. Elle n'est pas au maximum, mais il me reste plus de 100 km. Je tourne la clé... rien. Mais c'est normal: le moteur est totalement silencieux.

C'est parti. La conduite est très agréable: pas de vitesse à passer (il n'y a pas de boîte), une nervosité surprenante. Je m'amuse avec la petite aiguille qui indique, sur le tableau de bord, l'impact de ma conduite sur ma consommation. Elle

pointe dans le rouge lorsque j'accélère et tourne au vert lorsque je ralentis. Mieux, elle indique quand je recharge ma batterie. Quand je relâche l'accélérateur, je ne suis pas en roue libre: je ralentis... et recharge mes accus! En descente, pour les derniers mètres jusqu'au feu rouge... les occasions sont fréquentes. Je me prends au jeu, j'essaie de garder le plus souvent la petite aiguille dans le vert. Mais attention à regarder la route: une piétonne se

< Pas de levier de vitesse, pas de bruit. Et chaque freinage recharge la batterie.

jette quasiment sous mes roues. Comment a-t-elle pu ne pas me voir, à 2 mètres? C'est simple: elle ne m'a pas entendue... Je suis dangereusement silencieuse. Remise de ces émotions, un petit coup d'autoroute avant de rentrer. Rien à dire: insertion, vitesse de pointe. La voiture se comporte sans problème, jusqu'à 130 km/h. Pas plus: elle est bridée, il faut dire qu'au-delà, l'autonomie de la batterie serait sérieusement réduite. Retour au garage. Pas de doute, j'ai conduit une vraie voiture, pas un jouet. Et je reprends ma vieille voiture qui fume, vibre, pollue... en attendant mieux. M.F.



▲ B⁰ de Bolloré: une vraie quatre places compacte avec 200 km d'autonomie.

> Volt, de Chevrolet: une berline hybride à recharger dans son garage.

▲ F-city, de Fam (au milieu): trois places conçues pour le libre-service urbain.

▲ M.go, de Microcar: une citadine sans permis à deux places.

Au Mondial en 2008, dans les rues en 2010...

Comme les 1 432 972 visiteurs – record battu – ont pu le constater fin octobre à Paris, le Mondial de l'automobile 2008 faisait la part belle à la voiture électrique. Pas moins d'une trentaine de modèles présentés, de toutes formes, tailles, puissances et origines, tout électriques ou

hybrides. Mais cette profusion ne doit pas cacher la réalité: les voitures présentées en sont à l'état de concept, au mieux de prototype. L'offre en France se limite à des voitures comme la Scarlette de Tender (à partir de 15 000 euros). Pour bénéficier d'une "vraie" voiture, il

faudra attendre en fait 2010, voire 2011. On verra alors émerger trois grands types de véhicules: les "citadines" (M.go de Microcar, de 16 000 à 20 000 euros), les "compactes" (B⁰ de Bolloré/Pininfarina, de 20 000 à 25 000 euros) et les "berlines" (comme l'hybride

plug-in Volt de Chevrolet, autour de 30 000 euros). Ceux qui hésitent à investir pourront toujours expérimenter une quatrième catégorie plus abordable: celle des petites urbaines à louer (F-City de Fam Automobiles) dans les services de type Autolib qui verront le jour d'ici fin 2010.

Les 6 défis de la batterie

Si, actuellement, la batterie lithium-ion est la meilleure des candidates en lice, elle devra relever six challenges pour s'imposer. Car ses concurrentes sont nombreuses. Sachant que la batterie idéale n'existe pas encore.

Une voiture classique, c'est un moteur ultracomplexe et un réservoir simplissime. Une voiture électrique, c'est l'inverse. Si l'on sait en effet fabriquer des moteurs électriques performants depuis plus de cent ans, la bonne batterie – endurante, légère et bon marché – tient toujours de l'utopie. Faut de perle rare, les chercheurs ont cependant un candidat sérieux : la batterie lithium-ion, ou Li-ion.

