



4. LE REQUIN À CORNES est l'un des animaux les plus anciens, chez qui l'on a identifié des lymphocytes T, les agents de l'immunité cellulaire.

Les immunologistes ont longtemps cru que l'immunité cellulaire était apparue avant l'immunité humorale. Toutefois, les greffes de peau ne sont rejetées qu'après plusieurs semaines par l'organisme des requins ; on en a déduit que, chez les requins, l'immunité cellulaire – si elle existe – n'est ni très efficace, ni très spécifique. Certains ont alors pensé que les requins étaient dépourvus de lymphocytes T.

Pour le savoir, nous avons recherché des lymphocytes T chez le requin à cornes. Pour prouver l'existence de ces cellules, il nous fallait identifier leurs récepteurs d'antigènes. Nous avons échoué, jusqu'au jour où nous avons utilisé la méthode d'amplification des gènes, ou PCR, une technique qui produit des millions de copies d'un petit fragment d'ADN. Récemment nous avons isolé, chez la raie, les quatre classes de récepteurs d'antigènes des lymphocytes T de mammifères, et nous pensons qu'elles existent aussi chez le requin.

La caractérisation d'une de ces classes de récepteurs a montré qu'ils sont presque aussi diversifiés que chez l'homme. Autrement dit, contrairement aux gènes codant les anticorps, les gènes codant les récepteurs des lymphocytes T semblent n'avoir quasiment pas évolué depuis le moment où les requins ont divergé de la lignée qui a abouti aux mammifères, il y a envi-

ron 450 millions d'années. L'ensemble des gènes codant les anticorps et celui des récepteurs des lymphocytes T auraient divergé d'un ancêtre commun.

À mesure que nous caractérisons le génome des requins et des animaux apparentés, nous découvrons de nombreux ensembles de gènes. Ainsi, on a découvert un groupe de gènes qui ressemblent à la fois aux gènes qui codent les anticorps et à ceux qui codent les récepteurs des lymphocytes T. Les gènes de ces ensembles subissent des mutations à un rythme accéléré.

Certains gènes de groupes différents se seraient mélangés et réassociés au cours de l'évolution. Ces échanges (chaque individu a des centaines de groupes, chacun contenant d'innombrables gènes) auraient favorisé l'apparition de nouveaux groupes de gènes. Peut-être découvrirons-nous encore de nouveaux récepteurs du système immunitaire du requin.

En raison de ces échanges, certains gènes sont redondants chez le requin : des segments V, D1, D2 et J identiques se regroupent de façon répétitive sur divers chromosomes. Ces recombinaisons, associées à d'autres mécanismes génétiques spécifiques du requin, permettent l'élaboration rapide de nouvelles familles de récepteurs. Chez les mammifères, les segments géniques sont présents sur un seul des chromosomes, et il y a peu de redon-

dance structurelle, de sorte que ce type de recombinaison est rare.

De surcroît, la duplication de segments géniques – l'existence de multiples segments V, D et J, une caractéristique du système immunitaire des mammifères – ne semble être apparue qu'au prix de l'introduction et du maintien de nombreuses séquences d'ADN non fonctionnelles. Au contraire, chez les requins et les raies, les éléments non fonctionnels sont rares et disparaissent sans doute rapidement du génome.

Parce qu'ils sont les représentants vivants d'une lignée ancienne, les requins et les animaux apparentés sont peut-être les seuls vestiges des systèmes immunitaires primitifs. Ces poissons qui ont été les témoins d'un moment clé de l'évolution nous permettront peut-être, un jour, de préciser les éléments qui ont engendré un système aussi efficace, voire plus, que l'armure du placoderme.

Plusieurs questions restent posées : quelles modifications du milieu ont fait apparaître des agents pathogènes qui ont ensuite tant modifié l'organisation des gènes qui codent les anticorps ? Le système immunitaire est-il conçu pour évoluer rapidement ? L'étude des vertébrés préhistoriques et des différences entre les mammifères contemporains le fait penser. Si cette hypothèse se confirme, nous devons revoir nos concepts sur l'adaptation et sur la sélection naturelle.

