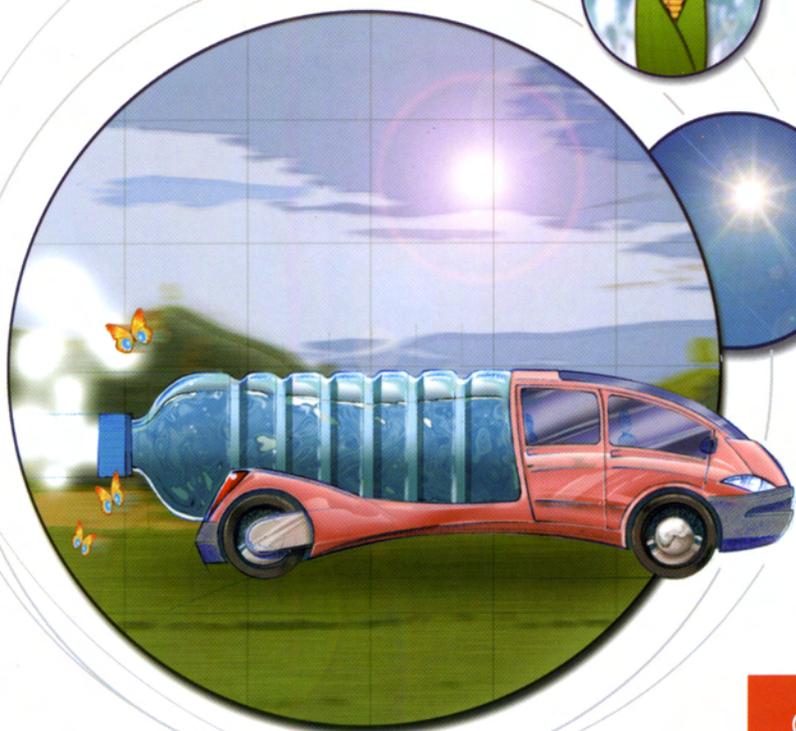




FRANÇOIS ROBY

Vers la voiture sans pétrole ?



Vers la voiture sans pétrole ?

FRANÇOIS ROBY

OUVRAGE DIRIGÉ PAR FRÉDÉRIC DENHEZ

ILLUSTRATIONS DE THOMAS HAESSIG



17, avenue du Hoggar – P.A. de Courtabœuf
B.P. 112, 91944 Les Ulis Cedex A

Publié avec le concours du Centre National du Livre.

Conception de la maquette et de la couverture : Zoé production

Illustration de couverture : Thomas Haessig

Imprimé en France

ISBN : 2-86883-874-X

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2006

*À mon père,
qui essayait de me faire croire
que sa DS avait une consommation
négative en descente.*

SOMMAIRE

Introduction.....	7
Partie I : Chaleur, mouvement, énergie	
Chapitre 1. De la puissance motrice du feu.....	15
Chapitre 2. Force, énergie, puissance : clarifions le débat !.....	27
Chapitre 3. Comment l'énergie mécanique est-elle utilisée ?.....	37
Partie II : La concurrence des énergies	
Chapitre 4. Un démarrage interminable.....	53
Chapitre 5. Quand la combustion devient interne.....	59
Chapitre 6. L'électricité ou l'impossible idéal.....	67
Chapitre 7. Le pétrole ou l'aubaine provisoire.....	75
Chapitre 8. D'autres candidats ?.....	81
Partie III : La logique de l'hybridation	
Chapitre 9. Des besoins très inconstants.....	99
Chapitre 10. Taxinomie temporaire et approximative.....	117
Chapitre 11. Un pari industriel risqué.....	125
Chapitre 12. Un accueil contrasté.....	149
Partie IV : Expériences	
Chapitre 13. En route vers l'inconnu.....	155
Chapitre 14. Mesures.....	163
Chapitre 15. Quelles pollutions ?.....	187
Partie V : Prospective	
Chapitre 16. Les progrès asymptotiques des moteurs thermiques.....	197
Chapitre 17. L'hybridation à géométrie variable.....	227
Chapitre 18. La voiture électrique.....	241
Conclusion.....	267

INTRODUCTION

L'humanité est mobile. Une petite fraction tout au moins, ayant les moyens de cette liberté et pour qui le transport ne se conçoit plus que motorisé. Objet emblématique de ce luxe : la voiture automobile, ou simplement l'« automobile » même si les bateaux, avions, trains et motocyclettes méritent tout autant cet adjectif substantivé. Certes, il arrive que l'auto soit de moins en moins mobile, quand chacun décide d'utiliser la sienne sur les mêmes voies et aux mêmes heures que « les autres ». L'automobiliste devient alors libre de se déplacer dans un habitacle insonorisé, climatisé voire désodorisé, à la vitesse d'un cycliste tranquille.

La rationalité de son usage en toutes circonstances a beau poser problème, l'automobile symbolise toujours la liberté, et il faut bien reconnaître que s'en passer totalement reste encore en nos contrées une possibilité réservée pour l'essentiel à des classes urbaines souvent aisées, pouvant bénéficier de modes de transport collectif denses et efficaces. Mais tout le monde n'habite pas au centre de Paris, dont le réseau de transport en commun est exemplaire... pourvu qu'on parte du centre

ou qu'on s'y rende. Allez expliquer à l'agriculteur de Haute-Vienne, voire au grand banlieusard qui n'a pas la chance – ou la possibilité, car tout cela se monnaie – d'habiter à proximité d'une station de RER qui le conduira à son travail, que sa voiture est un luxe ! Quant au provincial urbain ayant la chance de vivre dans une ville pas trop encombrée, entourée de paysages dont il aime contempler les changements au cours des saisons, quel est son souhait le plus commun ? Faire construire une villa « à la campagne », entendez à portée raisonnable d'automobile de son lieu de travail, si possible dans un village sans trop de paysans à cause des odeurs de fumier, des cris du bétail et des traces de boue laissées par les tracteurs sur la chaussée, le contraignant à décrotter son véhicule plus souvent qu'il ne le souhaiterait, malgré l'affection qu'il lui porte.

Soyons réalistes : même en faisant le bilan objectif (et sévère) des maux et des coûts (budget des particuliers, infrastructures, pollution et accidents) qu'elle engendre, trop d'entre nous ont goûté à la liberté quasi sans limite procurée par ce mode de transport individuel pour que l'automobile puisse être considérée aujourd'hui comme une espèce menacée. Pire, au moment où nous autres riches commençons à percevoir les limites et aberrations d'un mode de vie de plus en plus dépendant de cette boîte à roues, les Chinois sont en train de délaisser leurs pittoresques vélos pour posséder (ou être possédés par ?) des automobiles ! Et ils ne sont pas les seuls : dans le monde entier, en Inde et ailleurs, il semble que le souhait le plus ardent de toute personne accédant à un certain niveau de richesse soit, après avoir investi dans une simple motocyclette, de sillonner routes et pistes au volant d'une « véritable » automobile. Qui sommes-nous pour leur jeter la pierre, nous qui sommes capables de déplacer avec nous largement plus d'une tonne d'acier, de plastiques et matériaux divers pour ramener à la maison deux cent cinquante grammes de baguette achetés à moins d'un kilomètre, éventuellement alourdis de quelques croissants ?

Oui mais voilà : on nous affirme que tout cela ne peut pas durer. La mobilité individuelle sans limite c'est bien, mais c'est mal si tout le

monde se met à la revendiquer. Premier problème : l'huile de roche, la *petra oleum* puante et noire que chacun connaît sous le nom de pétrole, et qu'on a toujours pensé pouvoir traiter par le mépris à cause de son prix dérisoire bien qu'elle soit la source quasi unique de notre mobilité, se met à avoir des prétentions de produit de luxe. Oh, nous en sommes encore loin, et même avec des records récents à plus de soixante-dix dollars le baril (une soixantaine d'euros) c'est encore un vil prix à payer pour l'usage universel de cette aubaine géologique. On a même connu, en dollars constants, pire situation en 1980 voire au tout début de l'ère pétrolière, dans les années 1860. N'empêche, la tendance est bien plus durable que par le passé et surtout de nature différente : ce sont bien les capacités de production qui coïncident, face à une demande galopante. De plus, les réserves s'amenuisent à un rythme inquiétant, et même si quelques experts (de moins en moins convaincus) tempèrent en rappelant que selon les estimations des années 1970 le pétrole devrait déjà être épuisé, ils savent bien que les dernières découvertes de champs géants remontent à trente ans et que depuis vingt ans, on consomme deux fois plus de pétrole qu'on n'en trouve. En octobre 2005 au cours d'une émission télévisée¹, Thierry Desmarests, patron de Total, suggérait du bout des lèvres qu'on pourrait peut-être, éventuellement si c'est nécessaire, envisager d'aller extraire le brut extra-lourd des sables bitumineux du nord de l'Alberta au Canada (qui comme le goudron de nos routes, ne daigne couler qu'à chaud) en s'aidant de grandes quantités de vapeur sous pression produite par... une centrale nucléaire construite pour l'occasion. Parce qu'il le vaut bien, comme on dit dans l'industrie de luxe.

Deuxième problème : même avec des réserves infinies, consommer sans modération le pétrole nuit gravement à la santé de notre planète, entre autres par les quantités de dioxyde de carbone que sa combustion libère dans l'atmosphère, augmentant de façon alarmante et surtout irréversible à notre échelle l'effet de serre naturel dont bénéficie la

1. France Europe Express, France 3, 18 octobre 2005.

Terre. Certes, ni l'automobile ni même le transport en général ne sont les seuls responsables du dérèglement climatique, loin de là, mais ils sont sur une pente très fortement ascendante donc préoccupante, tant il paraît difficile de limiter de façon autoritaire l'engouement de la part d'humanité en voie de motorisation pour ce parfum de liberté.

Enfin, accessoirement serait-on tenté de dire cyniquement, la concentration de moteurs recourant à la combustion de dérivés pétroliers dans les zones urbaines pose de sérieux problèmes respiratoires aux humains qui partagent le même air ; notons toutefois que l'utilisation d'autres carburants, plus ou moins bio, ne résoudrait pas forcément le problème.

Alors, court-on à la catastrophe ? En contemplant les monstres de puissance dépassant allègrement les deux tonnes que beaucoup de constructeurs se croient obligés de proposer pour faire « rêver » les automobilistes (ou les pompistes ?), on peut penser qu'une bonne partie du talent des ingénieurs est employée non à trouver le moyen d'éviter le mur, mais à nous faire foncer dedans à la plus grande vitesse possible. Pour être bien sûr de n'avoir pas le temps de souffrir ? Si l'usage de l'automobile s'étend, ce ne pourra pas être de cette façon, physiquement, économiquement et écologiquement sans issue. Deux soucis majeurs doivent aujourd'hui guider la conception de l'automobile de demain : l'économie d'énergie et le sevrage du pétrole. Ce n'est pas gagné, mais quelques lueurs d'espoir commencent à poindre.

Avant de les apercevoir, nous remonterons au tout début de cette aventure, à l'aurore du XVIII^e siècle alors que les premières machines à vapeur n'étaient encore que des bâtiments cloués au sol par leur énorme masse. Nous y apprendrons au passage des rudiments de thermodynamique, afin de mieux cerner les limites des moteurs thermiques. Puis nous retracerons le début de l'histoire centenaire des techniques de motorisation automobile, plus diverse quant aux sources d'énergie embarquée qu'on ne le croit souvent. Pouvons-nous nous fier aujourd'hui aux promesses d'un avenir meilleur, notamment

grâce à l'hydrogène et à la pile à combustible, dont l'invention précéda de beaucoup celle du moteur à quatre temps ? Nous y réfléchirons en comparant l'ensemble des possibilités de stockage d'énergie qui s'offrent à l'automobile, en un siècle où le sevrage du pétrole est une nécessité urgente et absolue. L'analyse des besoins réels de fonctionnement d'une automobile nous conduira logiquement à comprendre pourquoi, même en se nourrissant encore exclusivement au pétrole, l'architecture hybride popularisée par la Prius est promise à un bel avenir, et pourquoi elle restera incontournable même avec une pile à combustible. À moins, et ce n'est pas impossible, que les nanotechnologies ne viennent changer radicalement la donne pour le stockage direct de l'électricité dans des batteries enfin performantes...

PARTIE 1

CHALEUR, MOUVEMENT, ÉNERGIE

1

De la puissance motrice du feu

Pour en arriver à nos voitures consommant des produits pétroliers, il aura fallu du temps et bien des tâtonnements. Tout le monde sait que sous le capot se trouve un moteur qui, en brûlant du carburant, fait avancer le véhicule, même si rarement on assiste au spectacle de cette combustion. La chaleur peut en effet servir à produire une force motrice¹, ce qui constitue le cœur de la science appelée *thermodynamique*. Comment s'en convaincre ? En observant la nature tout d'abord, puis en parcourant l'histoire qui mena l'humanité à domestiquer de manière réellement efficace la puissance du feu. Il s'en est suivi un profond bouleversement du mode de vie de nos ancêtres, au cours de la révolution industrielle qui secoua l'Europe du XIX^e siècle.

Lors des journées de beau temps, les randonneurs pyrénéens dont je suis ont souvent l'occasion d'observer l'évolution majestueuse des vautours, décrivant inlassablement des hélices à la verticale des versants

1. Force produisant un mouvement, nécessaire à la propulsion d'un véhicule, par opposition à une force statique, subie par une structure de bâtiment par exemple.

ensoleillés. Sans un battement d'aile, les rapaces montent progressivement dans le ciel, utilisant intelligemment les courants d'air ascendants créés par le Soleil qui, frappant le sol, le réchauffe ainsi que l'air proche de sa surface. Devenu moins dense que celui qui le surplombe, cet air s'élève par l'effet de la poussée d'Archimède et fournit à nos vautours des moteurs gratuits.

Le soir venu, au refuge, il est souvent réconfortant d'allumer un feu de bois. Avec encore plus de violence en raison des températures y régnant, l'air chaud s'élève dans la cheminée, emportant au passage quelques braises, certes légères mais tout de même plus denses que l'air : tout comme les vautours (qui sont vivants mais se comportent en planeurs passifs), et bien qu'avec moins de subtilité en raison de leur manque total d'intelligence, ces braises s'interposent dans un flux de chaleur « naturel » pour en extraire une force motrice. Et même avec le chauffage central, il est toujours possible avec un peu de carton et une aiguille de construire un tourniquet qu'on placera sur le radiateur...

Ces observations (très primaires, mais largement confortées par d'abondants travaux scientifiques !) nous conduisent à proposer un schéma conceptuel général de ce qu'on nommera *moteur thermique* : c'est quelque chose qui vient s'interposer dans un flux « naturel » de chaleur, du chaud vers le froid, pour en détourner une partie qu'il transforme en énergie capable de produire un mouvement, appelé *travail* par les physiciens.

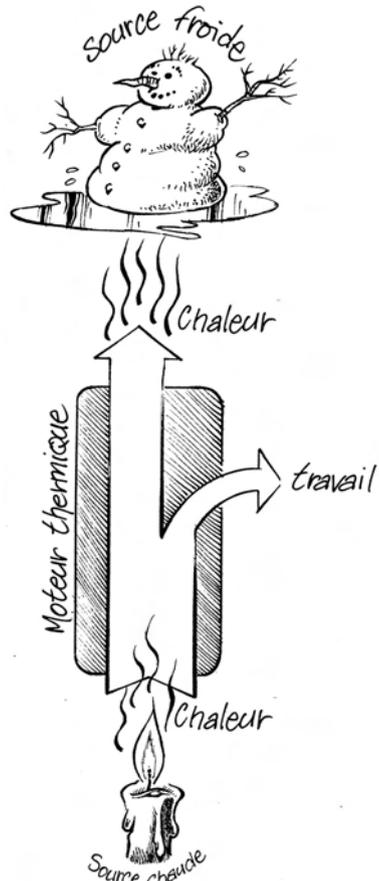
Le vautour ainsi que la braise gênent (très peu évidemment !) le transfert de chaleur vertical qui s'effectue par convection², et transforment par leur présence une très faible partie de ce flux énergétique en travail. Ils constituent donc avec leur environnement un moteur thermique naturel. Plus complexe à expliquer car faisant intervenir des changements d'état, le cycle de l'eau implique également un moteur thermique : ce sont les milliards de tonnes d'eau, sous forme gazeuse, liquide ou solide, qui voyagent en permanence

2. C'est-à-dire par mouvement de matière, ici l'air ou les gaz de combustion.

dans tous les sens dans le champ de pesanteur grâce à l'action du Soleil, ce dernier fournissant l'énergie à l'origine des forces motrices.

Contempler c'est bien, mais l'humanité a depuis bien longtemps eu le désir de domestiquer la nature, et certains de ses membres les plus ingénieux se sont employés à construire des moteurs thermiques artificiels. Vers le premier siècle de l'ère chrétienne, l'ingénieur Héron d'Alexandrie étonnait ses contemporains avec son éolipyle, ancêtre de notre tourniquet de cocotte-minute. Un récipient hermétique contenant de l'eau était chauffé sur un foyer, et la vapeur ainsi produite, forcée de s'échapper tangentiellement d'une sphère tournant sur un axe, mettait en mouvement le dispositif. L'intérêt de la chose n'était évidemment pas d'en tirer quelque force motrice que ce soit, mais la puissance motrice du feu était démontrée.

Ainsi la chaleur peut se transformer en énergie « mécaniquement utilisable » (travail) et inversement³, c'est le grand enseignement du *premier principe* de la thermodynamique. Hélas, comme notre schéma conceptuel le suggère l'efficacité d'un moteur thermique est forcément limitée : il faut l'imaginer comme un ouvrage de dérivation sur un



1 | Schéma conceptuel d'un moteur thermique.