Présentée en 1970 par le chimiste américain Stanley Whittingham, cette batterie tire son intérêt du lithium, un élément compact qui permet de stocker énormément de charge sous forme d'ions lithium sur les électrodes. Pour le reste, le fonctionnement ressemble à celui de toutes les batteries : après avoir libéré un électron qui génère le courant électrique, les ions

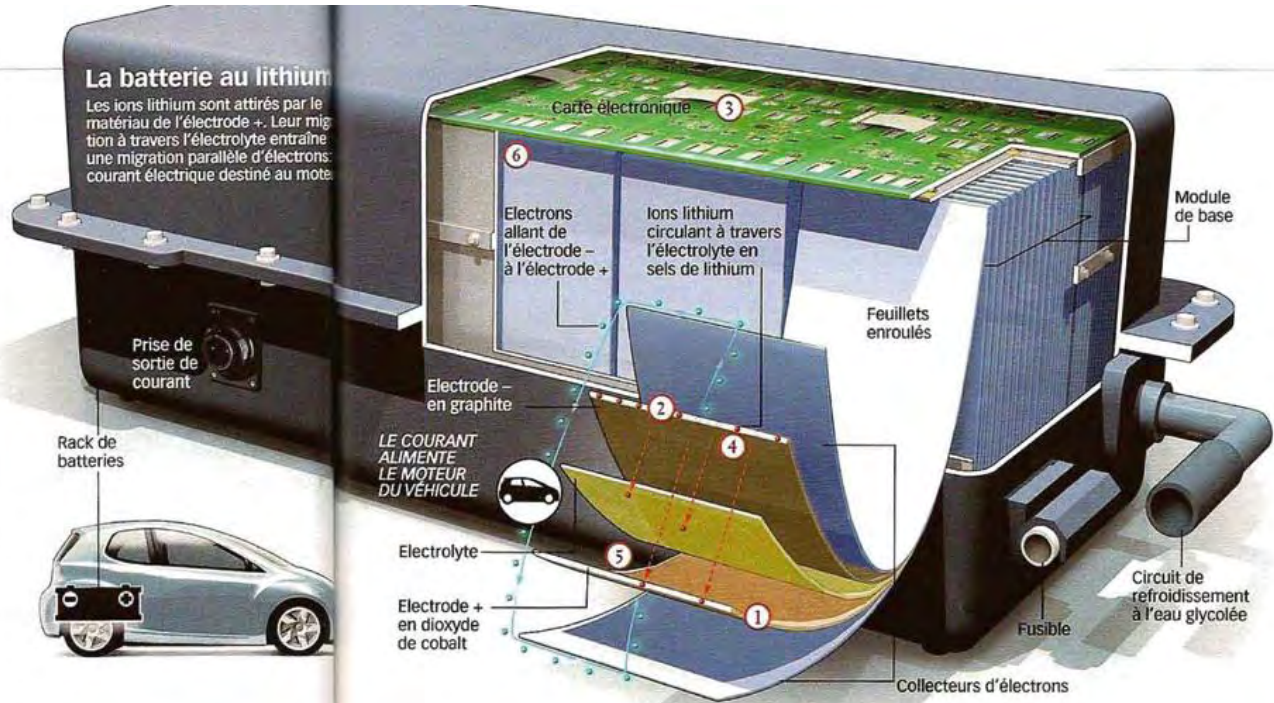
le nickel-cadmium, 2,5 fois plus que le nickel métal hydrure. Mais c'est encore très loin des 10000 Wh/kg des carburants liquides ! Augmenter la densité sera donc le premier des défis scientifiques (voir défi n° 1). Mais ce n'est pas le seul. Si la durée de vie des batteries électriques correspond maintenant à celle des voitures, leur temps de chargement reste long : de six à huit heures ! Il faudra le raccourcir (voir défi n° 2). Autre inconvénient majeur : la propension du lithium à déclencher des courts-circuits explosifs (voir défi n° 3). Ces problèmes réglés, il faudra trouver les matières premières nécessaires à la production de masse, alors que le lithium est compté (voir défi n° 4). Puis, abaisser les coûts pour rendre les véhicules compétitifs (voir défi n° 5). Car pour l'instant, la

Quelle que soit la batterie du futur, elle sera forcément un compromis

lithium, stockés sur l'électrode négative en graphite, traversent la paroi centrale de la batterie, ou électrolyte, et s'agglutinent sur l'électrode positive en dioxyde de cobalt.