Gary LITMAN est professeur de biochimie et de biologie moléculaire à la Faculté de médecine de Floride du Sud.

Louis DUPASQUIER, *Evolution of the Immune System*, in *Fundamental Immunology*, troisième édition, sous la direction de William E. Paul, Raven Press, 1993.

Charles JANEWAY, *La détection des intrus*, in *Pour la Science*, n° 193, novembre 1993.

Gary W. LITMAN, Jonathan P. RAST, Michael J. SHAMBLOTT et al., *Phylogenetic Diversification of Immunoglobulin Genes and the Antibody Repertoire*, in *Molecular Biology and Evolution*, vol. 10, n° 1, pp. 60-72, janvier 1993.

Simona BARTL, David BALTIMORE et Irving L. WEISSMAN, *Molecular Evolution of the Vertebrate Immune System*, in *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 91, n° 23, pp. 10769-10770, 8 novembre 1994.

Les véhicules électriques

DANIEL SPERLING

Les véhicules électriques sont aujourd'hui aussi performants que les véhicules à essence. Les consommateurs les adopteront-ils ?

Dans les pays industrialisés, les automobiles sont responsables de la moitié de la consommation de pétrole. Elles émettent la moitié des polluants urbains et rejettent le quart des gaz à effet de serre. Le nombre de véhicules ne cesse d'augmenter : sans une réaction rapide, les coûts économique et sanitaire seront exorbitants. Le pétrole, par exemple, deviendra inévitablement plus rare et plus coûteux.

Quatre solutions sont envisageables : la restriction de la circulation des véhicules, l'amélioration du rendement et la réduction des émissions des moteurs à essence, la généralisation de carburants plus propres et la mise au point de systèmes de propulsion moins polluants. Les trois premières solutions sont irréalistes ou peu efficaces. Seule la quatrième, avec la mise au point de véhicules électriques, résoudra durablement les difficultés.

La restriction de la circulation automobile, qui réduirait notamment les embouteillages, se heurte à l'hostilité des automobilistes du monde entier. En Europe de l'Ouest, où le prix moyen du carburant est supérieur à cinq francs par litre, où les transports en commun sont bien développés et où la densité de population est élevée, 80 pour cent des déplacements sont effectués à bord de voitures particulières. Aux États-Unis, la part des transports en commun et du covoiturage n'a cessé de reculer depuis la Seconde Guerre mondiale.

L'amélioration des rendements des moteurs n'a pas permis d'économies notables de carburant depuis dix ans. Les carburants de substitution, méthanol, gaz naturel ou gaz de pétrole liquéfié, ne réduisent pas non plus énormément les émissions polluantes : les compagnies pétrolières amélioreraient déjà la formulation de l'essence pour que sa combustion pollue moins.

En revanche, des véhicules à propulsion électrique ne pollueraient presque pas. Les améliorations récentes de leurs performances, de leur rendement et la réduction de leur prix leur permettent aujourd'hui de concurrencer les véhicules à essence. Néanmoins, face à la position bien établie de ces derniers, les industriels et les gouvernements devront unir leurs efforts pour que les consommateurs bénéficient financièrement des avantages environnementaux des véhicules électriques.