3. On ne l'a pas montré, mais il suffit de penser à la chaleur créée par le frottement entre deux surfaces pour s'en convaincre.

cours d'eau qui ne pourra jamais, quoi qu'on fasse, en détourner la totalité du débit. Il y aura toujours de la chaleur qui « refusera » la dérivation, qui sera perdue pour tout usage mécanique, qui n'accédera pas au statut « noble » de travail. Cette restriction profonde et inéluctable, beaucoup plus difficile à formuler de façon rigoureuse, constitue le *deuxième principe* de la thermodynamique. Ces deux principes naquirent, d'abord sous des formes imparfaites, vers le milieu du XIX^e siècle ; il est difficile de leur donner des pères incontestés, tant ils étaient dans « l'air du temps » scientifique et furent plusieurs fois remaniés. On attribue généralement au médecin bavarois Julius von Mayer le premier article sur l'équivalence entre chaleur et travail (premier principe) publié en 1842, et au physicien français Sadi Carnot l'énoncé des limites de cette équivalence (deuxième principe), dans son ouvrage *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*, publié en 1824.

Le deuxième principe est donc, historiquement, antérieur au premier ! Ce n'est d'ailleurs pas très étonnant car il concerne les limitations pratiques de la transformation de chaleur en travail, qui préoccupaient au plus haut point les ingénieurs concevant les premières machines à vapeur. Si les physiciens de l'époque n'avaient pas à leur disposition la description moderne de la matière sous forme d'atomes, nous pouvons en revanche aujourd'hui donner une image de ce que recouvre ce deuxième principe. L'air que nous respirons, par exemple, est constitué pour l'essentiel de molécules d'oxygène et d'azote⁴ ; s'il est immobile, nous pourrions croire que ces molécules sont, elles aussi, fixes. Il n'en est rien : leur agitation est au contraire extraordinaire, puisque dans un air *statique* à 20 °C leur vitesse moyenne atteint 1 800 km/h ! c'est une tempête démentielle qui règne, mais *totale*ment désordonnée (les molécules vont dans tous les sens, aucune direction n'est privilégiée) et c'est pourquoi nous ne la sentons pas, ou plutôt si... nous appelons cela la *chaleur*. Et notre peau est effectivement

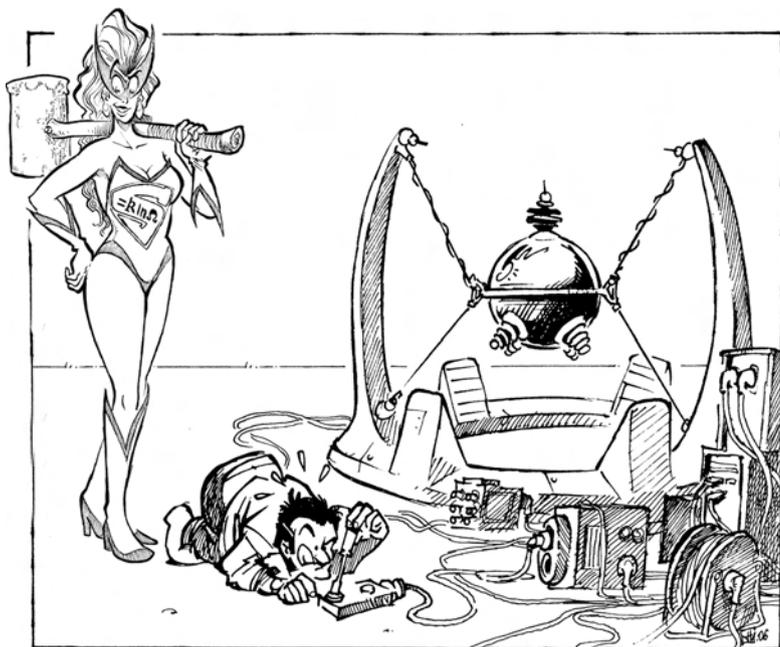
4. Plus exactement, de dioxygène et de diazote selon la nomenclature actuelle, chaque molécule étant constituée de deux atomes.

capable de faire la différence entre de l'air à 20 °C et un autre glacial à -10 °C, où le plus gros des molécules a ralenti d'une centaine de kilomètres par heure.

Ces molécules, qui ont une masse, ont donc chacune une énergie cinétique⁵, comme celle communiquée à une balle de tennis par le service d'un joueur. Pourtant contrairement à celle de la balle, elle ne peut être utilisée pour effectuer un travail, à cause du *désordre* indescriptible qui règne à l'échelle moléculaire. L'énergie du vent peut en revanche servir à faire tourner des éoliennes (le vent travaille, donc !) mais c'est parce que ce vent est un mouvement *ordonné* à notre échelle (dans une direction précise) des molécules d'air, qui se superpose à leur mouvement *désordonné microscopique*. Cette notion de désordre microscopique est traduite dans le langage des scientifiques par une grandeur mystérieuse, donnant beaucoup de fil à retordre aux étudiants et que le physicien allemand Rudolf Clausius, son inventeur, appela en 1854 l'*entropie*. La différence entre une énergie sous forme de chaleur et la même sous forme de travail, c'est l'entropie : quand le désordre est complet, même si l'énergie est là, inutile d'espérer en tirer le moindre travail. L'entropie est une mauvaise copine qui s'acharne à rendre inutilisable l'énergie que vous possédez ! Pour obtenir du travail, il faut d'abord *introduire de l'ordre* : lorsqu'un flux de chaleur se produit entre le chaud et le froid, il y a manifestement un ordre puisque la chaleur s'écoule toujours dans le même sens. Mieux : on peut penser que cet ordre est plus grand si le contraste de températures est plus important... et c'est effectivement le cas, puisqu'avec des différences de températures plus grandes les moteurs thermiques peuvent produire plus de travail, pour la même quantité de chaleur consommée.

La source chaude et la source froide d'un moteur thermique peuvent en général être quelconques, pourvu bien sûr que la température de la première soit supérieure à celle de la seconde. Le plus souvent dans

5. On appelle énergie cinétique l'énergie associée au mouvement d'un objet possédant une masse (m) et se déplaçant à une certaine vitesse (v). Elle est donnée en joules par l'expression $mv^2/2$ avec les unités internationales (masse en kilogrammes, vitesse en mètres par seconde).



2 | L'entropie : une farceuse qui se plaît à gâcher le travail (allégorie).

les moteurs artificiels tels que ceux des automobiles, la source chaude est obtenue grâce à la combustion du carburant tandis que la source froide est l'air ambiant. On peut toutefois envisager l'inverse : si on dispose d'une source froide plus froide que le milieu environnant, ce dernier constituera la source chaude. Quelques universités⁶ se sont ainsi amusées à réaliser des véhicules fonctionnant à l'azote liquide (-196 C), qui ont un intérêt essentiellement pédagogique.

INVENTONS LA MACHINE À VAPEUR

Les moteurs thermiques naturels que nous avons cités en exemple ont une utilité toute relative, et il est bien difficile d'en tirer une puissance motrice de quelque importance sans de grandes installations.

6. Voir par exemple : <http://www.mtsc.unt.edu/CoolN2Car.html>

L'homme a mis bien longtemps à en construire qui soient plus utiles que le gadget de notre illustre Héron : c'est seulement en 1698 que l'Anglais Thomas Savery (1650–1715) déposa un brevet pour une machine à vapeur à basse pression ou « pompe à feu ». Grâce à elle, l'énergie d'une combustion put être utilisée dans les mines anglaises pour actionner des pompes luttant contre les infiltrations d'eau, au prix de la consommation d'une partie du charbon extrait. Cependant, on était loin de s'en servir pour mouvoir un véhicule.

Lentes, énormes, inefficaces, d'une inertie terrible, les premières machines à vapeur peinaient à faire oublier le travail animal ; il fallut plus d'une amélioration pour vraiment justifier les efforts techniques consentis pour leur réalisation. Nous avons appris à l'école le nom du Français Denis Papin (1647–v. 1712), qui déjà en 1690 rédigeait une *Nouvelle Méthode pour obtenir à bas prix des forces très grandes* et qui construisit en 1707 une pompe fonctionnant à la vapeur, version perfectionnée de la machine de Savery, mais qui n'eut d'applications que pour des jeux d'eau. Plus tard, il essaya en vain de construire un bateau à vapeur. En Angleterre à nouveau, Thomas Newcomen (1663–1729) remporta lui un grand succès avec sa « pompe à feu » capable en 1712 de remonter douze fois par minute 45 litres d'eau d'une profondeur de 46 mètres, servant ainsi à drainer les galeries de mines. Performance extraordinaire pour l'époque, puisque correspondant à la puissance de plus de 5 bons chevaux de trait. Certains pensent qu'il ne put pas profiter pleinement de son invention à cause du brevet détenu par Savery... en tout cas, il collabora avec lui pour construire ses machines.

Ces premières machines à vapeur sont dites « atmosphériques » ou « à basse pression » car, paradoxalement, c'est la dépression obtenue par la condensation de la vapeur au cours d'une phase de refroidissement qui constitue la force motrice. Dans la pompe à feu de Newcomen, la source de chaleur (feu de bois ou de charbon) sert à faire bouillir de l'eau dont on récupère la vapeur dans un gros cylindre fermé par un piston. Par une vanne, ce cylindre est ensuite isolé, ce qui provoque

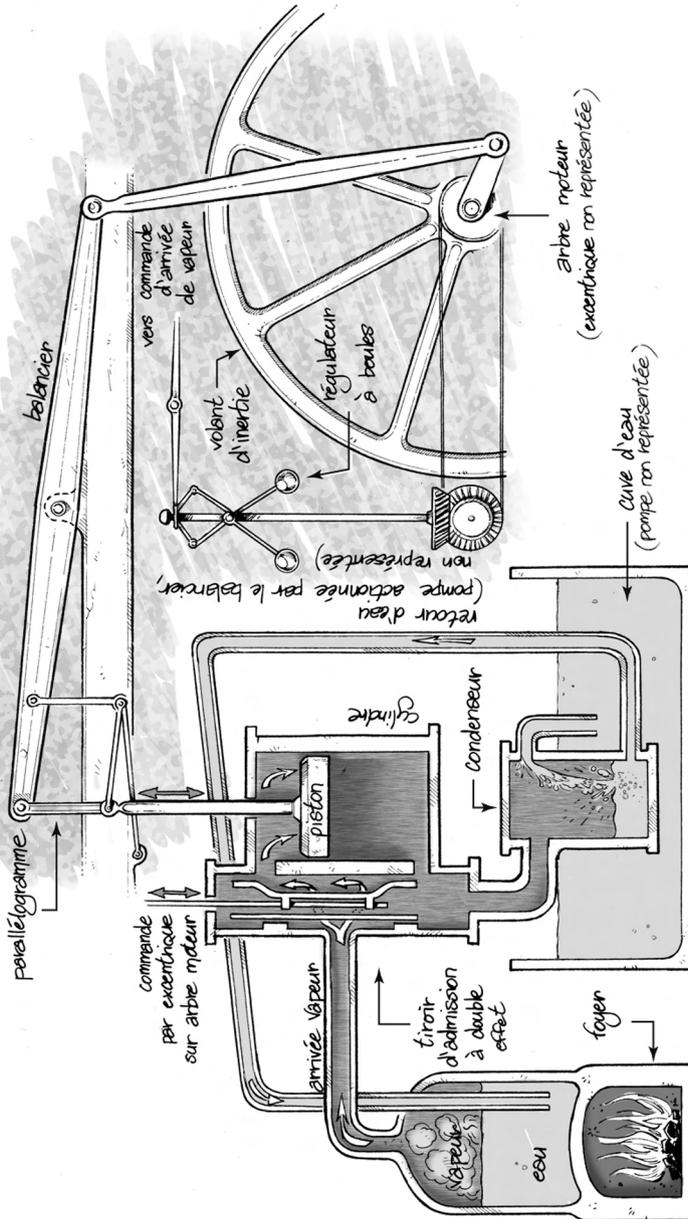
son refroidissement et donc la condensation de la vapeur d'eau, laquelle entraîne une dépression à l'intérieur du cylindre, puisqu'un corps à l'état liquide occupe beaucoup moins de volume qu'à l'état gazeux. Cette dépression « aspire » le piston qui descend, puis l'ouverture d'une vanne permet de rétablir la pression atmosphérique dans le cylindre et un contrepoids fait remonter le piston : on a ainsi décrit un *cycle* de fonctionnement. Le mouvement de va-et-vient produit lors de la répétition des cycles peut être utilisé pour actionner une pompe.

PERFECTIONNONS LA MACHINE À VAPEUR

La machine de Newcomen fut construite sans modification notable pendant de longues années avant que James Watt (1736–1819), le célèbre inventeur écossais, ne l'améliore de façon spectaculaire après en avoir analysé attentivement le fonctionnement.

S'il n'invente pas réellement la machine à vapeur, il comprend le premier comment utiliser la chaleur efficacement pour qu'elle daigne produire davantage d'énergie mécanique, adoptant une vraie démarche d'ingénieur. En étudiant longuement les machines existantes, il met en évidence les raisons de leur fonctionnement médiocre :

- Le cylindre est alternativement réchauffé, puis refroidi, en pure perte : s'il est effectivement nécessaire de chauffer puis de rafraîchir l'eau afin de la faire passer à l'état gazeux puis à nouveau liquide, ce qui provoque la force motrice, le métal du cylindre, doué d'une inertie thermique énorme, gagnerait à rester à une température plus constante. James Watt invente donc le *condenseur séparé*, qui peut demeurer froid tandis que le cylindre où la vapeur travaille reste chaud.
- La vapeur n'exerce son action que d'un seul côté du piston et par dépression, ce qui signifie que la différence de pression créant le mouvement est au mieux égale à la pression atmosphérique. En envoyant successivement la vapeur sous pression de chaque côté du piston, James Watt invente la machine à vapeur à *double effet* et à *haute pression*.



3 | La machine de Watt et son lot de perfectionnements.

- Pour que ce double effet soit techniquement réalisable, il est nécessaire de remplacer le système de liaison du piston sur le balancier, jusque-là réalisé par chaîne et donc utilisable uniquement en traction (pas en poussée) ; pour transformer par un lien rigide le mouvement de rotation du balancier en mouvement rectiligne du piston, James Watt invente le *guidage par parallélogramme* qui porte son nom.
- Enfin, pour régulariser le fonctionnement de la machine et éviter qu'elle ne s'emballe ni ne s'arrête en fonction des variations de pression, James Watt invente un très ingénieux système utilisant la force centrifuge pour commander l'arrivée de vapeur : le *régulateur à boules*. Il s'agit du premier système de rétroaction en boucle fermée connu.

Grâce à ces modifications réalisées à partir de 1765, la machine à vapeur, désormais « à haute pression », devient beaucoup plus efficace et accélère l'avènement, en Angleterre d'abord, de la révolution industrielle. Dorénavant, cet édifice fumant n'est plus condamné à l'immobilité, il pourra passer bientôt du statut de « bâtiment » cloué au sol à celui de véritable « machine » éventuellement mobile, voire propulsante...

En 1769, Nicolas Joseph Cugnot (1725–1804), ingénieur militaire français, construit sur la base d'un fardier (sorte de gros brancard à deux roues destiné à déplacer de lourdes pièces d'artillerie) un véhicule où le cheval est remplacé par une troisième roue, dont le mouvement est assuré par la force motrice d'une machine à vapeur, encore fort primitive et dépourvue des perfectionnements de Watt. L'engin initialement conçu pour se déplacer à 15 kilomètres par heure ne dépasse pas la vitesse d'un marcheur moyen et s'arrête au bout d'un quart d'heure... mais le véhicule *auto-mobile* est né, même s'il n'est pas allé bien loin pour commencer : l'histoire (vraie ?) dit qu'il termina sa course en défonçant un mur.

QUELQUES NOMS ET DATES DE LA RÉVOLUTION INDUSTRIELLE

	Nom	Naissance et mort	Pays	Contribution marquante
	Denis Papin	1647–vers 1712	France	<i>Nouvelle Méthode pour obtenir à bas prix des forces très grandes</i> (1690) ; perfectionne en 1707 la machine de Savery.
	Thomas Savery	1650–1715	Angleterre	Dépose en 1698 un brevet pour une machine atmosphérique à vapeur ou « pompe à feu ».
pas de portrait connu	Thomas Newcomen	1663–1729	Angleterre	1712 : nouveau type de machine à vapeur, réellement utilisable pour pomper l'eau des mines.
	James Watt	1736–1819	Écosse	Met au point quatre améliorations décisives de la machine à vapeur de Newcomen : condenseur séparé, double effet, parallélogramme articulé et régulateur à boule ; premier brevet en 1769.
	Matthew Boulton	1728–1809	Angleterre	Associé de James Watt, contribue à l'industrialisation des machines à vapeur.
	Nicolas Joseph Cugnot	1725–1804	France	Réalise en 1769 le premier véhicule automobile terrestre à vapeur.
	Nicolas Léonard Sadi Carnot	1796–1832	France	Pionnier de la science thermodynamique, publie en 1824 <i>Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance</i> .

Crédits : Wikipédia sauf Cugnot, DR.

2

Force, énergie, puissance : clarifions le débat !

Avec la machine de Watt nous n'en sommes pas encore à l'automobile du XXI^e siècle, ni même au moteur à explosion ; mais puisque les choses vont commencer à se faire techniques, il est utile d'employer des termes précis. On n'imagine jamais à quel point la précision du langage, en sciences et techniques, peut faire gagner du temps !

La confusion entre énergie et force persiste encore aujourd'hui, et constitue une mine de « découvertes » pour des « inventeurs » tous plus géniaux les uns que les autres qui, au cours des siècles, chacun en leur temps et malgré l'incompréhension de leurs contemporains, ont percé le secret du moteur perpétuel. Cette invention ultime se pare généralement des attributs de son époque : à l'âge des moulins hydrauliques, il consistait en un complexe système de roues à aubes, tubes déversoirs et poulies ; plus tard, et encore aujourd'hui, il fait intervenir l'électricité et le magnétisme, cette force suffisamment mystérieuse pour que le profane se laisse bernier... et que l'inventeur aux notions approximatives de physique croie lui-même à la possibilité de fonctionnement miraculeux de sa machine. L'hydrogène est de nos jours bien placé dans

la liste des ingrédients nécessaires à cette panacée. Bien entendu l'inventeur génial (d'aujourd'hui) reste abonné à l'électricité et continue à faire le plein de son véhicule automobile pour le plus grand mal de la planète, mais si ses prototypes ne marchent pas encore tout à fait, ce n'est qu'à cause de détails en passe d'être réglés, et/ou de financements insuffisants. Quand il ne s'agit pas des menaces de la part de grands groupes pétroliers ou de constructeurs automobiles...