Aujourd'hui, rien ne vaut la batterie lithium-ion : sa densité énergétique (le rapport énergie/masse) varie entre 160 et 200 Wh/kg, soit six fois plus que le plomb, quatre fois plus que

batterie électrique coûte au mieux 500 €/kWh, soit trois fois plus que ne l'exigent les cahiers des charges des constructeurs automobiles. Enfin, implanter les filières de recyclage sera un plus industriel appréciable (voir défi n° 6). Ces challenges sont-ils insurmontables ? Non, car "le lithium s'allie avec toutes sortes de matériaux. Il y a donc un nombre incroyable



La batterie au lithium

Les ions lithium sont attirés par le matériau de l'électrode +. Leur migration à travers l'électrolyte entraîne une migration parallèle d'électrons : courant électrique destiné au moteur.

1 Le défi de l'autonomie...

Une électrode + chimiquement plus stable permettrait de stocker davantage de charge.

2 ... de la charge 3 ... de la sécurité

L'électrode - de graphite supporte mal un chargement trop rapide.

La température doit être maintenue à 25 °C grâce au refroidissement à eau et à une surveillance électronique.

4 ... de la matière première

Le lithium, matière première de la batterie électrique, n'existe qu'en quantité limitée.

5 ... du coût

Le cobalt, trop cher, pourrait être remplacé par le phosphate de fer ou d'autres matériaux.

6 ... du recyclage

Les composants les plus coûteux doivent être impérativement récupérés.

d'électrodes meilleures que celles en graphite et en cobalt", s'amuse Michel Armand, spécialiste des batteries à l'université d'Amiens. Cependant, il n'y aura pas de miracle. "Pour abaisser par exemple le temps de chargement, on doit augmenter la puissance, ce qui limite la densité énergétique. Car si les ions Li+ doivent traverser très rapidement l'électrode, ils ne peuvent être trop nombreux", résume Sébastien Martinet, spécialiste des batteries au CEA. Autonomie, puissance, temps de rechargement, prix... Aux chercheurs de jongler avec ces paramètres. Mais ils sont résignés : la batterie qui prendra place dans la voiture électrique sera de toute façon un compromis. M.F.

AMÉLIORER LA DENSITÉ ÉNERGÉTIQUE

L'autonomie de la voiture électrique dépend de la densité énergétique. Celle-ci est liée aux matériaux utilisés et à leur capacité à contenir le plus possible d'ions lithium par quantité de masse. Avec une électrode positive en oxyde de manganèse, voire de nickel (LiMnO₂, LiNiO₂), d'autres technologies pourraient faire mieux que la batterie Li-ion et ses 200 Wh/kg. "Ces

composés améliorent la stabilité de l'électrode et donnent accès à des densités énergétiques plus élevées. Actuellement, nous en sommes à cent cycles de charge à 250 Wh/kg. Et nous pourrions atteindre près de 350 Wh/kg d'ici cinq à sept ans!", assure Sébastien Martinet, spécialiste des batteries au CEA. Autre espoir, l'électrode lithium-soufre pourrait atteindre une densité de

500 Wh/kg, mais au prix d'une stabilité défallante : on risque une dissolution dans l'électrolyte. Et la batterie devient inutilisable après cent cycles de charge... L'espoir à long terme reposera-t-il alors sur une électrode positive révolutionnaire : l'air ambiant ? De fait, une fois lâchés par l'électrode négative, les ions Li+ traverseraient l'électrolyte et, au contact de l'air, formeraient un

oxyde. Et ici, en théorie, la densité atteindrait 1000 Wh/kg. L'ennuie, c'est que cette batterie merveilleuse refuse... de se décharger : l'oxyde de charge... de lithium reste stable et les ions ne veulent pas repartir. Reste une dernière voie : celle d'une électrode nanoarchitecturée à base d'oxyde de manganèse, qui aurait pour mérite, en engageant l'oxygène, de rendre le lithium moins rétif.