Circuler sans polluer... ou presque

On nomme «véhicule électrique» des véhicules alimentés par des batteries que l'on charge à partir du réseau électrique, ou bien des véhicules hybrides, qui produisent eux-mêmes leur électricité. Leurs rendements sont supérieurs à ceux des véhicules à essence, ils polluent moins que ces derniers. Dans un véhicule à moteur thermique, celui-ci tourne en permanence : il entraîne les roues, par l'intermédiaire d'une boîte de vitesses et d'un embrayage, et un alternateur qui alimente les accessoires électriques. Dans un véhicule électrique, le moteur est relié directement aux roues motrices : la consommation est nulle à l'arrêt et dans les descentes, ce qui accroît le rendement total d'environ un cinquième. En outre, le système de freinage actif, qui transforme

1. LE VÉHICULE ÉLECTRIQUE Tulip a été conçu par le Groupe PSA Peugeot Citroën pour la circulation urbaine. Sa vitesse maximale de 75 kilomètres à l'heure permet de s'insérer normalement dans la circulation. Il est court grâce à l'absence de coffre à bagages, mais il accueille confortablement deux personnes. Fabriqué en matériaux composites, ce véhicule est léger, ce qui augmente son autonomie.



le moteur en générateur lors des décélérations, récupère jusqu'à la moitié de l'énergie cinétique du véhicule : c'est un avantage important en ville, où les conducteurs doivent sans cesse freiner et accélérer.

Enfin, le rendement de la conversion en énergie motrice de l'énergie stockée à bord du véhicule est supérieur à 90 pour cent, alors qu'il plafonne à 25 pour cent dans les moteurs thermiques. Même si les accumula-

teurs sont chargés à partir de centrales thermiques, dont le rendement n'est que de 30 à 40 pour cent, le gain net d'un moteur électrique sur un moteur à explosion est de cinq pour cent. Il augmentera encore lorsque le rendement des centrales thermiques atteindra 50 pour cent, grâce à de nouvelles techniques, telle la génération par cycles combinés, qui récupère l'énergie aujourd'hui dissipée sous forme de chaleur. Lorsque, comme en

France, la majorité de l'électricité est produite par des centrales nucléaires, la pollution atmosphérique est supprimée (bien qu'éventuellement remplacée par une pollution radioactive). Enfin les piles à combustible qui produisent de l'électricité directement à bord du véhicule en brûlant de l'hydrogène ont un rendement encore supérieur et ne polluent pas (sous réserve que la production d'hydrogène ne pollue pas).



PSA Peugeot Citroën

Les véhicules électriques résoudront les problèmes de pollution urbaine de l'air en déplaçant les zones d'émission des polluants : les véhicules à essence rejettent ces derniers partout où ils circulent, tandis que la pollution associée à la production d'électricité est localisée autour de centrales, généralement construites en dehors des centres urbains. Il est aussi plus facile de réduire la pollution de quelques centrales électriques que celle de plusieurs millions de véhicules. La généralisation des véhicules électriques supprimerait les émissions de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures, et réduirait celles d'oxydes d'azote. Elle accroîtrait peut-être faiblement les émissions d'oxyde de soufre et de particules, autour des centrales thermiques à charbon. La pollution liée à la fabrication des batteries et des moteurs électriques est négligeable.

Dans les régions où les centrales électriques ne polluent pas l'atmosphère (qu'elles soient hydroélectriques, solaires, éoliennes ou nucléaires), les véhicules électriques apporteront une amélioration certaine. La France et la Californie sont les deux principaux exemples, la première car son électricité est surtout d'origine nucléaire, la seconde car son électricité provient en majeure partie de centrales au gaz naturel sévèrement contrôlées, et de centrales hydroélectriques et nucléaires.

L'autonomie, un obstacle ?

L'une des principales limitations à l'adoption des véhicules électriques provient des batteries. Celles qui sont

aujourd'hui disponibles sont coûteuses et elles ne permettent qu'une autonomie maximum de 150 kilomètres en vitesse stabilisée. Cet obstacle n'est toutefois pas insurmontable : un marché existe pour des véhicules de faible autonomie, et des modèles de batteries plus performants apparaissent.