À l'aube d'une crise énergétique de grande importance, et vu le rôle accordé à l'information scientifique et technique dans les médias « grand public », le moteur perpétuel a de beaux jours devant lui. Internet aidant, la diffusion des idées les plus farfelues et le regroupement en réseau de ceux qui y croient peuvent très bien, pour le profane, être difficilement distinguables de l'activité scientifi-co-technique réellement validée par l'expérience et la critique des pairs. Pourtant, la nature est têtue : l'énergie « gratuite », émergeant du néant, n'existe pas. Entendons-nous bien, la connaissance scientifique étant en soi ouverte et non achevée, rien n'interdit de penser que des sources d'énergie inconnues aujourd'hui seront à notre disposition dans l'avenir ; si James Watt avait eu connaissance d'une centrale nucléaire (autre forme de machine à vapeur) nul doute qu'il aurait trouvé « magique » de pouvoir ainsi tirer des quantités d'énergie aussi colossales d'un minerai sans valeur à ses yeux. Pourtant, qui dirait aujourd'hui que l'énergie nucléaire est gratuite ?

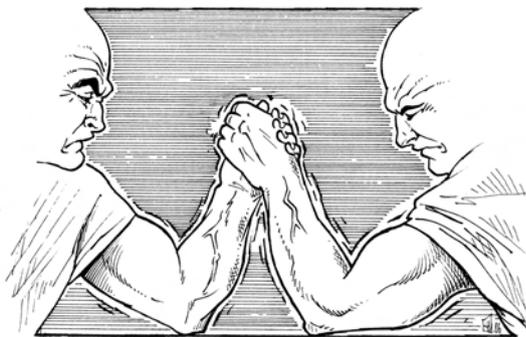
Oublions un instant tout détail superflu et essayons de définir clairement les notions de *force*, d'*énergie*, de *puissance* et de *rendement*.

LA FORCE

Dans une machine à vapeur, c'est la force exercée sur le piston à cause de la variation de pression à l'intérieur d'un cylindre étanche qui permet de produire une énergie mécaniquement utilisable, que ce soit pour pomper de l'eau, entraîner un métier à tisser, ou plus tard tirer des trains entiers. Nous sommes en général assez familiers du concept de force, parce qu'il correspond très directement à nos sensations

musculaires : soulever une charge, récuser une casserole, taper dans une balle de tennis nécessitent d'exercer des forces sur des objets. Toutefois, nous associons souvent – à tort – force et énergie, qui sont deux choses bien distinctes. Lorsque deux malabars font une partie de bras de fer, s'ils sont de même force, on verra leurs mains lutter l'une contre l'autre pendant de longues minutes, sans bouger, tandis que la transpiration perle sur les avant-bras et que, petit à petit, la fatigue finit par l'emporter. Même quand les mains sont immobiles, il est clair pour nous que les deux compétiteurs dépensent de l'énergie, cela se voit à leur transpiration et à leurs mines de plus en plus épuisées. Pourtant, d'un point de vue mécanique, tant qu'ils s'équilibrent exactement, ni l'un ni l'autre ne *produit* de travail sur son adversaire ! Décevant, non ?

Les manifestations extérieures de leur fatigue ne sont que le résultat visible de leur condition d'être vivant.



4 | Tout ça pour rien...

Regardons plutôt, alors, les forces produites par des objets inertes, comme la chaise sur laquelle je suis assis pour écrire ce livre. Visiblement, cette chaise ne consomme pas d'énergie : elle ne nécessite ni branchement électrique, ni utilisation de carburant, et n'a jusqu'à présent pas réclamé la moindre nourriture. Elle reçoit bien quelque énergie lumineuse, mais comme elle fonctionne également dans le noir, ce ne doit pas être cela qui lui permet de jouer son rôle de chaise. Or cette chaise produit en permanence une force, puisqu'elle réagit à mon poids, qui lui-même est une force ! Exactement comme l'une des mains répond à la force de l'autre dans la compétition des gros bras.

On peut donc exercer des forces sans dépenser la moindre énergie ; tout bêtement, le fait que le sol nous soutient à chaque pas nous en fournit la preuve en permanence.

La force seule ne suffit donc pas ; pour qu'elle soit motrice et corresponde à une énergie mécanique il faut qu'elle se déplace¹, ce qui est le cas de celle exercée par la vapeur (ou la condensation de celle-ci) sur un piston coulissant. Et pour reprendre l'exemple de la chaise, il est clair que si nous désirons maintenant un fauteuil tout confort capable de monter et descendre selon notre volonté sur simple pression d'un bouton, de petits moteurs électriques seront nécessaires !

L'ÉNERGIE

L'énergie sous une forme mécaniquement utilisable n'est produite que lorsqu'une force se déplace ; on dit logiquement que la force *travaille*. L'unité internationale avec laquelle on la mesure est le **joule** (symbole : J) en l'honneur de James Prescott Joule (1818–1889), un des fondateurs anglais de la thermodynamique qui fut le premier à énoncer, en 1842 et en même temps que Julius Mayer en Allemagne, l'équivalence entre chaleur et travail (premier principe). Le joule est physiquement égal à un **newton** (unité de force, en l'honneur d'Isaac Newton qu'on ne présente plus, symbole : N) multiplié par un mètre (unité de longueur issue de la Révolution française et de la mesure du méridien terrestre). C'est une petite quantité qui correspond à peu près, par exemple, au travail effectué par le poids d'une masse d'un kilogramme au cours d'une chute de 10 cm. Pour en prendre conscience, demandez à un de vos proches de lâcher à dix centimètres au-dessus de votre tête une bouteille en plastique pleine d'un litre d'eau : vous sentirez ainsi ce que représente un choc avec un objet possédant une énergie cinétique d'un joule.

1. Pour être plus précis, il faut en plus que son déplacement ne soit pas perpendiculaire à sa direction.

LA PUISSANCE

Une machine capable de produire un travail mécanique, c'est bien... à condition qu'elle le fasse relativement rapidement. C'est là qu'intervient la notion de puissance, dont l'unité est le watt (symbole : W) en l'honneur de James bien entendu. La puissance est la quantité d'énergie fournie divisée par le temps correspondant : un watt est égal à un joule par² seconde ; ainsi, pour le même travail produit, une machine qui le fait en deux fois moins de temps est deux fois plus puissante. On remarquera au passage que le watt n'est pas une unité électrique, mais bien mécanique ; son utilisation fréquente en électricité tient simplement à la relative jeunesse de l'industrie électrique, qui évita aux pionniers de perpétuer de mauvaises habitudes. Naturellement, à l'époque de James Watt, les puissances étaient mesurées de toute autre façon, à partir de la charge (du poids) élevée d'une hauteur donnée dans un temps donné. Ainsi, James Watt estima que les meilleurs chevaux pouvaient hausser une masse de 55 livres à une vitesse de 10 pieds par seconde, ce qui correspond à environ 745,7 de nos watts et constitue la définition, dont il est l'auteur, du cheval-vapeur³. Plus de deux siècles plus tard, les vendeurs d'automobiles vous parlent encore en chevaux-vapeur, c'est dire si cette industrie a du mal à affronter le XXI^e siècle ! Une autre façon, équivalente, de définir la puissance consiste à partir de la force et à la multiplier par sa vitesse de déplacement ; les cyclistes qui préparent des compétitions savent bien que la puissance s'obtient non seulement en appuyant fort sur les pédales, mais également en pédalant suffisamment vite.

LE RENDEMENT

Contrairement à la puissance, le *rendement* (aussi appelé *efficacité*) n'a pas d'unité : c'est le rapport de l'énergie mécanique produite

2. Dans le langage scientifique, « joule par seconde » signifie exactement « nombre de joules divisé par le nombre de secondes » ; pour une multiplication par, on aurait dit « joule-seconde ».

3. Plus exactement du *horsepower*, unité des systèmes anglais et américains ; chez nous le cheval-vapeur ne vaut que 735,5 W (les prairies seraient-elles moins grasses ?). Raison de plus pour ne s'exprimer dorénavant qu'en watts ou kilowatts.

sur l'énergie que le combustible libère en chaleur, donc un nombre sans dimension. Naturellement, ce nombre est toujours inférieur à 1 (c'est-à-dire 100 %) pour un moteur thermique, sinon on aurait inventé le moteur perpétuel... Pour fixer les idées, les premières machines de Newcomen avaient un rendement de l'ordre de 0,5 % et celles de Watt, de 3 à 4 %. Actuellement, des moteurs d'automobiles peuvent atteindre 35 à 40 % dans les meilleures conditions d'utilisation⁴, avec un avantage pour les Diesel. Quelques moteurs Diesel marins de très grande taille⁵ et tournant très lentement (100 tours par minute), utilisés sur de très gros navires, parviennent à dépasser 50 %.

La puissance est, en pratique, le paramètre essentiel qu'il faut connaître pour savoir si le moteur est adapté à la tâche ; mais le rendement a également son importance, surtout quand la source d'énergie est chère. Pour un travail mécanique produit, il est intéressant que le moteur consomme le moins possible de « nourriture » : le carburant pour nos automobiles, le charbon aux temps héroïques des machines à vapeur. L'énorme succès de la machine de Watt vient autant de son meilleur rendement que de sa grande puissance par rapport à celles qui l'ont précédée : à chaque coup de piston, la machine de Watt produisait un plus grand travail mécanique que celle de Newcomen, pour une même quantité de charbon brûlée. Ou consommait beaucoup moins de charbon pour le même travail ; son intérêt économique était donc évident. Watt et Boulton avaient d'ailleurs innové également dans la façon de « vendre » leur machine : ils ne la faisaient pas payer, mais ayant pour clients d'anciens utilisateurs de la machine de Newcomen, ils percevaient une redevance annuelle égale au tiers des économies de combustible réalisées. Ils moururent riches malgré les resquilleurs ! Grâce à leurs innovations, augmentation de puissance et amélioration du rendement allèrent de pair : produisant plus de travail à chaque cycle la machine de Watt était plus puissante, à nombre égal de cycles par minute. Mais étant plus puissante parce qu'elle utilisait mieux

4. Qui sont rarement réunies, on en reparlera...

5. Leur cylindrée peut atteindre 25 mètres cubes !

l'énergie du charbon, elle avait également un meilleur rendement. Cependant, on peut augmenter la puissance sans accroître le rendement, si la machine travaille plus vite et consomme plus de combustible dans la même proportion : c'est d'ailleurs ce qui se passe quand on appuie sur l'accélérateur d'une voiture pour faire monter en régime le moteur.

Bref, on retiendra que la puissance mesure la rapidité avec laquelle le moteur peut fournir un travail, et que son rendement détermine la quantité d'énergie qu'il utilisera pour produire un travail donné. Pour un véhicule qui doit emporter sa source d'énergie avec lui, cette dernière considération est d'une importance cruciale : plus le rendement est faible, plus le véhicule devra emporter une grande quantité de combustible pour le même travail fourni.

Enfin, si une quantité d'énergie minimale est le plus souvent nécessaire à la réalisation d'une action comme se déplacer d'un point à un autre, la puissance l'est moins : pour la même énergie dépensée, il suffit de prendre son temps pour, mathématiquement, faire baisser la puissance en réalisant le même déplacement. N'importe qui peut gravir le mont Ventoux à vélo, au besoin en plusieurs jours avec bivouac et victuailles... pour faire l'ascension en moins d'une heure en revanche, comme certains cyclistes professionnels y parviennent, il faut être capable de développer en continu une puissance hors du commun pour un être humain : de l'ordre de 400 W...

QUELQUES UNITÉS ET ORDRES DE GRANDEUR

Le joule, comme le watt, étant des unités de petite taille pour les utilisations industrielles ou même domestiques, on utilise souvent leurs multiples : kilojoule pour mille joules (kJ), mégajoule pour un million de joules (MJ), kilowatt (kW), mégawatt (MW). Mais si le watt vaut un joule par seconde, c'est que le joule vaut un watt multiplié par une seconde, en abrégé watt-seconde. Et comme une heure compte 3 600 secondes, un watt-heure (Wh) vaut 3 600 joules, et un kilowatt-heure 3 600 000 joules. À 0,0765 € hors taxes le kWh électrique d'après ma facture EDF, le joule d'électricité coûte donc environ

21 n€ (nanoeuros ou milliardièmes d'euro). Pas très valorisant pour monsieur Joule, mais indispensable à notre train de vie énergétique.

Pour bien enfoncer le clou, résumons ces notions sous une forme mathématique, qui a le mérite de la concision et de la clarté :

$$\text{puissance} = \text{énergie} / \text{intervalle de temps}$$

qu'on écrira encore, par fainéantise et souci d'efficacité :

$$P = E/\Delta t$$

où le « delta » (Δ) est la notation favorite des scientifiques pour désigner un intervalle. Bien entendu, il est équivalent d'écrire :

$$\text{énergie} = \text{puissance} \times \text{intervalle de temps}$$

ou encore :

$$E = P \times \Delta t.$$

Pour que ces formules soient numériquement justes (chaque terme étant remplacé par une valeur numérique), puissance, énergie et temps devront être exprimés dans un système d'unités cohérent. Le Système international (SI) préconise les watts pour la puissance, les joules pour l'énergie et les secondes pour le temps, mais nous venons de voir qu'une certaine flexibilité est commode, pourvu qu'elle reste rigoureuse. Toutes les unités sont associables à des préfixes exprimant des multiples ou sous-multiples de l'unité principale. Rappelons-les tout d'abord.

Préfixe	Noté	Valeur	Notation scientifique
exa	E	1 000 000 000 000 000 000	10^{18}
péta	P	1 000 000 000 000 000	10^{15}
téra	T	1 000 000 000 000	10^{12}
giga	G	1 000 000 000	10^9
méga	M	1 000 000	10^6
kilo	k	1 000	10^3
milli	m	0,001	10^{-3}
micro	μ	0,000 001	10^{-6}
nano	n	0,000 000 001	10^{-9}
pico	p	0,000 000 000 001	10^{-12}
femto	f	0,000 000 000 000 001	10^{-15}
atto	a	0,000 000 000 000 000 001	10^{-18}

2. FORCE, ÉNERGIE, PUISSANCE : CLARIFIONS LE DÉBAT !

et donnons maintenant les unités dont nous aurons besoin.

Grandeur	Unité	Notée	Équivalent	Exemple concret
force	newton	N	unité légale internationale	Poids d'un boxeur « poids moyen » : 696 à 736 N.
énergie	joule	J	unité légale internationale	Énergie cinétique d'une voiture moyenne (1 120 kg) : à 90 km/h : 350 000 J = 350 kJ.
énergie	watt-heure	Wh	1 watt \times 1 heure 3 600 J = 3,6 kJ	La même : une centaine de watt-heures.
énergie	kilowatt-heure	kWh	1 kilowatt \times 1 heure 3 600 000 J = 3,6 MJ	Un litre d'essence qui brûle dégage environ 9 kWh de chaleur.
énergie	calorie	cal	4,186 J	1 boîte de choucroute pour une personne : 400 000 cal = 400 kcal.
puissance	watt	W	unité légale internationale	Monter en vélo une côte à 10 % à 20 km/h constants : environ 450 W.
puissance	cheval-vapeur	ch	1 ch = 735,5 W	Puissance mécanique maximale d'une automobile moyenne : une centaine de chevaux-vapeur.

3

Comment l'énergie mécanique est-elle utilisée ?

Les pionniers de la révolution industrielle l'ont montré : il est possible de produire du mouvement avec de la chaleur, le recours à la force animale (ou humaine, avec l'esclavage !) n'est plus nécessaire. On peut d'ailleurs sourire aux commentaires de l'époque, qui voyaient dans la « respiration » entretenue des machines à vapeur des signes d'une vie mécanique, comme au XX^{e} siècle d'autres ont vu dans les ordinateurs une forme d'intelligence...

Aujourd'hui, nous en sommes toujours là : à quelques exceptions près, ce sont bien des moteurs thermiques qui permettent aux automobiles de se mouvoir. Certes, la machine à vapeur a rejoint aujourd'hui le cimetière des ancêtres, mais tous les moteurs thermiques actuels utilisent comme elle les propriétés thermodynamiques des gaz, qui lorsqu'ils sont chauffés se dilatent, ou voient leur pression augmenter si leur augmentation de volume est contrariée. Oublions pour l'instant les évolutions successives qui permirent notamment à la combustion de se faire interne dans les moteurs à explosion au lieu d'être externe dans les machines à vapeur ; nous y reviendrons au chapitre suivant.

Supposons seulement que nous disposons d'un moteur¹, donc d'une source de travail, et essayons de savoir plus précisément comment est utilisé ce travail pour la propulsion du véhicule.

LES VARIATIONS DE VITESSE

Tout véhicule doit par définition se mouvoir... mais aussi s'arrêter. En passant de l'arrêt au mouvement, il acquiert une **énergie cinétique**. Cette énergie est proportionnelle à la masse mais aussi au *carré* de la vitesse ; elle est donnée en joules par la recette mathématique suivante :

$$E_c = (1/2) m v^2$$

où m représente la masse en kilogrammes et v la vitesse en mètres par seconde² (m/s). Cet accroissement d'énergie cinétique est permis par le travail fourni par le moteur... ou par la transformation d'énergie potentielle (dont nous allons parler) en énergie cinétique dans une descente.