RACCOURCIR LE TEMPS DE CHARGEMENT

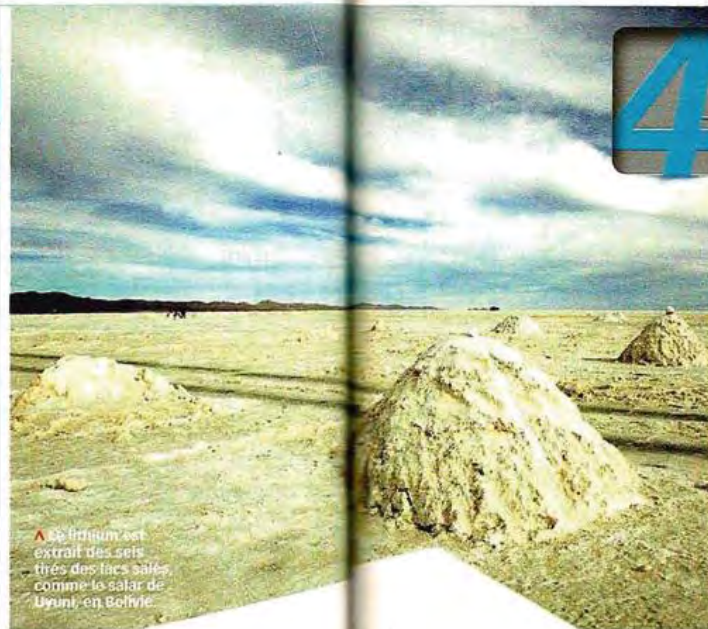
2

Actuellement, les constructeurs estiment le temps de chargement entre cinq et huit heures : huit avec une prise classique de 16 ampères, cinq avec la prise 32 ampères destinée à l'alimentation des appareils de cuisson. En effet, plus il y a d'électrons, plus le transfert de charge est rapide. Avec un courant de 200 ampères, il serait possible, en principe, de recharger une voiture du type de la B0 de Bolloré en moins d'une heure. Mais ce serait au détriment de la durée de vie des batteries. Car dans le cas d'une recharge rapide, les ions Li⁺ arrivent en masse à l'électrode négative. Ils n'ont plus le temps de reprendre leur place entre les pans de graphite et se déposent à la surface. Ils forment alors une couche de lithium sous forme métallique, qui réduit la capacité de la batterie. Il faut donc trouver LA bonne intensité. Celle qui donnera accès à la recharge la plus rapide, sans dégrader la batterie. Pour cela, pas d'autre choix que le tonnerement. Et les possibilités sont multiples : recharge à courant constant, par paliers d'intensité, par impulsions...

Et tout dépend de la technologie de batterie. Un vrai casse-tête, qu'EDF s'efforce de résoudre, avec un objectif : "Charger la batterie à 50 % en une demi-heure, résume Cédric Lewandowski, directeur de la division transport et véhicule électrique. Nous venons d'effectuer un premier test grandeur nature sur les batteries lithium-cobalt. Les résultats définitifs ne sont pas encore tombés, mais ce qu'on sait déjà est encourageant." Pour abaisser le temps de chargement à une minute, la seule solution est de changer l'électrode négative de graphite. Pour ce faire, une candidate semble tout particulièrement prometteuse. Elle est composée d'oxyde de titane, un matériau dont la structure permet une meilleure insertion des ions Li⁺. De deux à trois minutes suffiraient pour la recharger à 100 % ! Or, sur des batteries, les performances en charge se retrouvent en décharge. Cette électrode répond donc très favorablement aux appels de puissance, un grand atout supplémentaire. Seul point noir : sa densité énergétique ne dépasse pas 130 Wh/kg.



« Le temps de recharge est lié en partie à l'intensité du courant fourni. »



▲ Le lithium est extrait des sels thés des lacs salés comme le salar de Uyuni, en Bolivie.

3

RENFORCER LA

Agressif, le lithium : il peut ronger l'électrolyte, et finit, en reliant les deux électrodes, par provoquer un court-circuit, avec risque d'incendie et d'explosion. La parade ? Coincer le lithium entre les feuillets d'une électrode de graphite. Satisfaisante pour les téléphones et les

ordinateurs, la batterie lithium présente encore, cependant, des risques de combustion inacceptables pour une voiture. Les fabricants mettent donc au point des barrières de sécurité. En plus de séparateurs entre électrodes, les batteries sont bardées de capteurs qui surveillent tension et