Selon une enquête que nous avons réalisée en Californie, la moitié des foyers qui possèdent plus d'une voiture (la majorité des foyers des États-Unis, et qui achètent 70 pour cent des voitures neuves) modifieraient aisément leurs habitudes de conduite de manière à utiliser une seconde voiture dont l'autonomie serait inférieure à 180 kilomètres. De nombreuses personnes interrogées accepteraient même une autonomie plus faible, compensée par les effets bénéfiques sur l'environnement et par les avantages de la recharge à domicile (beaucoup de personnes détestent fréquenter les stations-service). En France, 90 pour cent des conducteurs se déplacent quotidiennement d'une distance inférieure à l'autonomie d'un véhicule électrique.

De toute façon, les accumulateurs seront bientôt remplacés, au moins en partie, par d'autres composants : supercapacités, volants d'inertie et piles à combustible. Les supercapacités ont été mises au point dans le cadre de programmes de recherche militaires. On les obtient en éliminant les petites imperfections du film isolant qui sépare les électrodes des condensateurs classiques, responsables de fuites de charges. De nouveaux matériaux permettent aussi

d'empiler des feuilles de carbone et des électrolytes liquides. Les supercapacités stockent ainsi plus de 50 000 joules dans un volume d'un litre et délivrent une puissance de trois kilowatts par litre. De petits modèles équipent déjà des calculatrices, des montres et des rasoirs électriques.

Les volants d'inertie stockent l'énergie sous forme d'énergie cinétique de rotation d'un rotor. Ils ont été utilisés pour la première fois dans les transports dans les années 1950 : des autobus qui en étaient équipés desservaient la ville d'Yverdon, en Suisse ; ils relançaient leurs rotors à chaque arrêt. Les volants d'inertie ont considérablement évolué depuis : des rotors en matériaux composites tournent aujourd'hui à près de 100 000 tours par seconde dans le vide ; leur vitesse n'est limitée que par la tension de rupture de leur jante. Les frottements sont atténués par des paliers magnétiques, qui ne dissipent que dix pour cent de l'énergie en quatre jours.

Les premiers véhicules commerciaux équipés de volants d'inertie et de supercapacités devraient apparaître vers l'an 2000. Ces dispositifs, qui peuvent fournir de l'énergie rapidement, seront utilisés pour les pointes de puissance, lors des accélérations ou des ascensions ; des batteries assureront le fonctionnement régulier du véhicule. Cette association permettra l'utilisation d'accumulateurs moins encombrants, moins puissants et dont la durée de vie sera augmentée.

Du carburant pour l'électricité

Toutefois, même selon les prévisions les plus optimistes, les nouveaux systèmes ne stockeront jamais les 1 800 000 kilojoules que contient un réservoir de 50 litres d'essence. C'est pourquoi de nombreux ingénieurs ont prévu que le véhicule électrique du futur serait hybride : il avancerait grâce à des moteurs électriques, mais l'électricité serait produite à bord par un petit moteur à combustion interne. La puissance moyenne nécessaire sur autoroute n'étant que de dix kilowatts, un moteur thermique relativement petit suffirait. En outre, les dispositifs de stockage se rechargeraient pendant que le véhicule roulerait à vitesse constante et se déchargeraient rapidement lors des

Les véhicules électriques réduisent la pollution (variations des émissions en pourcentage)					
	HYDROCARBURES	MONOXYDE DE CARBONE	OXYDES D'AZOTE	OXYDES DE SOUFRE	PARTICULES
FRANCE	-99	-99	-91	-58	-59
ALLEMAGNE	-98	-99	-66	+96	-96
JAPON	-99	-99	-66	-40	+10
ROYAUME-UNI	-98	-99	-34	+407	+165
ÉTATS-UNIS	-96	-99	-67	+203	+122
CALIFORNIE	-96	-97	-75	-24	+15

2. LA GÉNÉRALISATION DES VÉHICULES ÉLECTRIQUES à accumulateurs réduirait la pollution urbaine. La pollution produite par les centrales électriques augmenterait toutefois légèrement, surtout dans les pays qui sont principalement alimentés par du charbon et du pétrole, tels les États-Unis et le Royaume-Uni.