Prenons quelques chiffres ; par exemple, pour un véhicule de 1 300 kg, voici les énergies cinétiques correspondant à différentes vitesses :

Vitesse (km/h)	Vitesse (m/s)	Énergie cinétique (kJ)	Énergie cinétique (Wh)
30	8,3	45	13
50	13,9	125	35
90	25,0	406	113
110	30,6	607	169
130	36,1	848	235

On remarquera au passage qu'à cause du carré, cette énergie augmente très rapidement ; or c'est bien l'énergie cinétique qu'il faut dissiper en un temps très bref lors d'un accident. Rouler deux fois plus vite, c'est donc disposer de quatre fois plus d'énergie dont on doit pouvoir, éventuellement, se débarrasser autrement qu'en écrabouillant

1. Pour ce qui suit, il peut tout aussi bien ne pas être thermique, mais par exemple électrique.
2. Pour passer d'une vitesse en km/h à sa valeur en m/s, il faut diviser par 3,6.

le véhicule et ses occupants. Mais pour l'immédiat, restons dans le cadre d'une utilisation normale de l'automobile : pour amener notre véhicule de l'état de repos à la vitesse de 90 km/h, par exemple, il faut lui communiquer au minimum 406 kJ rien que pour augmenter son énergie cinétique. Reste à savoir maintenant en combien de temps cette vitesse est atteinte, pour pouvoir déterminer la puissance de l'accélération : si nous passons de l'arrêt à 90 km/h en 10 secondes, cela fait 406 kJ gagnés en 10 s soit 40,6 kJ par seconde en moyenne³, autrement dit environ 41 kW puisqu'un watt vaut par définition un joule par seconde. De façon plus générale, la puissance d'accélération se calcule en watts avec la recette :

$$P_{acc} = m a v$$

où l'accélération a s'exprime en mètres par seconde carrée... Bien entendu, nous n'avons pas encore passé en revue toutes les dépenses d'énergie nécessaires à la conduite de la voiture, mais on voit déjà qu'il est essentiel de raisonner en puissance plus qu'en énergie pour que le véhicule soit « conduisible » dans des conditions raisonnables de sécurité et de confort : 406 kJ sont une quantité de travail que n'importe quel moteur, même de modèle réduit, est capable de fournir si on lui en laisse le temps ; elle correspond, avec un rendement autour de 30 %, à la combustion d'approximativement 41 millilitres de carburant⁴. Mais tous les moteurs ne pourront pas engloutir ce carburant en une seconde pour en tirer les 41 kW...

LES VARIATIONS D'ALTITUDE

S'il faut pouvoir changer de vitesse, il faut également pouvoir varier d'altitude, autrement dit monter et descendre en langage courant, ou faire varier l'énergie potentielle de la voiture en langage scientifique. Elle aussi est proportionnelle à la masse, ainsi qu'à

3. En pratique, une voiture n'accélère pas à puissance constante, sa transmission ne le lui permet pas ; il ne faut voir là qu'un calcul grossier.

4. Un litre d'essence ou de gazole contient un peu moins de 10 kWh ou 36 MJ d'énergie thermique. Si à peine 30 % est converti en travail, cela fait environ 10 MJ. 406 kJ, soit 0,406 MJ, correspond donc à environ 40 ml.

l'accélération⁵ de la pesanteur g (appelée aussi gravité) et à l'altitude h ; sa valeur en joules s'obtient par la recette :

$$E_p = m g h$$

où l'altitude est exprimée en mètres. Tous les lycéens l'ont appris : la « constante » g vaut $9,81 \text{ m/s}^2$ (mètres par seconde carrée) à Paris. Rassurez-vous, bien qu'étant légèrement supérieure aux pôles et légèrement inférieure à l'équateur, elle n'en diffère pas beaucoup en tout autre point du globe, si bien que les ingénieurs chargés de concevoir les automobiles n'ont pas à tenir compte du pays où elle sera vendue ; en tout cas pas pour cette raison !

Contrairement à l'énergie cinétique (qui est nulle pour un véhicule à l'arrêt), l'énergie potentielle importe peu par sa valeur réelle (qui de toute façon dépend du choix du niveau zéro pour l'altitude) mais seulement par ses variations, positives quand on monte ou négatives quand on descend. Reprenons notre voiture de $1\,300 \text{ kg}$ et faisons-la gravir, à vitesse constante de 90 km/h , une pente de 8% . Pour 100 m parcourus sur la route, la voiture s'élève verticalement de 8 m , augmentant en conséquence son énergie potentielle. Sa vitesse d'ascension est donc, sachant que 90 km/h valent 25 m/s , de $25 \times 8/100 = 2 \text{ m/s}$. En une seconde son énergie potentielle augmente ainsi de $1\,300 \times 9,81 \times 2 = 25\,506 \text{ J}$, ce qui signifie qu'il faut développer une puissance de $25\,506 \text{ joules par seconde}$, soit $25,5 \text{ kilowatts}$ pour parvenir à ce résultat. Là encore, c'est la puissance du moteur qui importe pour rendre la voiture conduisible : personne ne voudrait d'une voiture qui monte les côtes à la vitesse d'un cycliste, même dopé.

Pour fixer les idées, donnons quelques valeurs de « puissance ascensionnelle »⁶ requise par notre véhicule-test de $1\,300 \text{ kg}$ pour d'autres vitesses et d'autres pentes ; la recette permettant de la calculer en watts est :

5. On peut se demander pourquoi on appelle « accélération » le rapport entre le poids d'un objet et sa masse. On pourrait dire que c'est juste parce que l'unité est celle d'une accélération... mais c'est aussi en réfléchissant à la signification profonde de cette « coïncidence » qu'Albert Einstein élabora la relativité générale ; les questions les plus naïves sont souvent les plus pertinentes.

6. Gardons bien à l'esprit qu'il s'agit d'une partie seulement de la puissance totale nécessaire !

$$P_{asc} = m g v p/100$$

où la vitesse de la voiture v est en mètres par seconde et où la pente p est exprimée en pourcentage.

Pente de 3 % (à peine remarquée par les montagnards).

Vitesse (km/h)	Vitesse (m/s)	Puissance ascensionnelle (kW)	Puissance ascensionnelle (ch)
30	8,3	3,2	4,3
50	13,9	5,3	7,2
90	25,0	9,6	13
110	30,6	11,7	15,9
130	36,1	13,8	18,8

Pente de 7,5 % (moyenne de la route du mont Ventoux depuis Malaucène).

Vitesse (km/h)	Vitesse (m/s)	Puissance ascensionnelle (kW)	Puissance ascensionnelle (ch)
30	8,3	8,0	10,8
50	13,9	13,3	18,1
90	25,0	23,9	32,5
110	30,6	29,2	39,7
130	36,1	34,5	47,0

Pente de 12 % (route à péage du Puy-de-Dôme).

Vitesse (km/h)	Vitesse (m/s)	Puissance ascensionnelle (kW)	Puissance ascensionnelle (ch)
30	8,3	12,8	17,3
50	13,9	21,3	28,9
90	25,0	38,3	52,0
110	30,6	46,8	63,6
130	36,1	55,3	75,1

Si maintenant nous voulons accélérer en côte, naturellement les deux puissances, celle nécessaire à l'accroissement de l'énergie cinétique et celle indispensable à l'augmentation de l'énergie potentielle, doivent être additionnées. Ainsi, pour produire avec notre voiture à

90 km/h dans une côte à 7,5 % une accélération égale à celle que nous avons, à cette même vitesse, en passant de 0 à 90 km/h en 10 s lors d'une accélération constante, nous avons au moins besoin de 40,6 kW (puissance d'accélération) + 23,9 kW (puissance ascensionnelle) soit 64,5 kW... mais ce sera, en pratique, insuffisant ! En effet nous avons négligé d'autres dépenses énergétiques, qui sont moins simples à calculer mais que nous ne pouvons ignorer : principalement, celles dues à la *résistance au roulement* et à la *trainée aérodynamique*.

LA RÉSISTANCE AU ROULEMENT

Le simple fait de se mouvoir sur des roues entraîne une dépense d'énergie, même sur le plat à vitesse faible et constante : la principale cause en est la déformation des pneus, qui à chaque tour s'écrasent un peu (mettez-vous à la place d'une sculpture de pneu, votre vie ressemblera à celle d'un *punching-ball*), ce qui provoque la transformation de travail en chaleur. Certes, cette énergie est faible, au moins lorsque les pneus sont bien gonflés, mais elle n'est pas négligeable. Pour l'appréhender il est commode de parler de la force nécessaire à vaincre cette résistance ; les ingénieurs l'estiment proche de 1 % du poids de la voiture, avec bien sûr des variations suivant la taille et la largeur des pneus ou leur pression de gonflage⁷. Pour notre voiture de masse m , on exprimera la force de résistance au roulement, en newtons, au moyen de la recette suivante :

$$F_{roul} = C m g$$

avec le coefficient C proche de 1 % soit 0,01. Numériquement, on obtient dans notre cas une valeur constante de 130 N environ, directement proportionnelle à la masse de la voiture. Pour obtenir l'énergie dépensée à cause du roulement, il faut multiplier la force par la distance parcourue ; ainsi pour 100 km, soit 100 000 m, l'énergie engloutie vaut $130 \times 100\,000 = 13\,000\,000$ J ou 13 MJ (mégajoules). Si on considère que cette énergie fournie sous forme de travail provient

⁷ La mode récente des pneus ultra-larges ne va bien évidemment pas dans le sens d'une économie d'énergie (ni dans celui du confort).

d'un carburant tel que l'essence ou le gazole contenant entre 32 et 36 mégajoules d'énergie thermique par litre, par l'intermédiaire d'un moteur dont le rendement atteint 30 %, il a fallu 43 MJ d'énergie thermique pour vaincre le roulement sur ces 100 km, soit nettement plus d'un litre de carburant rien que pour déformer périodiquement les pneus sous cette lourde caisse.

Si on raisonne en puissance, puisque celle-ci est égale à la force multipliée par la vitesse, la puissance utilisée pour vaincre la résistance au roulement est proportionnelle à la vitesse. On peut donner quelques valeurs pour notre voiture de 1 300 kg avec $C = 0,01$, en appliquant la recette suivante :

$$P_{roul} = C m g v.$$

Vitesse (km/h)	Vitesse (m/s)	Puissance de roulement (kW)	Puissance de roulement (ch)
30	8,3	1,1	1,4
50	13,9	1,8	2,4
90	25,0	3,2	4,3
110	30,6	3,9	5,3
130	36,1	4,6	6,3

Ces valeurs ne doivent être considérées qu'à titre indicatif, et plutôt comme des limites inférieures ; de plus, elles dépendent assez fortement du type de chaussée, voire des conditions météorologiques (une route détremée freine davantage la voiture).

LA RÉSISTANCE À L'AIR

Venons-en maintenant à la *traînée aérodynamique*, mot savant pour parler de la force qui s'oppose au véhicule parce que celui-ci se déplace dans l'air. Toutes nos voitures ont besoin d'air à cause de l'oxygène qu'il contient (à raison de 21 %), et que le moteur avale afin de brûler le carburant. Mais en même temps qu'il leur permet d'avancer, ce même air les freine, et ceci d'autant plus qu'elles vont vite. Les aérodynamiciens ont bien sûr leur petite recette pour calculer la force exercée par l'air sur la voiture en mouvement, qu'ils expriment ainsi :

$$F_{aéro} = (1/2) \rho S C_x v^2$$

où nous voyons apparaître la vitesse v , la masse par unité de volume de l'air ρ (traditionnellement désignée par la lettre grecque « rhô », et valant 1,2 à 1,3 kg/m³ suivant la température et la pression), la surface frontale du véhicule S et enfin son coefficient de pénétration dans l'air, ou coefficient de traînée, le bien connu C_x qui valut même à une automobile très appréciée d'un président de la République en fin de règne de porter ce nom pour souligner l'excellence de son aérodynamisme.

Que pouvons-nous retenir de cette expression barbare ?

- Premièrement, l'air a une masse sur laquelle nous ne pouvons pas grand-chose ; contentons-nous par conséquent de faire avec.
- Deuxièmement, la force de résistance à l'air est proportionnelle à la surface frontale du véhicule (l'aire du trou que produit une voiture traversant un mur de briques, dans les dessins animés pour enfants), indépendamment de sa forme qui elle détermine le C_x . Autrement dit, il vaut mieux un véhicule bas et étroit que haut et large. Le moins que l'on puisse dire est que la mode des monospaces et tout-terrain de loisir ne va pas dans le sens d'une meilleure efficacité aérodynamique...
- Troisièmement, la forme de la carrosserie a son importance, et une voiture « profilée comme un buffet normand » dépensera plus d'énergie à fendre l'air qu'une autre rappelant le suppositoire, à surface frontale égale. La plupart des voitures moyennes actuelles ont une valeur de C_x qui est proche de 0,3. Mais là encore, les transporteurs de famille et baroudeurs des beaux quartiers ont, en plus de leur corpulence, un handicap de forme. Quelques exemples : Renault Laguna : 0,29 ; Renault Espace : 0,35 ; Volkswagen Touareg : autour de 0,40 ; Toyota Prius : 0,26. Les valeurs peuvent varier légèrement suivant les motorisations à carrosserie égale, l'air pénétrant également sous le capot pour le refroidissement et l'alimentation du moteur.

- Quatrièmement, la vitesse est très importante pour la résistance à l'air, puisque doubler la vitesse quadruple la force à vaincre (donc l'énergie à dépenser, pour une distance donnée) à cause du carré ! Pire, si on raisonne maintenant sur la puissance nécessaire pour fendre l'air, comme elle se calcule en multipliant la force par la vitesse, elle est proportionnelle à la vitesse *au cube*⁸. Autrement dit, multiplier par 2 la vitesse nécessite une puissance 8 fois supérieure, ou la multiplier par 3 une puissance 27 fois supérieure. Voilà pourquoi dépasser la barre des 400 km/h demande, pour la Bugatti Veyron, plus de mille chevaux-vapeur.

Reprenons notre voiture type de 1 300 kg ; sa masse ne nous renseigne évidemment pas beaucoup ni sur sa surface frontale, ni sur son coefficient de traînée. Consultons quelques revues automobiles, et tirons-en des valeurs courantes pour les véhicules de la production actuelle, dans la catégorie des voitures familiales ou compactes : une surface frontale de 2,1 m² et un C_x de 0,30 sont des chiffres très courants. Enfin, la masse volumique de l'air, à la pression atmosphérique standard et à 15 °C, vaut 1,2 kg/m³. Nous obtenons dans ces conditions quelques valeurs de puissances pour différentes vitesses :

Vitesse (km/h)	Vitesse (m/s)	Puissance aérodynamique (kW)	Puissance aérodynamique (ch)
30	8,3	0,2	0,3
50	13,9	1,0	1,4
90	25,0	6,0	8,1
110	30,6	10,9	14,5
130	36,1	18,0	24,5

Nous avons l'habitude, ce qui est logique, de juger la dépense énergétique de notre voiture (que nous mesurons en litres de carburant) par rapport à la distance parcourue. Pour passer d'une puissance à une énergie, il suffit de la multiplier par le temps pendant

8. Plus précisément, $P_{aéro} = (1/2) \rho S C_x v^3$.

lequel est développée cette puissance ; mais il faut bien entendu tenir compte, si nous nous intéressons à la distance, du plus grand chemin parcouru pour un temps donné si la vitesse augmente. En suivant ce raisonnement, nous pouvons comprendre que toutes les dépenses énergétiques ne se « valent » pas :

- En première (et très grossière) approximation, celles liées aux variations de vitesse, mais excluant les effets aérodynamiques, n'ont pas d'importance quand il s'agit d'estimer ce qu'il en coûte pour aller d'un point A à un point B, la voiture étant arrêtée au départ et à l'arrivée : son énergie cinétique est, finalement, nulle en A comme en B ! En pratique, les choses sont bien sûr plus subtiles : de fortes accélérations amènent à utiliser davantage les freins pour ralentir, donc à gaspiller le travail fourni par le moteur. Inversement, des accélérations trop faibles contraignent le moteur à fonctionner à faible puissance, là où son rendement est médiocre⁹. L'idéal, sur ce chapitre, est donc d'adapter la conduite pour que le moteur tourne à régime moyen.
- Les dépenses énergétiques associées aux variations d'altitude sont rarement maîtrisables par l'automobiliste... quand la route monte, il faut bien la suivre, et quand elle descend aussi ! Difficile là de dire autre chose que des évidences : la voiture consommera forcément plus en côte qu'en descente pour le même nombre de kilomètres. Mais à variation d'altitude nulle entre le départ et l'arrivée, il n'est pas forcément intéressant que la route soit horizontale, pour les mêmes raisons que ci-dessus : un moteur travaillant trop paresseusement ne peut atteindre son meilleur rendement.
- La dépense d'énergie associée au roulement est directement proportionnelle à la distance, puisque la force qui lui est associée est constante ; c'est donc une « dépense de base », constante pour

9. Au moins pour les moteurs thermiques ; la situation s'inverse avec des piles à combustible comme nous le verrons.

une distance donnée, qu'il faut se résoudre à payer et se contenter de minimiser au moyen de pneus pas trop larges, à faible résistance au roulement et suffisamment gonflés.

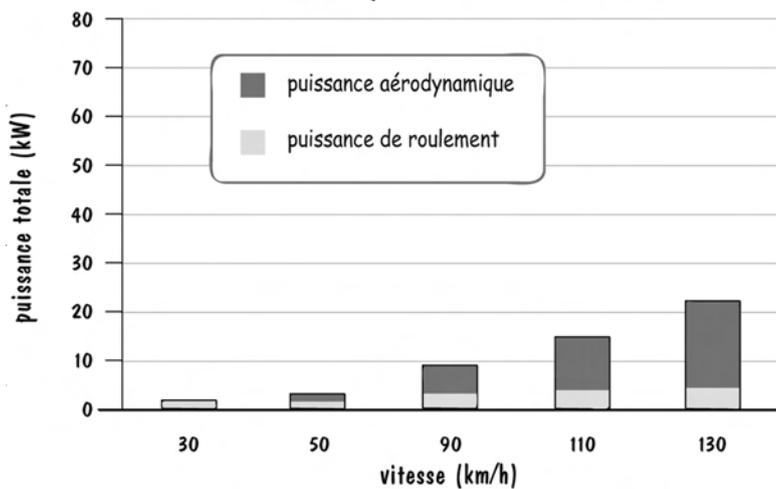
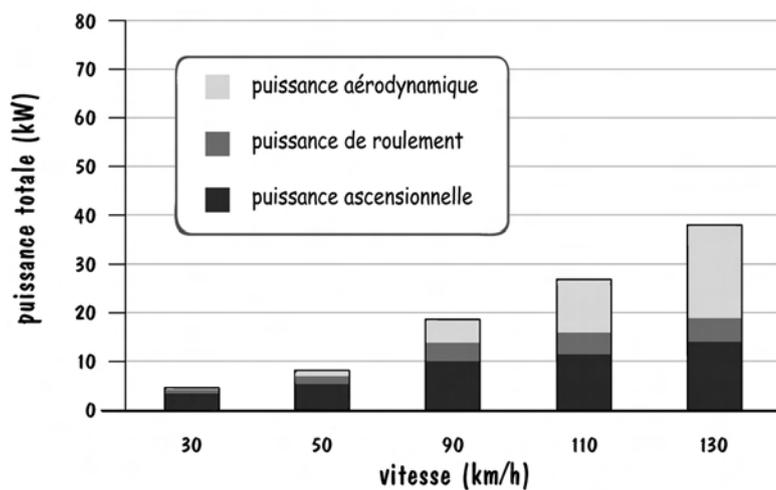
- Enfin, il subsiste quand même un chapitre sur lequel la conduite peut influencer de façon marquante la consommation d'énergie : la vitesse. Au moins là c'est simple : moins on va vite, moins on utilise d'énergie pour fendre l'air, à distance parcourue égale¹⁰.