SÉCURITÉ SANS NUIRE À LA VITESSE

température, de fusibles et autres coupe-circuit. Reste que cela aboutit à une coûteuse sophistication. Du coup, le groupe Bolloré a choisi une autre solution : la batterie dite "lithium-polymère". Cette technologie a été développée dans les années 1990 par l'entreprise canadienne Hydro-Québec, dont la filière de Bolloré, BatScap, a racheté les brevets. Son

principe : prévenir les courts-circuits avec un électrolyte solide en polymère. Ainsi, il n'y a aucun risque que des particules de métal traversent l'électrolyte pour former un pont entre électrodes. Sûre et peu coûteuse, cette batterie fait des envieux. Mais elle présente deux gros inconvénients. D'abord, elle exige 60 °C pour fonctionner. En

dessous, la réaction chimique refuse de se lancer... Une température élevée qui coûte en chauffage : ce sont tout de même 300 kg de batterie qu'il faudra porter à 60 °C avant d'espérer pouvoir démarrer la voiture ! Du coup, la densité énergétique descend à 100 Wh/kg seulement. Ensuite, la batterie lithium-polymère serait paresseuse, répon-

dant mollement quand l'automobiliste appuie sur l'accélérateur. BatScap semble toutefois avoir résolu le problème par l'ajout dans ses circuits de supercondensateurs, dispositifs de stockage physique (et non chimique comme les batteries) à faible densité énergétique, mais capables de délivrer instantanément le courant demandé.

4

TROUVER DES MATIÈRES PREMIÈRES EN ABONDANCE

Un marché de 60 millions de véhicules en 2008, 15 kg de lithium dans une voiture électrique. Le calcul est simple : remplacer le thermique par l'électrique équivaudrait à consommer en un an près d'un million de tonnes de lithium. Un chiffre à comparer aux... 25000 tonnes de lithium produites en 2007 et, surtout, aux ressources mondiales exploitables, évaluées à seulement 11 millions de tonnes par l'USGS (Service de géologie des États-Unis). La batterie Li-ion est-elle alors condamnée d'avance par une pénurie de matière première ? Tout dépendra des énormes gisements non exploités en Australie, au Canada, en Afrique et surtout

au Tibet, dont les stocks sont encore inconnus. Mais même s'ils étaient insuffisants, la ressource ne manquerait pas forcément. Il est en effet envisageable de tirer le lithium de... l'eau de mer. On l'y trouve en concentrations infimes (0,17 g/m³), mais en quantités colossales à l'échelle des océans : 200 milliards de tonnes ! Comment l'extraire et à quel prix ? Les chercheurs s'activent sur le sujet, notamment en Asie : Chine, Corée, Taïwan, Japon... A noter que le recyclage pourrait également subvenir en partie aux besoins (voir défi n° 6)... dès qu'une première génération de batteries sera arrivée en fin de vie. Et si, vraiment,

toutes les solutions étaient épuisées, il reste possible d'imaginer des batteries... sans lithium. Une équipe israélienne travaille en ce moment sur des batteries à base de magnésium, qui présente l'avantage d'être, lui, très abondant sur Terre, mais avec des performances encore très limitées. C'est donc de la biomasse que pourrait finalement venir la solution : "Par l'action d'enzymes, il est possible d'obtenir des molécules électrochimiquement actives, qui pourraient atteindre les mêmes performances que la batterie lithium-ion", s'enthousiasme Jean-Michel Tarascon, qui travaille sur le sujet au laboratoire d'Amiens.

ABAISSER LES COÛTS

5

Tout irait mieux si elle n'était pas si chère: la batterie Li-ion coûte jusqu'à 500 €/kWh, alors que les cahiers des charges de constructeurs automobiles imposent un maximum de 200 €/kWh. A quoi tient ce prix élevé? Au collecteur de courant en cuivre, à l'électrolyte, aux organes de sécurité et surtout au cobalt, qui représente 50 % du poids de l'électrode positive: 90 euros le kilo avant l'effondrement boursier de janvier 2008. Ce n'est pas une question de rareté (selon le Cobalt Development Institute, le stock est suffisant pour cent à trois cents ans), mais de spéculation. Les chercheurs sont donc partis en quête d'un nouveau type d'électrode. "On sait que, vu son prix, le cobalt ne prendra jamais place dans une voiture électrique, tranche Michel Armand. Or les matériaux candidats au remplacement ne sont pas nombreux: fer, manganèse, aluminium. Une électrode positive à le vent en poupe: elle est composée de phosphate de fer. Elle devrait être trois fois moins chère que celle en cobalt et sa stabilité thermique laisse espérer de pouvoir réduire les équipements de sécurité (notamment les dispositifs électroniques - voir défi n° 3). Seul inconvénient: sa faible densité énergétique, de l'ordre de 150 Wh/kg. Cela ne l'empêche pas d'être très attendue. Quelques entreprises, comme le taïwanais Phisiang Energy Technology (PHET) ou les américains Valence et A123, commencent déjà à la fabriquer, mais seulement en petites séries. D'abord, parce qu'il n'y a pas encore de demande. Mais aussi parce qu'il faut organiser la production. Si les procédés de fabrication sont bien rodés pour les batteries de téléphones, pour les voitures, les puissances en jeu n'ont rien à voir. Le démarrage industriel, très net en Asie, contribuera également à une baisse des coûts.