Bref, pour résumer cette petite analyse du travail fourni par le moteur, on peut retenir deux choses : d'abord, les conditions courantes de conduite amènent naturellement des variations de puissance utilisées très importantes, les gros besoins de puissance n'étant rencontrés qu'en accélération et en côte dans le cadre des vitesses légales (voir les graphiques des deux pages suivantes). Par exemple à 130 km/h sur autoroute horizontale à vitesse stabilisée, l'addition des puissances nécessaires au roulement et à la pénétration de l'air (pas d'accélération, pas de montée) ne conduit dans notre exemple qu'à 23 kW environ ou 31 ch ; même si elle est légèrement sous-estimée (la transmission elle-même consomme un peu de puissance, et nous avons négligé des consommations annexes¹¹), cette valeur reflète assez bien la réalité : une voiture moderne n'a pas besoin de plus de 30 kW pour maintenir sa vitesse de croisière sur autoroute en pays plat. Le moteur n'utilisera donc sa puissance maximale, nécessaire pour le confort et la sécurité, que pendant une faible fraction de son temps d'utilisation. Nous verrons plus tard l'importance de ceci.

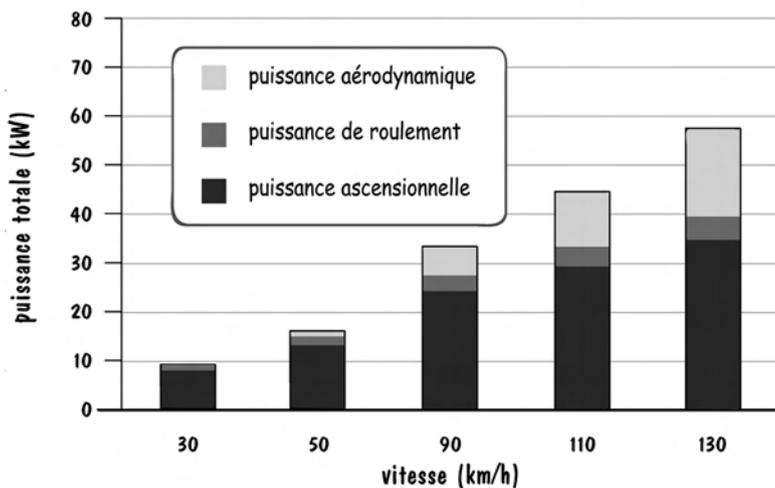
Ensuite, rien ne sert de courir, les hautes vitesses sont nécessairement gourmandes en énergie. Elles le sont même plus que l'on croit, parce que leur voracité est en partie masquée par un effet de compensation : en roulant lentement, on exige moins de puissance du moteur, qui du coup est moins efficace car fonctionnant loin

10. Cette énergie varie proportionnellement au carré de la vitesse, elle est donc plus de deux fois plus importante à 130 km/h qu'à 90 km/h. En effet $130/90 = 1,444$ mais $(130/90)^2 = 2,086...$

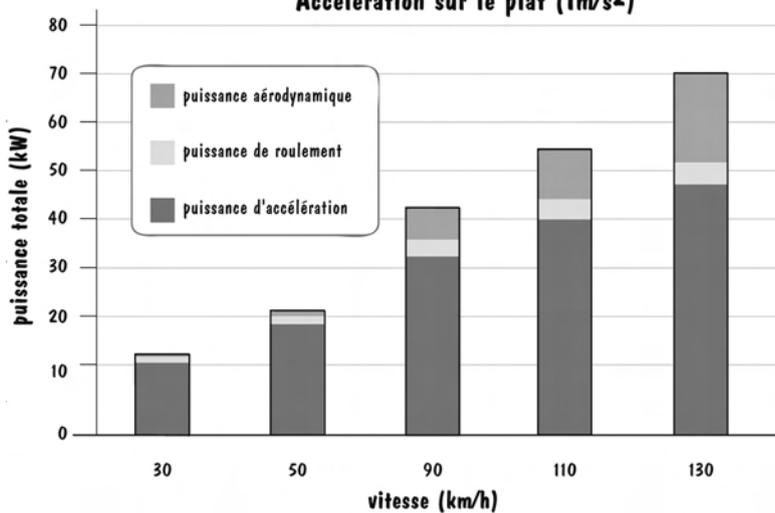
11. Alternateur, assistance de direction, de freinage...

Terrain plat - vitesse constante**Montée à 3% - vitesse constante**

Montée à 7,5% - vitesse constante



Accélération sur le plat (1m/s²)



de son régime idéal. Il demande certes moins de carburant pour la même distance qu'en roulant plus vite, mais pas en proportion du moindre travail à fournir... en tout cas lorsqu'il s'agit d'un moteur thermique. Autrement dit, si les voitures avaient le même rendement à toutes les vitesses (donc à toutes les puissances) cela constituerait un encouragement financier très net à rouler moins vite !

Les graphiques des deux pages précédentes permettent de se faire une idée de ce à quoi sert la puissance mécanique du moteur, toujours pour notre voiture type de 1 300 kg. L'accélération de 1 m/s^2 choisie correspond grosso modo à une valeur typique dont est capable en reprise une honnête berline actuelle dans la zone des 80 à 90 km/h.

Par ailleurs, il est clair que des accessoires divers, certains de confort comme la climatisation, la direction assistée, et d'autres plus indispensables comme les phares, le servofrein, l'alternateur rechargeant la batterie etc., viennent encore « pomper » le travail du moteur. Finalement, seule la chaleur est gratuite (puisque produite de toute façon en grande quantité par les moteurs thermiques), ce qui explique qu'on n'a pas besoin de s'en priver pour rouler confortablement en hiver... mais pose aussi un sérieux problème aux voitures électriques, qui elles n'en produisent quasiment pas !

PARTIE 2

LA CONCURRENCE DES ÉNERGIES

4

Un démarrage interminable

Si le fardier de Cugnot s'est ébranlé dès 1769, au moyen d'une machine à vapeur assez primitive pas encore équipée des innovations de Watt, les premières automobiles particulières ne sont apparues qu'à la fin du XIX^e siècle. Ce n'est que vers 1889, quand l'Allemand Gottlieb Daimler construisit un moteur à explosion léger à deux cylindres, que les ancêtres de nos voitures commencèrent à sillonner les routes sous des noms aujourd'hui familiers : Benz, Peugeot, Panhard, Renault...

Pourquoi tant d'attente ? Dès lors qu'il était possible de créer du mouvement à partir d'une source de chaleur, n'était-il pas simple de mettre ce moteur sur des roues et d'inventer l'automobile, fût-elle moins perfectionnée que celle que nous connaissons actuellement ?

Hélas, non. Pour qu'un moteur soit adapté à la tâche qu'on lui demande, il doit être choisi en fonction d'au moins deux critères essentiels : sa puissance et son rendement. Comme on l'a déjà dit, la puissance mesure la rapidité avec laquelle le moteur peut fournir un travail, et son rendement détermine la quantité de combustible qu'il

utilisera pour un travail donné. Pour un véhicule qui doit emporter sa source d'énergie avec lui, cette dernière considération est d'une importance cruciale : plus le rendement est faible, plus le véhicule devra emporter une grande quantité de combustible pour le même travail fourni. Si le rendement est vraiment très mauvais, et le combustible relativement lourd, on peut en conclure que le moteur servira essentiellement à transporter son propre combustible avant toute charge utile ! Ou alors, il faudra se contenter d'une autonomie très réduite. Or les premières machines à vapeur n'étaient ni très puissantes, ni d'un rendement acceptable selon les critères actuels ; on peut dire sans exagération aucune qu'elles produisaient essentiellement de la chaleur et très accessoirement un peu de travail, à un rythme très modéré. Toutefois, leur puissance n'était pas complètement ridicule : même à rendement faible, il est toujours possible d'obtenir une puissance relativement importante... en brûlant beaucoup de combustible dans une grosse machine. Et nous retombons sur le même problème de masse à transporter ! Au tout début du XIX^e siècle, produire une puissance conséquente se faisait au moyen de machines à vapeur très lourdes, incapables de déplacer leur propre masse sur des routes ordinaires où la moindre côte les aurait arrêtées.

Ce n'est donc pas un hasard si les premiers véhicules automobiles furent des locomotives circulant sur voie ferrée. En effet, les pentes y sont strictement contrôlées et toujours faibles, et la résistance au roulement d'une roue en acier sur un rail métallique n'a rien à voir avec celle d'un pneu sur une route même en parfait état : le coefficient de roulement est plus de dix fois inférieur pour le chemin de fer. Pentas légères, conditions de roulement optimales, la voie ferrée se posait naturellement en candidate de choix pour les premières excursions « automobiles », encore condamnées à une puissance dérisoire au regard de la masse transportée. Encore aujourd'hui, même en filant à 300 km/h un TGV Atlantique ne dispose que de 8 800 kW pour 480 tonnes à vide, soit 18 kW par tonne, bien moins que la plus poussive de nos « bagnoles » : le train sera toujours beaucoup moins

vorace énergétiquement que la voiture particulière. Cependant, le rail ne permet pas la liberté de parcours que nous associons au terme « automobile », et c'est sans doute pour cela qu'il nous est étrange d'affubler de cet adjectif une rame de TGV qui pourtant le mérite indiscutablement.

Dès 1804, Richard Trevithick fait rouler la première locomotive à vapeur dans une houillère anglaise, bientôt suivie par ses descendantes à vocation plus commerciale, tirant des trains où quelques voyageurs téméraires faisaient leur première expérience de locomotion terrestre non animale. En effet, les lignes de chemin de fer n'avaient pas attendu l'utilisation de la machine à vapeur pour être construites, mais la traction était à l'origine hippomobile. En 1825, l'ingénieur britannique George Stephenson impose sa locomotive sur la première ligne régulière de voyageurs entre Stockton et Darlington, d'un écartement entre rails de quatre pieds et huit pouces et demi (1 435 mm), toujours en vigueur aujourd'hui pour le TGV et les autres trains dans la plupart des pays. Quelques années plus tard, en octobre 1829, sa locomotive *Rocket* (fusée) remporte les *Rainhill Trials*, un concours lancé par la *Liverpool and Manchester Railway Company* pour trouver la meilleure machine capable de tirer une charge de vingt *tons* à une vitesse de dix *miles* par heure. En 1830, la ligne Liverpool-Manchester est ouverte.

Parallèlement, des engins routiers similaires sont construits : en 1835 naît l'ancêtre des autobus, le premier service régulier automobile de France, entre Paris et Versailles. Un remorqueur à vapeur, construit par l'ingénieur allemand Charles Dietz, y tracte une diligence ; le trajet est parcouru en une heure et quart. Cependant l'essor de ces locomotives routières sera incomparablement moins spectaculaire que celui de leurs homologues sur voie ferrée : ces poids lourds s'accommodaient mal des routes au revêtement très aléatoire de l'époque et contribuaient même, par leur masse associée à leur quasi-absence de suspension et leur ignorance totale des pneumatiques, à leur dégradation accélérée ! Pour preuve, les difficultés que rencontra le constructeur français de voitures à vapeur Amédée Bollée des

dizaines d'années plus tard, et dont l'*Obéissante* lancée en 1873 reste aujourd'hui célèbre : si chacun s'accordait pour reconnaître à ce véhicule à douze places, comme aux autres qu'il construisit, d'indéniables qualités¹, peu de monde s'empressa de prendre commande. Découragé, l'inventeur, face aux difficultés financières, décida de ne plus s'occuper que de la fonderie de cloches, son activité initiale. Le chemin de fer, lui, était déjà le roi incontesté du transport rapide et économique.

Car pour corriger la tare profonde de ces machines à vapeur, qui les empêchait de faire naître la *véritable* automobile, celle dont l'usage allait devenir tellement universel qu'il envahirait notre existence, il fallait impérativement faire des moteurs plus puissants et légers. Déjà, la victoire de Stephenson face à ses concurrents tenait à une innovation allant en ce sens : en faisant passer la chaleur issue de la boîte à feu par un grand nombre de tubes fins² en contact avec l'eau de la chaudière, plutôt que par un seul gros conduit comme c'était le cas jusqu'alors pour les autres machines, la *Rocket* augmentait la vitesse des échanges thermiques et donc la puissance motrice. Toutes les locomotives à vapeur ultérieures retiendront cette solution, leur énorme chaudière n'étant pour l'essentiel qu'un cylindre sous pression rempli de très nombreux longs tubes de faible diamètre, qui en cas d'explosion rappelait un paquet de spaghetti éventré. Rappelons-nous toujours cette équation de base : une puissance, c'est une énergie divisée par un intervalle de temps. Raccourcir la durée pendant laquelle est produit un même travail revient donc automatiquement à augmenter la puissance.

Dans une machine à vapeur, l'origine de l'énergie était la combustion du charbon ; certes on pouvait en principe y brûler à peu près n'importe quoi, mais en pratique c'est bien ce combustible, un

1. Notamment, son silence et sa maniabilité extraordinaires. Sa direction était remarquablement moderne en permettant aux roues droite et gauche de braquer différemment afin de suivre la trajectoire géométrique correcte, comme sur nos voitures actuelles.

2. Invention brevetée par le Français Marc Seguin.

solide donc, qui s'imposa au XIX^e siècle pour des raisons pratiques et économiques³. Or un solide ne s'enflamme que par sa surface, et ne libère ainsi de la chaleur que relativement lentement lorsqu'il se trouve sous forme de boulets ; pour développer une plus grande puissance thermique (indépendamment du rendement thermodynamique du moteur, qui mesure le rapport entre le travail utile et la chaleur produite) *il est nécessaire d'augmenter le rapport surface/volume*, pas seulement au niveau des tubes d'une chaudière comme Stephenson l'avait fort bien compris, mais également en amont, *directement au niveau de la source de chaleur*. La recherche de puissance pour un moteur thermique amène donc logiquement à considérer des combustibles sous une forme très finement divisée, permettant une combustion quasi instantanée. Si le charbon comme d'autres combustibles solides (bois...) peut se présenter sous forme de poussière, sa manipulation n'en devient alors que plus problématique voire dangereuse⁴ ; les inventeurs se tournèrent donc vers les combustibles liquides (qu'on peut facilement « vaporiser » en fines gouttelettes) ou gazeux, qui constituent la limite indépassable du rapport surface/volume puisque chaque molécule se trouve « en contact » avec l'oxygène de l'air nécessaire à la combustion, mais imposent en contrepartie des mesures plus contraignantes pour le stockage et la distribution.

3. Peu avant 1900, le mazout commença à être testé comme moyen de chauffage dans les locomotives à vapeur, seul ou en combinaison avec le charbon, en raison de la hausse du prix de la houille.

4. La catastrophe minière de Courrières le 10 mars 1906 (plus de 1 000 morts) montra de façon tragique la puissance que peuvent développer des poussières de charbon.

5

Quand la combustion devient interne

Il est toujours délicat de déterminer *la* première occurrence d'une invention, les premiers essais d'une technique se révélant souvent infructueux ou très approximatifs pour être améliorés longtemps après par un deuxième inventeur, qui permet finalement le véritable démarrage de cette invention. C'est particulièrement le cas du moteur à *combustion interne*¹, qui contrairement à la machine à vapeur (où le foyer est distinct du piston produisant la force motrice) permet en un même endroit de brûler le combustible et de fournir un travail. Les Suisses seront certainement tous d'accord pour attribuer la paternité de cette invention au Valaisien François Isaac de Rivaz², qui dès 1807 prit un brevet « *sur la manière d'utiliser la combustion des gaz inflammables pour mettre en mouvement diverses machines et remplacer la vapeur* ». Il réalise un véhicule très sommaire motorisé suivant ce principe, qui de

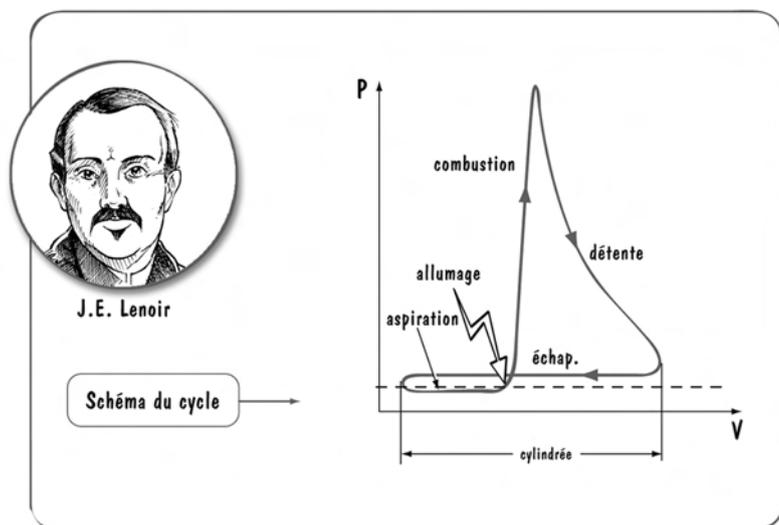
1. Encore appelé moteur à *explosion*, même si ce terme est impropre (il s'agit d'une combustion).

2. En cherchant bien, on trouvera même que le célèbre physicien et mathématicien hollandais Christiaan Huygens étudia vers 1680 (sans le réaliser) un moteur à combustion interne fonctionnant à la poudre à canon...

façon étonnante comporte déjà un allumage électrique par pile de Volta et fonctionne avec un mélange d'air et d'hydrogène³, gaz aujourd'hui très en vogue car sans carbone. Mais si le principe est lancé, l'utilisation pratique est encore très problématique et l'invention ne donne lieu à aucune application d'envergure.

DE LA MACHINE À VAPEUR AU MOTEUR À EXPLOSION

Il faut encore attendre un demi-siècle pour que l'ingénieur belge Étienne Lenoir (1822–1900) mette au point en 1860 le premier moteur à combustion interne réellement utilisable ; c'est un moteur à deux temps fonctionnant au gaz d'éclairage. Comme tout moteur à explosion, il nécessite d'être lancé car il ne peut pas démarrer seul, contrairement à une machine à vapeur qui fonctionne lorsque la source de chaleur a permis d'atteindre une certaine pression. La description de son fonctionnement suppose donc qu'il soit déjà en mouvement...



5 | Étienne Lenoir, concepteur du premier moteur à explosion réellement utilisable.

3. La nomenclature exige plus exactement l'appellation *dihydrogène* pour la molécule composée de deux atomes d'hydrogène.

Le mélange gazeux est introduit dans le moteur en étant aspiré par le mouvement du piston, qui joue alors le rôle de pompe ; puis à mi-course il est enflammé au moyen d'une étincelle, ce qui produit une violente augmentation de pression accélérant le piston : c'est la phase motrice proprement dite, les autres consommant du travail au lieu d'en fournir. Enfin, les gaz brûlés sont évacués par un système d'échappement lors du mouvement inverse et le cycle peut recommencer. Celui-ci étant réalisé en deux courses du piston (un aller-retour)⁴, ce moteur est dit à *deux temps*, mais il est toutefois assez différent des moteurs à deux temps modernes : il ne possède pas de phase de compression avant allumage (ce qui nuit à son rendement, de seulement 4 %) et de plus il se rapproche de la machine à vapeur de Watt par son *double effet* : les cycles se déroulent successivement de chaque côté du cylindre, qui subit des « explosions » alternativement sur ses deux côtés. Comme la machine de Watt également, il possède un régulateur centrifuge à boules pour stabiliser son régime. Contrairement aux machines à vapeur en revanche, qui nécessitent une montée en pression préalable, son démarrage est immédiat, ce qui rend son utilisation beaucoup plus commode.

Le moteur de Lenoir utilise un système d'allumage évolué par bobine de Ruhmkorff⁵, produisant un courant haute tension alimentant une *bougie* en porcelaine de son invention, dont le principe et le nom sont restés sur les moteurs d'aujourd'hui. Il est cependant très lent et donc peu puissant (18 litres de mélange gazeux sont nécessaires pour développer deux chevaux-vapeur !), ce qui n'en fait pas un très bon candidat pour un moteur d'automobile. Lenoir l'adaptera pourtant à un combustible liquide⁶ plus pratique et l'installera sur un véhicule qui lui permettra de faire le trajet entre Paris et Joinville-le-Pont... à la vitesse d'un bon marcheur. Si l'engouement pour le moteur de

4. Ou un tour de *vilebrequin*, l'axe qui fournit un mouvement rotatif après transformation par un système bielle-manivelle.

5. Heinrich Daniel Ruhmkorff (1803–1877) était un ingénieur allemand venu s'installer à Paris en 1826, et célèbre pour la bobine portant son nom, permettant d'obtenir de très hautes tensions à partir d'une source de basse tension continue comme des accumulateurs.

6. L'essence de térébenthine, le premier moteur à explosion viable fonctionnait donc avec un biocarburant...

Lenoir était bien réel au début (utilisé comme moteur fixe), son intérêt pour la locomotion est donc limité, et il faut attendre les travaux d'Alphonse Beau de Rochas en France, puis de Nikolaus August Otto en Allemagne, pour voir naître dans un climat quelque peu conflictuel le *moteur à quatre temps* que nous utilisons tous aujourd'hui.

LA GUERRE DES BREVETS

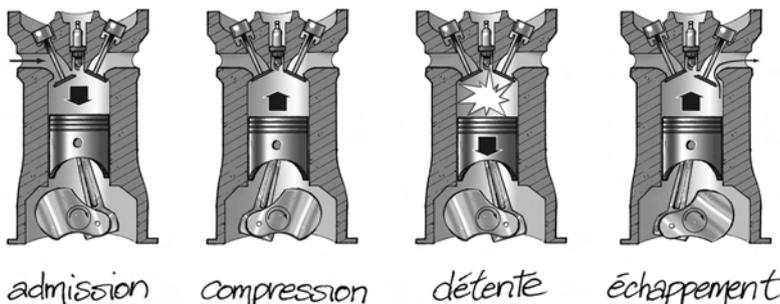
En 1862, l'ingénieur français Alphonse Beau de Rochas (1815–1893) dépose un volumineux brevet intitulé *Nouvelles recherches et perfectionnements sur les conditions pratiques de la plus grande utilisation de la chaleur et en général de la force motrice, avec application aux chemins de fer et à la navigation*. Il s'agit en réalité davantage d'un mémoire scientifique et technique que d'un brevet traditionnel en vue de l'exploitation commerciale d'un dispositif, que l'inventeur ne réalisera jamais concrètement.

Dans le moteur décrit, le mélange inflammable se trouve toujours du même côté du piston, et les quatre phases nécessitent quatre allers-retours de piston ou deux tours de vilebrequin. Pour cette raison, à volume égal brassé par le piston dans le cylindre⁷ un moteur à quatre temps est, aujourd'hui encore, moins puissant qu'un moteur à deux temps équivalents, mais la machine conçue (et non réalisée) par Beau de Rochas comporte une innovation décisive par rapport au moteur de Lenoir : la *compression* du mélange avant allumage. Cette phase étant *consommatrice* d'énergie (le gaz résiste à la compression, comme tout le monde peut en faire l'expérience en gonflant les pneus de son vélo), il n'était pas évident avec les connaissances assez empiriques de l'époque que cette ruse permettrait l'amélioration du rendement ; elle témoigne là d'une analyse réellement thermodynamique, et non seulement technique, du fonctionnement du moteur dans sa globalité. Rappelons pour mémoire que la science thermodynamique, dont Sadi Carnot posa des fondements (passés inaperçus) en 1824, était encore dans sa prime enfance.

7. Ce qu'on nomme couramment *cylindrée*.

Les quatre temps proposés par Beau de Rochas sont successivement :

- l'*admission*, où le mélange détonnant entrant par la soupape d'admission est aspiré par le piston ;
- la *compression*, où le retour du piston comprime ce mélange dans un cylindre rendu étanche par la fermeture de la soupape d'admission, ce qui augmente sa pression et sa température ;
- la *détente* (phase motrice) provoquée par la combustion du mélange après allumage, qui repousse violemment le piston ;
- l'*échappement*, où le deuxième retour du piston permet, avec l'ouverture d'une soupape d'échappement, d'évacuer les gaz brûlés afin que le cycle recommence.



6 | Principe de fonctionnement du moteur à 4 temps.

Il est intéressant de remarquer que Beau de Rochas, s'il envisage l'allumage par étincelle électrique comme dans le moteur de Lenoir, mentionne également la possibilité d'inflammation spontanée du mélange en fin de course du piston, rendue possible par l'augmentation de pression et de température lors de la compression : il a donc entrevu la possibilité qu'exploitera trente ans plus tard Rudolf Diesel dans le moteur qui porte son nom.

Parallèlement, Nikolaus Otto (1832–1891) tente en Allemagne d'améliorer le moteur de Lenoir. Il s'associe au riche industriel Eugen Langen, fils d'un magnat du sucre, avec qui il fonde en 1864

la société *Gasmotoren Fabrik Deutz*⁸, où deux jeunes ingénieurs, Gottlieb Daimler et Wilhelm Maybach, sont encore de parfaits inconnus. Les moteurs qui y sont fabriqués sont alors « atmosphériques », adjectif qui ne désigne pas comme aujourd'hui l'absence de compresseur (turbo ou mécanique) à l'admission, mais bien l'absence de compression comme dans le moteur de Lenoir. Très pratique et empirique, la démarche d'Otto l'amène progressivement à rajouter des temps à son moteur, dont il commence à percevoir les limites, pour finalement « inventer » le moteur à quatre temps... que personne ne connaît puisque Beau de Rochas ne l'a jamais réalisé !

En 1876, le moteur Otto-Langen à quatre temps est fabriqué et mis en vente, tandis que Nikolaus Otto tente par le dépôt d'un brevet de monopoliser la fabrique des moteurs de ce type, obligeant les autres inventeurs à se cantonner aux moteurs à deux temps. À l'exposition internationale de Paris en 1878, le moteur Otto-Langen est primé. Mais en 1884, le brevet commence à être contesté ; enfin, après quelques années de procédures juridiques, un tribunal prononce son annulation après avoir sorti de l'oubli les écrits de Beau de Rochas.

En 1884 également, Édouard Delamare-Deboutteville et Léon Malandin déposent un brevet (non exploité) pour une automobile à quatre roues et moteur à quatre temps utilisant le gaz de pétrole. En cette fin de siècle, l'automobile va naître enfin, sous la forme de véhicules très légers rendus nécessaires par la faible puissance des moteurs d'alors, tournant à quelques centaines de tours par minute, et à l'opposé des tentatives inspirées par la machine à vapeur. En 1886, Carl Benz construit un tricycle ultraléger, propulsé par un moteur monocylindre à pétrole d'un litre de cylindrée, rappelant davantage la bicyclette par sa construction que les locomotives à vapeur. Sage précaution : sa puissance est de 560 W, même pas un cheval⁹. Les perfectionnements se succèdent ensuite rapidement, permettant à

8. « Fabrique de moteurs à gaz de Deutz ». Deutz, ancienne ville allemande, est depuis 1888 un quartier de Köln (Cologne).

9. Pour mémoire, la puissance maximale légale des cyclomoteurs de moins de 50 cm³ est actuellement de 4 kW.

ces curieux engins d'accéder à des vitesses de plus en plus folles : le pneumatique est inventé en 1888 par John Boyd Dunlop, André Michelin le rendra démontable en 1891 ; Daimler et Maybach, ayant créé leur propre société, réalisent en 1889 un moteur léger bicylindre en V tournant au régime, fou pour l'époque, de 630 tours par minute. Il équipera, à partir de 1890, les premières véritables automobiles construites par des noms devenus célèbres depuis : Benz, Peugeot, Panhard... En 1898, le premier Salon de l'automobile se tient à Paris au jardin des Tuileries.

Dans les mêmes années également, en 1892, Rudolf Diesel conçoit un moteur à quatre temps pouvant fonctionner à l'huile d'arachide, sans dispositif d'allumage, le mélange détonnant s'enflammant grâce à l'élévation de température produite par la compression. Mettant en jeu des pressions très élevées, il est cependant lourd et ne sera appliqué à l'automobile que dans les années 20.

6

L'électricité ou l'impossible idéal

On pourrait croire, baignant dans le paysage automobile actuel, que la voiture sans chevaux ne s'est conçue dès le départ qu'avec un moteur thermique ; il n'en est rien. Au contraire, la diversité des modes de propulsion était bien plus grande à ses origines qu'aujourd'hui, et si nous l'avons pour l'instant ignoré, le moteur électrique était un concurrent très sérieux des moteurs à combustion interne. C'était il est vrai plus facile à une époque où ces derniers n'avaient pas encore atteint le raffinement dont ils font preuve actuellement, que ce soit en discrétion sonore, vibratoire ou en maîtrise de leurs émissions polluantes. Car le moteur électrique a tout pour lui, pour des raisons physiques profondes.

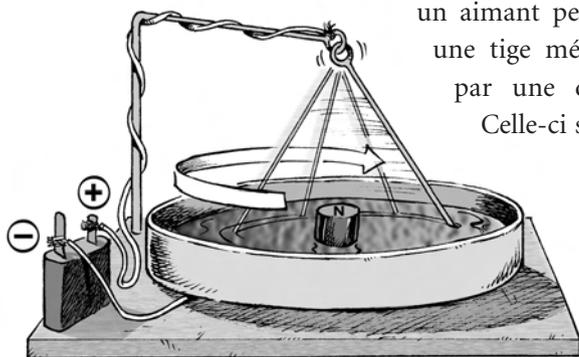
L'ASSOCIÉE DE LA MACHINE À VAPEUR

L'électricité est aujourd'hui d'une telle banalité dans notre vie que nous peinons à imaginer un monde où l'action sur un interrupteur ne ferait pas naître la lumière, où les ordinateurs ne pourraient exister et où le téléphone, même fixe, relèverait de la science-fiction. Pourtant, un tel monde a existé, et c'est encore au XIX^e siècle que le

grand chambardement eut lieu. Certes, les phénomènes électriques étaient connus depuis déjà longtemps, mais ils restaient des curiosités de laboratoire sans application pratique, pour une raison essentielle : les savants connaissaient l'électricité (sous sa forme statique au moins, obtenue par frottement d'objets divers), ils connaissaient le magnétisme (la boussole est connue en Occident dès le XIII^e siècle, et bien avant chez les Chinois), mais ne faisaient pas le lien entre électricité et magnétisme... ce qui les empêchait de produire de l'électricité à la demande, comme nous le faisons aujourd'hui dans les centrales électriques.

En 1819, le physicien et chimiste danois Hans Christian Ørsted (1777–1851) fait ce grand pas conceptuel aux potentialités techniques immenses, en montrant tout simplement qu'une aiguille de boussole placée près d'un fil conducteur pouvait être déviée par celui-ci lorsqu'on y fait circuler un courant. Il y avait donc interaction entre l'univers électrique et l'univers magnétique, découverte qui allait changer la face du monde tout autant que la machine à vapeur, en rendant possible plus tard la production d'électricité et donc l'utilisation indirecte, plus souple et moins contraignante de la force motrice de celle-ci. Peu après, le jeune physicien britannique Michael Faraday (1791–1867), ancien apprenti relieur trop curieux pour le rester, construit en 1821 un bricolage génial, sur la base de ces décou-

vertes. Dans une cuvette remplie de mercure (métal liquide assurant la conduction électrique), où se trouve un aimant permanent, il plonge une tige métallique suspendue par une de ses extrémités. Celle-ci se met à décrire des



7 | Le principe du moteur électrique, inventé par Michael Faraday en 1821.

cercles autour de l'aimant à chaque fois qu'il fait passer du courant dans la tige. L'association d'un champ magnétique et d'un courant électrique produit donc un travail : le moteur électrique est né, même si ce n'est encore que sous une forme inutilisable en pratique.

Dans les années 1830, Faraday formule les lois de l'induction électromagnétique qui allaient constituer les piliers de l'industrie électrique ; elles annoncent également le chef-d'œuvre théorique de James Clerk Maxwell (1831–1879), physicien écossais dont les célèbres équations publiées en 1873 achèvent d'unifier sous une forme mathématique particulièrement élégante le magnétisme et l'électricité, prouvant du même coup que les champs magnétiques et électriques voyagent dans l'espace comme... la lumière, qui n'en est qu'un cas particulier.

Bizarrement, le proto-moteur électrique de Faraday possédait déjà une caractéristique familière des moteurs électriques modernes que ses successeurs se dépêcheront, pour la plupart, d'oublier : la rotation ! En effet, sans doute obnubilés par les va-et-vient incessants des pistons de machine à vapeur qui constituaient le *high-tech* de l'époque, les inventeurs des décennies suivantes conçoivent bien souvent des moteurs électriques alternatifs (au sens mécanique) où le mouvement de translation est ensuite transformé en rotation par un mécanisme bielle-manivelle... Puis les moteurs rotatifs prennent enfin le dessus dans la deuxième moitié du siècle.

DES CARACTÉRISTIQUES DE RÊVE

Les moteurs électriques ne courent pas dans la même catégorie que leurs équivalents thermiques. Quasi silencieux et exempts de vibrations, ne rejetant aucun gaz, ils offrent de plus un rendement indécemment par rapport à leurs concurrents thermiques : quand les premiers moteurs à explosion sont fiers de dépasser les 10 %, les moteurs électriques transforment sans mal les trois quarts de l'énergie électrique en travail¹.

1. Aujourd'hui, les moteurs thermiques d'automobiles dépassent les 30 % de rendement, mais les moteurs électriques s'approchent de la limite absolue en convertissant la quasi-totalité de l'énergie qu'ils reçoivent (plus de 95 %) en travail, dans les meilleures conditions.

Rien de miraculeux à cela en réalité : l'énergie électrique, contrairement à la chaleur, est *ordonnée*², elle est de même nature que le travail mécanique qui fait avancer le véhicule. C'est une forme d'énergie potentielle ; en un mot, elle n'est pas comme la chaleur handicapée par l'entropie. Un moteur électrique peut donc théoriquement avoir un rendement de 100 % ; s'il ne l'atteint pas c'est à cause justement de la dissipation de chaleur inévitable dans les circuits, par effet Joule³, et dans une moindre mesure à cause de frottements mécaniques, eux aussi créateurs de chaleur. De plus, ces moteurs disposent d'un rapport puissance/masse enviable, surpassant là encore les moteurs thermiques, depuis leurs débuts jusqu'à aujourd'hui.

Il ne faut donc pas s'étonner de voir les automobiles naissantes se partager entre la vapeur (qui résiste vaillamment), les moteurs à explosion (le plus souvent à pétrole) et l'électricité, qui fait figure de parangon de modernité : la voiture électrique naît avec la voiture tout court. Quelques premiers véhicules apparaissent dès le milieu du XIX^e siècle, d'un intérêt plus historique que réellement pratique. En 1859, Gaston Planté conçoit le premier accumulateur électrique réversible, à partir de feuilles de plomb et d'acide sulfurique dilué dans l'eau, chimie que nous utilisons encore aujourd'hui pour les batteries 12 volts de nos automobiles. Ces premières versions étaient toutefois très lourdes, de durée de vie assez courte et devaient être chargées de nombreuses fois avant d'atteindre leur capacité maximale, opération qu'on nommait « formation » ; elles restèrent assez confidentielles. Une amélioration décisive est apportée en 1881 par Émile Alphonse Faure, qui a l'idée d'enduire les plaques d'une pâte à base d'oxyde de plomb (minium) et d'acide sulfurique ; la capacité s'en trouve fortement améliorée et la « formation » considérablement raccourcie.