> Le cobalt fait l'objet d'une spéculation qui le rend trop coûteux pour l'industrialisation.

DR - LOWETTE DIMITRE/UNICORE - BALLARD



▲ Le recyclage thermique des batteries Li-ion implique de réchauffer les composants jusqu'à 1000 °C.

6

ORGANISER LE RECYCLAGE

Avec des matériaux précieux ou relativement rares comme le lithium et le cobalt, mettre en place le recyclage aussi complet que possible est capital pour que l'équation industrielle des batteries Li-ion soit viable. Les nouvelles de ce côté sont plutôt bonnes. "Les solutions de recyclage sont prêtes pour l'arrivée de la voiture électrique", assure ainsi Farouk Tedjar, président de l'entreprise Recupyl, spécialisée dans le recyclage des batteries. Tout n'est pas décidé pour autant. Car deux voies sont en compétition: la voie thermique et la voie

chimique. Le premier procédé est utilisé par la Société nouvelle d'affinage des métaux (SNAM), et offre, selon ses promoteurs, les meilleurs taux de valorisation: "86 % de la batterie et 100 % des métaux sont recyclés", assure Frédéric Salin, directeur des ventes. Mais la technique est gourmande en énergie car les matériaux sont chauffés à des températures très élevées, jusqu'à 1000 °C. Efficace, donc, mais déplorable pour le bilan CO₂, global de la filière électrique! A l'opposé, l'entreprise Recupyl a mis au point un procédé non thermique, basé

sur la séparation des divers éléments, au travers de différents bains remplis de réactifs chimiques. "Ses avantages: une faible consommation d'énergie, peu d'émissions de CO₂, et une grande flexibilité", détaille Farouk Tedjar. Oui, mais les performances sont moins brillantes: 68 % de la batterie est recyclée et 98 % des métaux. Et si les batteries, en dépit de l'intérêt économique qu'elles présentent, finissent malgré tout dans la nature? Au moins, pas de métaux lourds à craindre, comme le plomb et le cadmium. Mais il reste le cobalt, soupçonné d'être cancérigène...

LA PILE À COMBUSTIBLE PEUT-ELLE RIVALISER AVEC LA BATTERIE?

Parmi les concurrents de la voiture électrique, la voiture à air comprimé peine à atteindre des rendements crédibles. Les biocarburants, eux, se heurtent aux cultures alimentaires, en attendant l'arrivée de végétaux nouveaux comme les microalgues. Mais suffiront-ils à alimenter les besoins de la planète? Reste le tandem hydrogène et pile à combustible (PAC). En sa faveur, l'autonomie: les bonnes d'hydrogène à 700 bars garantissent déjà 500 kilomètres, performance hors d'atteinte avec des batteries. A sa charge, le coût. Cata-

lyseur platine (10 à 25 grammes, soit environ 800 euros), membranes, conditionnement: tout coûte cher dans la PAC. Du coup, les quelque mille véhicules à hydrogène qui roulent actuellement valent chacun plusieurs centaines de milliers d'euros... L'autre travers de l'hydrogène est qu'il n'existe pas dans la nature à l'état libre: il faut le produire, ce qui grève le rendement CO₂ de la filière. En principe, le rendement de la voiture à PAC équivaut à celui de la voiture à batteries, deux fois meilleur que celui de la voiture thermique.

Sauf que l'hydrogène est alors tiré du méthane, une ressource fossile... Y a-t-il une autre filière? Oui, celle de l'électrolyse de l'eau. Mais elle consomme de l'électricité... Et le rendement de la PAC devient alors pire que celui du moteur thermique. "Question de bon sens, résume Cédric Lewandowski, directeur des projets voiture électrique chez EDF. Produire de l'hydrogène avec de l'électricité pour générer à nouveau du courant dans la voiture sera toujours moins rentable que l'utilisation directe d'électricité via une batterie."

> La pile à combustible est plus performante mais beaucoup plus chère qu'une batterie Li-ion.