La batterie que nous connaissons aujourd'hui peut dès lors entrer dans l'ère industrielle, avec une capacité de stockage d'énergie

2. La preuve : essayez de mettre les piles à l'envers dans un quelconque appareil électrique...

3. C'est le même effet qui permet aux radiateurs électriques de fonctionner.

de l'ordre de 10 Wh par kg⁴ et qui progressera encore beaucoup jusqu'à la fin du siècle. Elle entraîne immédiatement l'apparition des premières « vraies » voitures électriques, construites par des hommes comme Gustave Trouvé, Magnus Volk ou encore Charles Jeantaud, constructeur limougeaud de voitures à chevaux installé à Paris, et qui sera un concurrent redoutable lors des dernières années du siècle dans la course aux records. La Jeantaud est ainsi la première voiture à avoir établi un record officiel de vitesse, de 63,15 km/h, pilotée par le comte Gaston de Chasseloup-Laubat en 1898, dans la plaine d'Achères en région parisienne. Jeantaud construira également beaucoup de taxis ou « électromobiles » : à la fin du XIX^e siècle, non seulement le chauffeur de taxi parisien ne connaissait pas le nom de Diesel mais il roulait, à une écrasante majorité, dans une voiture électrique ! Qui ne portait pas le nom Mercedes, Volkswagen ou Peugeot, mais Krieger ou Jeantaud... À l'issue d'un concours de « voitures de place » réalisé en 1898, et marquant une victoire sans appel des fiacres électriques, le jury conclut en ces termes : « *Désormais, il est acquis que le fiacre à moteur à essence de pétrole ne saurait constituer un système d'exploitation de voitures publiques dans une grande ville.* » On connaît la suite.

Pouvant être très puissantes comparées à leurs homologues à pétrole (les Jeantaud de record atteignirent 30 kW), les voitures électriques démontrent de façon éclatante leur potentiel lorsque l'une d'entre elles, construite et pilotée par l'ingénieur belge Camille Jenatzy, franchit pour la première fois le 29 avril 1899, toujours à Achères, le seuil symbolique des 100 km/h avec un record à 105,88 km/h. Celui du comte de Chasseloup-Laubat (92,3 km/h), réalisé encore sur une Jeantaud en mars de la même année, est pulvérisé. La voiture de Jenatzy est profilée comme un obus, carrossée dans un alliage d'aluminium, de tungstène et de magnésium, et bizarrement haut perchée sur de petites roues équipées de pneumatiques Michelin quand beaucoup en sont encore à de grandes roues garnies de bandages. Sa silhouette comme

4. Mille fois moins que le pétrole, quand même...

son nom, la *Jamais Contente*, sont restés célèbres et ont éclipsé les Jeantaud dans l'histoire. Développant jusqu'à 50 kW, ce projectile sur roues pouvait atteindre 120 km/h en pointe.

En dehors de ces exploits, les automobiles électriques jouent aussi des rôles bien plus utilitaires en cette fin de siècle : parallèlement à des tramways électriques à accumulateurs, on voit apparaître dans les métropoles comme Paris, New York ou Londres des taxis, des fourgons de livraison et de sapeurs pompiers, des balayeuses-arroseuses, des ambulances électriques... qui tous rappellent, par leur haute stature et leurs grandes roues en bois sans pneus, davantage les voitures à chevaux que les automobiles modernes ! Mais en revanche, la technologie électrique permet des avancées étonnantes : beaucoup de ces voitures sont mues par deux moteurs intégrés aux roues avant, faisant les premières voitures à traction avant (si l'on oublie le fardier de Cugnot...) bien avant les Tracta⁵ de 1927 et Citroën de 1934. Une des plus célèbres d'entre elles, présentée par le carrossier autrichien Jakob Lohner, remporta un vif succès à l'Exposition universelle de Paris en 1900. Avec deux moteurs électriques intégrés aux roues avant, elle se passe de toute transmission ; c'est un jeune ingénieur de 25 ans qui l'a conçue, qui va grâce à elle devenir célèbre : Ferdinand Porsche.

LE FIL OU LE BOULET

Mais si les premières voitures électriques suscitent un engouement remarquable à l'aube du xx^e siècle, quand rien n'est encore joué y compris pour la vapeur⁶, leurs arguments s'amenuisent peu à peu. Les moteurs à essence de pétrole, pourtant encore peu civilisés, deviennent bon marché et rivalisent avec les moteurs électriques en capacités d'accélération, à cette époque bien peu sportives. Et surtout, ils permettent de s'aventurer au-delà des villes sans risque, au contraire des voitures électriques qui souffrent d'une tare bien embêtante : leur

5. Éphémères automobiles (1926–1934) conçues par l'ingénieur français Jean-Albert Grégoire qui mit en pratique le joint homocinétique nécessaire aux tractions avant.

6. On dénombrait en 1900 à New-York 1 681 voitures à vapeur, 1 575 électriques et 936 à essence.

autonomie fort réduite (pas plus de 100 km, souvent la moitié) associée à un temps de recharge pénalisant. Elles doivent choisir entre le fil électrique d'une alimentation externe, solution seulement envisageable pour des véhicules en site fixe comme les tramways, et le boulet pesant de leurs accumulateurs électriques, qui rend très relatifs les avantages de légèreté, de rendement et de puissance des moteurs électriques. En effet la quantité d'énergie stockée par unité de masse se compte, pour les accumulateurs au plomb, en dizaines de watt-heure par kilogramme⁷, quand les dérivés pétroliers arrivent à plus de 10 kWh/kg. Un facteur de plusieurs centaines entre les deux qui, même en tenant compte du rendement minable des moteurs thermiques en ces temps héroïques, condamne les voitures électriques à une autonomie limitée. Pourtant, des voitures électriques participent aux premières compétitions automobiles, même d'endurance : ainsi Jeantaud, encore lui, s'engage dans la première édition de la course Paris-Bordeaux-Paris (1 175 km) en 1895, avec une voiture dont il a entrepris la construction trois mois auparavant... Il parvient à Bordeaux à la moyenne de 16 km/h, loin derrière le premier⁸ Levassor qui filait à 24 km/h, et sans pouvoir entreprendre le voyage retour à cause de problèmes mécaniques à une roue ; mais l'exploit n'a été possible qu'en ayant prévu le long du parcours des relais tous les 40 km où l'attendent des accumulateurs chargés.

Les premières voitures automobiles, quelle que soit leur source d'énergie, n'incitent ni aux grandes vitesses ni aux longs voyages par leur confort et leur « tenue de route » très relatifs, sans parler de leur fiabilité aléatoire ; il est donc naturel que la faible autonomie imposée par la traction électrique n'ait pas constitué un handicap très lourd aux débuts de cette aventure. On peut ainsi lire en 1894 dans *La Nature* :

« On ne prend pas généralement un véhicule sur routes pour des trajets de 100 kilomètres ; pour ces trajets-là, le chemin de fer est tout indiqué, mais on prend un fiacre pour faire des courses, des visites

7. Entre 30 et 45 Wh/kg aujourd'hui, valeurs déjà pratiquement atteintes en 1900...

8. Mais non vainqueur officiel, sa voiture étant biplace et le règlement exigeant quatre places occupées.

et des affaires pendant quelques heures, en revenant sensiblement au point de départ, et c'est pour ces applications, les plus nombreuses, que l'emploi de l'énergie emmagasinée dans les accumulateurs électriques s'impose. »

Mais vérité à la fin du XIX^e siècle ne l'est plus au début du XX^e, en un temps de progrès techniques fulgurants. Ayant goûté à des vitesses qui ne sont plus celles des fiacres à chevaux, l'automobiliste veut aller loin, sur des voitures dont l'architecture devient de plus en plus industrielle et rationnelle. Une fameuse marque américaine comme Studebaker, dont Thomas Edison, inventeur du phonographe et de l'ampoule à incandescence (entre autres !) fut un des premiers clients en 1902, abandonna l'électricité qu'elle avait choisie à ses débuts pour passer aux moteurs à pétrole en 1912. À la veille de la Première Guerre mondiale, les progrès « imminents » des accumulateurs électriques n'étant toujours pas au rendez-vous, la plupart des « véritables » automobiles se conçoivent avec un moteur thermique : que leur carburant serve pour l'essentiel à chauffer l'air ambiant et secondairement à les faire avancer n'est qu'un inconvénient mineur, par rapport au prix d'ami, à la densité énergétique et à la facilité d'utilisation de la réserve d'énergie liquide embarquée.

Puisque ce sont les accumulateurs qui posent problème, et qu'une grande partie des avantages des voitures électriques tient à leur douceur de conduite liée aux moteurs, certains tentent bien de contourner la difficulté en utilisant l'essence comme source d'énergie, un moteur thermique associé à un générateur pour produire l'électricité, et des moteurs électriques pour assurer la propulsion de l'automobile : ces voitures ne sont alors plus électriques à proprement parler, certes, mais... hybrides, comme la Prius de Toyota sortie en 1997. La Compagnie parisienne des voitures électriques de Louis Kriéger s'y lance dès 1903, tout comme Ferdinand Porsche qui a l'idée de modifier sa voiture électrique en l'équipant d'un moteur à essence rechargeant des batteries : loin d'être une nouveauté, la motorisation hybride est plus que centenaire. Mais, à l'origine du mouvement, on retrouve alors la combustion de cette essence.

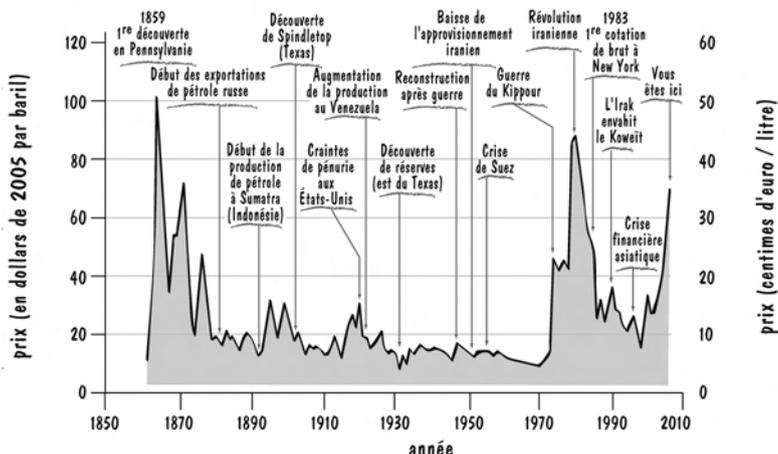
7

Le pétrole ou l'aubaine provisoire

Née sous des formes très diverses, l'automobile semble donc grandir avec un moteur à pétrole ; ses multiples inconvénients (bruit, vibrations, pollution, faible rendement...) étant plus que compensés par la grande densité énergétique des combustibles liquides utilisés. De plus, celui-ci a le bon goût, durant tout le xx^e siècle, d'être une ressource abondante et bon marché. Mieux qu'un long discours, un petit graphique permet de comprendre pourquoi il était économiquement illusoire d'espérer durant toute cette période des alternatives au moteur à pétrole (figure 8).

Même en corrigeant (ce qui est nécessaire pour toute comparaison sensée) le prix du brut en fonction de l'évolution de la monnaie, on remarque immédiatement que pendant environ un siècle, de 1880 au début des années 70, le pétrole s'est maintenu à un cours remarquablement bas faisant de lui une énergie quasiment gratuite. Les deux chocs pétroliers de la décennie suivante ont tiré une première sonnette d'alarme, mais les raisons en étaient davantage politiques que structurelles, le robinet pouvant toujours être grand ouvert en cas de

Évolution du prix du pétrole



8 | Évolution des cours du pétrole depuis les débuts de son règne (source : BP).

besoin. Une fois la fièvre passée, les années 80 et 90 peuvent renouer tranquillement avec les confortables mauvaises habitudes basées sur l'abondance de l'or noir. Les records actuels et futurs, en revanche, sont de toute autre nature.

UN PEU D'HISTOIRE

Pétrole, charbon, gaz naturel : toutes ces ressources énergétiques, qualifiées de fossiles, se sont formées par dégradation de matière organique végétale ou animale en absence d'oxygène, au fond d'océans ou d'étendues lacustres. Il s'agit donc, en quelque sorte, d'une forme d'énergie solaire « en conserve ». Seule une infime partie des êtres vivants s'est ainsi soustraite au processus de décomposition en présence d'air, et a constitué sur des échelles de temps géologiques, quelques dizaines à centaines de millions d'années, la ressource pétrolière que nous exploitons depuis plus d'un siècle. Même dans les rares cas connus de formation rapide (quelques millions d'années), le rapport entre le temps de formation du stock et son temps d'utilisation est de plus de dix mille, ce qui confère sans ambiguïté au pétrole

le statut d'énergie non renouvelable. Quelques auteurs très contestés¹ ont avancé l'hypothèse d'une origine géologique abiotique (c'est-à-dire non liée à la dégradation d'êtres vivants) du pétrole, ce qui ne change en rien les échelles de temps impliquées dans sa formation, au contraire même... tout au plus cela suggérerait l'existence de réserves immenses, qui restent à trouver et à savoir exploiter si elles se trouvent à forte profondeur. Et surtout, cela ne résout pas davantage l'épineux problème du changement climatique engendré par l'augmentation vertigineuse de la teneur en dioxyde de carbone de l'atmosphère terrestre, provoquée par la combustion de toute ressource contenant du carbone fossile.

Même si le pétrole est connu depuis fort longtemps, des affleurements de nappes le faisant parfois suinter à la surface même du sol, son exploitation industrielle peut être datée assez précisément. Au milieu du XIX^e siècle aux États-Unis, l'obtention du *pétrole lampant* par distillation du pétrole brut recueilli en surface permet de l'utiliser pour l'éclairage en remplacement de l'huile de baleine, devenue rare et chère. La demande croît alors au point de faire monter son prix à des sommets vertigineux, jusqu'à vingt dollars de l'époque par baril². Ce qui conduit à encourager la prospection dans le sous-sol et à réaliser un des premiers forages pétroliers à Titusville en 1859, dans l'état de Pennsylvanie aux États-Unis, à la profondeur confortable d'une vingtaine de mètres. La Russie, en 1848, la Pologne en 1854 et la Canada en 1858 avaient déjà testé les mêmes techniques. Trois ans après, en raison de l'importante production des gisements de Pennsylvanie le prix du baril est divisé par 200 ; mais la ruée vers l'or noir commence, les applications de ce liquide nauséabond se révélant bien plus étendues que le seul domaine de l'éclairage, et intéressant tout particulièrement le secteur des transports. Car le pétrole a une qualité toute bête : il est *liquide*. Donc beaucoup plus facile à transporter et à manipuler qu'un solide comme le charbon ou

1. Notamment des géologues ukrainiens comme Nikolai Kudryavtsev dans les années 50, et un astronome autrichien émigré aux États-Unis, Thomas Gold, dans les années 70.

2. 1 baril américain = 159 litres environ.

qu'un gaz comme le gaz « naturel » ou comme le *gaz de houille*, obtenu par distillation du charbon. Et comme nous l'avons vu, seuls les liquides et les gaz sont aptes à libérer rapidement de l'énergie (donc développer une grande puissance) dans des moteurs thermiques. Pour ne rien gâter, la densité énergétique du pétrole, c'est-à-dire la quantité d'énergie que sa combustion dégage par unité de masse (ou de volume) est élevée : 42 MJ/kg contre environ 35 MJ/kg pour le charbon³.

Le début du xx^e siècle voit donc dans le pétrole le candidat idéal pour motoriser à peu près tout ce qui bouge : l'automobile naissante, mais aussi la marine, l'aviation... comment pourrait-on trouver un concurrent sérieux à ce produit miracle ? La prospection s'élargit : on découvre dans les sous-sols d'Iran en 1908 les premiers grands gisements du Moyen-Orient, puis des réservoirs géants sont mis à jour en Irak en 1927, en Arabie Saoudite en 1938, et dans bien d'autres pays aujourd'hui habitués aux places de choix dans l'« actualité » (est-ce un hasard ?). L'automobile, en particulier, peut donc se développer, se démocratiser, ne plus se contenter de faire rêver le peuple, envahir les pays industrialisés, sans le moindre souci pour l'approvisionnement en carburant qui conditionne son existence.

GOULOT D'ÉTRANGLEMENT

Mais au début du xxi^e siècle, au moment même où un nombre rapidement croissant de Terriens accède à cette mobilité individuelle, la courbe de la demande de pétrole semble sur le point de dépasser celle, fluctuante et de moins en moins ascendante, de la production. Il n'est pas encore question de pénurie physique par épuisement des réserves, d'autres facteurs comme le manque d'investissements en raffinage devant être pris en compte, mais l'envolée des prix du brut n'a pas que des excuses conjoncturelles, c'est une tendance à long terme qui se dessine : le pétrole pas cher, c'est fini.

Marion King Hubbert (1903–1989) est quasiment une célébrité mondiale aujourd'hui, pour avoir proposé dans les années 50 un

3. Ou encore un peu plus de 10 kWh/kg (retenons des chiffres ronds !)

modèle mathématique décrivant l'évolution dans le temps de la production d'une ressource limitée (pas uniquement le pétrole : le raisonnement s'applique également au charbon... ou à la morue si on la pêche trop !) Selon ce géophysicien américain, les quantités produites chaque année suivent une courbe en forme de cloche, dont le maximum correspond à peu près à l'instant où la moitié de la ressource a été exploitée. Dès 1949, il alarme ses contemporains (incrédules) en affirmant que l'ère des combustibles fossiles serait de courte durée et que rapidement ceux-ci ne pourraient plus subvenir aux besoins énergétiques de l'humanité. En 1956, il prédit en observant l'évolution de la production de pétrole américain que celle-ci atteindrait son maximum vers 1970 pour décroître ensuite. La célébrité vint lorsqu'on s'aperçut qu'il avait raison.

Bien que parmi les plus gros consommateurs de pétrole au monde⁴, les États-Unis ne disposent en effet que d'une très faible partie des réserves (les deux tiers se situant au Moyen-Orient), qui leur permettrait d'assurer au plus une dizaine d'années de leur consommation. Il était donc logique, et ceci indépendamment de la qualité et de la facilité d'exploitation du pétrole encore dans le sol, de ne pas dilapider les dernières réserves devenant de plus en plus stratégiques : l'exportation assistée de la « démocratie » dans des pays en voie de développement (et aux réserves abondantes) est *a priori* plus juteuse que la récupération assistée du pétrole dans des réservoirs en voie d'assèchement.

Aujourd'hui, sans être au niveau de consommation pétrolière par habitant des États-Unis ou de l'Europe, et de loin, des pays « émergents » à forte population se motorisent au fur et à mesure de leur enrichissement. Avec autour de 100 millions de tonnes de pétrole par an chacune, l'Inde et la Chine dépassent actuellement tout juste la France dans leurs besoins⁵, mais leurs populations représentent

4. Un quart de la consommation mondiale pour un vingtième de la population, environ.

5. Il s'agit là de la consommation totale, non limitée aux transports (un peu moins de la moitié de ce pétrole sert aux transports routiers en France).

respectivement 17 fois et plus de 20 fois le nombre de Français... de toute évidence, il est hors de question pour l'humanité de suivre l'« exemple » des pays industrialisés pour l'utilisation du pétrole, en particulier dans les transports qui constituent une part croissante de la consommation énergétique. Les réserves mondiales d'or noir, estimées à une petite quarantaine d'années *au rythme actuel de consommation*, fondraient alors comme neige au Soleil. Et avec les derniers barils extraits en provenance du Moyen-Orient, on imagine (en vérité, on les constate déjà) les tensions politiques et stratégiques accompagnant la partie descendante du pic de Hubbert.

La lecture des documents de prospective énergétique rédigés par des experts reconnus est parfois instructive... sur le côté hautement aléatoire de leurs conclusions. Ainsi, un document tout à fait officiel intitulé « *Scénario énergétique tendanciel à 2030 pour la France* »⁶, daté de juin 2004 énonce :

« Dans l'optique de bâtir un scénario tendanciel selon des contraintes de modélisation technico-économiques, il a été considéré que les principales hypothèses structurantes devaient être aussi simples que possible. Elles ont été flxées comme suit sur 2004–2030 :

- [...]
- *prix du Brent⁷ égal à 30 \$ par baril (dollar constant de 2003) ;*
- [...] »

Sur le même site gouvernemental français où chacun peut consulter ce document, celui de la direction générale de l'Énergie et des Matières premières, on peut lire que le prix du Brent était effectivement d'environ 30 dollars par baril début 2004... et de 63 dollars début 2006. Gardons-nous d'émettre quelque hypothèse que ce soit sur ce qu'il vaudra en 2030 ; essayons seulement de voir comment l'automobile pourra, et surtout devra, trouver d'autres moyens d'avancer.

6. <http://www.industrie.gouv.fr/energie/prospect/pdf/scenario-2004.pdf>

7. Le Brent, du nom d'un gisement de pétrole situé en mer du Nord au large de l'Écosse, sert de référence pour le pétrole brut au niveau mondial.

8

D'autres candidats ?

LES BIOCARBURANTS

Le pétrole est-il réellement indispensable aux moteurs à combustion interne qui ont mené l'automobile jusqu'au rang où elle se trouve aujourd'hui ? Bien évidemment non, les premières réalisations ayant utilisé à peu près tous les liquides ou gaz susceptibles de brûler... rappelons Lenoir et son essence de térébenthine, lointain précurseur en matière de biocarburants. L'usage intensif des produits de raffinage pétrolier n'est dû qu'à leur abondance et à leur faible coût. Certes, le moteur doit être adapté à son carburant, tous n'ayant pas les mêmes propriétés physiques et chimiques : leur viscosité, leur pouvoir calorifique, leur caractère plus ou moins corrosif sont autant de paramètres dont l'ingénieur motoriste doit tenir compte et qui ne permettent pas, en général, qu'un moteur conçu pour un carburant *A* fonctionne également avec un carburant *B*. Mais rien n'empêche d'optimiser un moteur pour *autre chose* que des produits pétroliers, voire, grâce aujourd'hui au faible coût de l'électronique qui permet de barder un moteur de capteurs et de systèmes d'asservissement, de lui permettre de s'adapter

au carburant qu'on lui donne : pour les marchés où la demande existe, comme le Brésil où les pompes « à essence » distribuent aussi, à tarif préférentiel, de l'alcool (éthanol) de canne à sucre, un constructeur comme Renault propose actuellement des motorisations adaptatives capables de fonctionner indifféremment à l'essence ou à l'éthanol, ou à n'importe quel mélange des deux¹.

Sommes-nous sauvés, donc ? Non, loin de là. Tout est une question d'appétit, que l'automobiliste moderne a vorace. Pour alimenter les deux types de moteurs thermiques que nous utilisons aujourd'hui, celui dû à Nikolaus Otto appelé familièrement « moteur à essence » et celui inventé par Rudolf Diesel, on peut tirer de l'agriculture différents liquides, principalement des alcools (pour les premiers) et des huiles (pour les seconds). Reste à savoir quelles quantités sont nécessaires, et quelles quantités il est raisonnablement envisageable de produire en gardant encore des cultures vivrières.

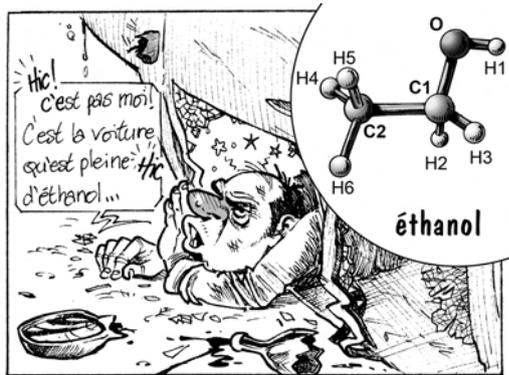


9 | Les biocarburants pour les chevaux mécaniques ?

1. Le 6 juin 2006, Volkswagen annonçait qu'il ne produirait plus, au Brésil, que des véhicules pouvant s'adapter aux mélanges éthanol-essence, dénommé *Flex-Fuel* en anglais international ou *carbomodulables* en français.

L'éthanol

La fermentation des boissons sucrées, chacun le sait, donne des boissons alcoolisées : c'est ce qui fait la différence entre le jus de raisin et le vin, ou entre le jus de pomme et le cidre. Cet alcool que nous pouvons boire (en quantité modérée) est l'éthanol, de formule C_2H_5OH : 2 atomes de carbone, 6 atomes d'hydrogène et 1 atome d'oxygène formant une petite molécule ayant la propriété d'être soluble en toute proportion dans l'eau.

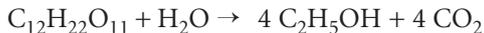


10 | L'alcool :
dans le moteur oui,
dans le conducteur non.

Cet éthanol provient de la fermentation de certains sucres dits « en C6 » car contenant 6 atomes de carbone, ou par extension un multiple de 6. Les principaux sont le glucose, le fructose (tous deux de formule brute $C_6H_{12}O_6$) et le saccharose (de formule brute $C_{12}H_{22}O_{11}$). Les réactions s'écrivent ainsi :



(soit une molécule de glucose ou de fructose donne deux molécules d'éthanol et deux de dioxyde de carbone)



(soit une molécule de saccharose et une d'eau donnent quatre molécules d'éthanol et quatre de dioxyde de carbone).

On obtient donc de l'éthanol à partir des plantes sucrières comme la betterave, la canne à sucre ou le sorgho, mais aussi des plantes amylicées (produisant de l'amidon, comme le maïs, le blé, la pomme de terre) voire des plantes tout court (y compris le bois), car leur

composant essentiel, la cellulose, fait partie comme l'amidon² de la famille des *polysaccharides*. Ces composés sont, comme leur nom l'indique, de grosses molécules produites par l'accrochage chimique de très nombreuses « briques » de sucres. Toutefois, avec l'amidon et la cellulose, il est d'abord nécessaire d'*hydrolyser* les molécules de départ, c'est-à-dire de les couper chimiquement au moyen de molécules d'eau, opération qui se fait grâce à d'autres molécules, les enzymes. Hélas, les différents traitements nécessaires entre la substance naturelle récoltée et l'éthanol final sont consommateurs d'énergie, et il faut veiller à ne pas en dépenser plus pour produire l'alcool que celui-ci ne peut en libérer par sa combustion...

Il est très difficile en ce domaine de donner des chiffres précis, en particulier parce que les bilans incluent ou pas la valeur énergétique de sous-produits non utilisables comme carburants, mais « valorisables » dans l'alimentation animale, dans l'industrie chimique ou comme combustibles solides. On estime par exemple qu'un hectare de betteraves peut produire environ 5,8 tonnes d'éthanol par an, et un hectare de blé 2,5 tonnes³. L'énergie dégagée par l'éthanol lors de sa combustion étant inférieure à celle de l'essence pour une même masse (27 MJ/kg contre 44 MJ/kg), ces quantités correspondent respectivement à 3,5 et 1,5 tonnes équivalent essence par hectare. Ces chiffres peuvent paraître encourageants... tant qu'on ne les compare pas à notre consommation gargantuesque de produits pétroliers. Les Français consomment actuellement environ 50 millions de tonnes de pétrole par an pour les transports (air, terre et mer) dont un peu plus de 40 millions pour les transports routiers. Remplacer ce pétrole par de l'éthanol d'origine agricole⁴ nécessiterait donc, à première vue, une superficie de 14 millions d'hectares pour la betterave et

2. Cellulose et amidon, bien qu'étant des molécules différentes, ont la même formule brute : $(C_6H_{10}O_5)_n$ où les parenthèses représentent la répétition d'une même « brique » n fois, n désignant un grand nombre.

3. http://www.ademe.fr/htdocs/actualite/DNE/Documents/1305_biocarb_dp.pdf

4. Ce calcul n'a qu'une valeur indicative, tout le pétrole consommé ne l'étant évidemment pas sous forme d'essence ; mais les densités énergétiques de l'essence et du pétrole sont proches.

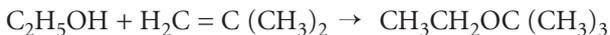
33 millions d'hectares pour le blé, ou encore respectivement 140 000 et 330 000 km². Sachant que la superficie de la France (métropolitaine) est de 550 000 km², et que seule une fraction (300 000 km² environ) est utilisée pour l'agriculture, on voit déjà qu'il faudrait entre la moitié et 110 % de la surface agricole pour fabriquer cet éthanol... en oubliant de manger bien sûr, et surtout de la viande car les 2/3 de cette surface servent actuellement à nourrir le bétail !

Mais la réalité comptable est encore pire, car nous n'avons pas tenu compte de l'énergie dépensée pour les cultures sous différentes formes (machines, engrais, distillation de l'éthanol...), qui noircit encore le tableau. Pour la betterave, cette énergie représente plus de 3 tonnes équivalent pétrole par hectare et pour le blé... à peu près ce qu'il donne en éthanol, au point qu'on peut même se demander si le rendement est bien supérieur à 1 !

Terminons par une remarque de vocabulaire : on désigne souvent par le terme « bioéthanol » cet alcool-carburant. Bien entendu, l'éthanol n'a qu'une formule chimique, et celui des moteurs est exactement le même que celui du vin, de la bière ou des chocolats à la liqueur ! De plus, il n'est généralement pas plus « bio » qu'une salade de chez McDonald's, arrêtons donc d'allonger son nom de façon parfaitement injustifiée.

L'éthyl-tertio-butyl-éther (ETBE)

L'éthanol peut être utilisé pur dans des moteurs adaptés, ou en mélange avec l'essence, à condition de ne contenir aucune trace d'eau, car celle-ci n'est pas soluble dans l'essence et on risque alors une séparation du mélange, comme le vinaigre et l'huile de la vinaigrette. Pour éviter cet inconvénient et utiliser leurs raffineries, les grands groupes pétroliers suggèrent d'utiliser non pas l'éthanol mais *l'éthyl-tertio-butyl-éther*, une molécule obtenue par réaction chimique de l'éthanol avec l'isobutène, qui est un produit de raffinage du pétrole :



Le bilan énergétique global est encore pire que pour l'éthanol de blé, puisqu'il est clairement inférieur à 1 : il faut dépenser plus d'énergie pour le fabriquer qu'on n'en peut retirer ensuite⁵. Ce n'est qu'en prenant en compte l'ensemble des valeurs énergétiques des sous-produits (non utilisables comme carburants), ce qui est certes justifié, qu'il devient supérieur à 1.

Les huiles végétales

Les plantes oléagineuses (colza, tournesol, arachide...), comme leur nom l'indique, peuvent donner de l'huile, éventuellement par simple pression des graines, produisant ce qu'on appelle des huiles végétales brutes. Ces huiles conviennent assez bien (à quelques adaptations près si on part de moteurs conçus pour le gazole) aux moteurs Diesel « à l'ancienne », l'inventeur ayant justement conçu son moteur pour celle d'arachide (et même la poussière de charbon !) avant le pétrole. Mais leur substitution pure et simple au gazole dans les moteurs modernes, qui recourent à des injecteurs à très haute pression et diamètre micrométrique, pose néanmoins de sérieux problèmes, leurs caractéristiques physico-chimiques (notamment la viscosité, très élevée) n'étant pas les mêmes que celles du gazole. De plus, contrairement à l'éthanol qui est une petite molécule bien définie chimiquement et facile à purifier par distillation⁶, les huiles sont de longues molécules plus complexes et qu'une simple pression des graines ne suffit pas à obtenir sous une forme chimiquement pure, donc aux caractéristiques contrôlées.

Le rendement énergétique brut des cultures oléagineuses se situe autour d'une tonne équivalent pétrole à l'hectare et par an avec un avantage pour le colza, ce qui peut sembler moins favorable que pour l'éthanol, mais le bilan final se révèle néanmoins supérieur une fois prises en compte les dépenses énergétiques annexes, avec 0,9 et 0,8 tonne équivalent pétrole à l'hectare pour le colza et le tournesol,

5. Techniques de l'Ingénieur, dossier *Biocarburants*, BE 8 550-7.

6. Hormis la présence de traces d'eau, qui ne présente pas d'inconvénient lorsque l'éthanol est utilisé pur.

respectivement, selon les estimations les plus optimistes. Le cas est donc un peu moins défavorable que pour l'éthanol, mais là encore on reste sous le seuil d'une tonne par hectare, ce qui signifie qu'avec la consommation française actuelle ces huiles végétales ne sauraient remplacer en totalité leurs équivalents pétroliers.

Les esters méthyliques d'huiles végétales (EMHV)

Afin de contourner les inconvénients des huiles végétales brutes, notamment leur tendance à figer à basse température et leur mauvaise compatibilité avec les réglages très pointus des moteurs modernes, l'industrie pétrolière a proposé l'utilisation de produits dérivés des huiles, toujours issus du raffinage : les esters méthyliques d'huile végétale ou EMHV. Leur usage est aujourd'hui « banalisé » en France, c'est-à-dire qu'ils peuvent être incorporés au gazole vendu à la pompe (à raison de 5 % maximum en volume) sans qu'un étiquetage particulier soit nécessaire. Chez nous, ce carburant est souvent appelé Diester (contraction de Diesel et d'ester), qui est une marque déposée par la société Sofiprotéol⁷. En Allemagne où il est en vente pur à un tarif inférieur à celui du gazole, il porte le nom de biodiesel. Bien entendu, ce traitement chimique supplémentaire fait sur les huiles ne saurait augmenter le rendement énergétique de la chaîne de production.

Ainsi, quel que soit le biocarburant produit (qui n'a encore une fois de « bio » que le nom : *agricarburant*, voire *agripétrocarburant*, seraient beaucoup plus justes !), il est illusoire d'espérer dépasser de beaucoup la barre d'une tonne équivalent pétrole à l'hectare. Dans un pays comme la France où la densité moyenne de population est d'un peu plus d'un habitant à l'hectare, et où ce même habitant consomme en moyenne presque une tonne de pétrole par an rien que pour les transports, le calcul est vite fait ! Les raisons profondes de ce médiocre résultat sont au moins au nombre de deux :

- L'énergie tirée de la biomasse est une forme d'énergie solaire « en conserve », qui trouve son origine dans la photosynthèse

7. Société financière de la filière des oléagineux et protéagineux.

réalisée par les plantes. Dans les pays tempérés, en tenant compte de tous les facteurs, y compris le taux d'occupation du sol par la plante, on peut estimer que l'extrême maximum de cette réaction chimique naturelle, défini comme le rapport entre l'énergie solaire reçue et l'énergie stockée dans la plante, est de seulement 0,6 % environ (soit 6 à 7 tonnes équivalent pétrole par hectare et par an)⁸. La situation peut être meilleure sous les tropiques (jusqu'à 2 % avec les plantes les plus efficaces), mais pas d'un ordre de grandeur.

- Notre agriculture moderne « à haut rendement » ne l'est que tant que nous oublions ses besoins énergétiques sous forme de ressources fossiles, jusque-là utilisables à bas prix mais plus pour longtemps (et indépendamment des problèmes écologiques que l'utilisation intensive d'engrais pose). Si on soustrait de sa production l'énergie qu'elle doit aux hydrocarbures, que ce soit sous forme d'engrais ou de carburant pour le fonctionnement des machines, elle se révèle moins productive que l'agriculture traditionnelle⁹.

L'usage de carburants d'origine agricole doit aussi nous conduire à une certaine prudence dictée par les erreurs passées de l'agriculture en général : nous commençons à prendre conscience des limites d'une exploitation intensive de la terre, que ce soit au niveau de la biodiversité, de l'épuisement des sols ou de la pollution des nappes phréatiques. Se lancer dans la production massive de carburants agricoles au moyen de cultures intensives conduira aux mêmes excès, qui risquent d'être un remède pire que le mal. De plus, le marché du pétrole étant mondial, il n'y a aucune raison que celui des biocarburants ne le soit pas. Est-il raisonnable alors de financer de grandes usines de production¹⁰ dans l'espoir qu'elles constitueront un débouché pour les agriculteurs

8. *Traité de génie civil de l'École polytechnique fédérale de Lausanne*, volume 21, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2003, p. 337.

9. *L'économie hydrogène*, Jeremy Rifkin, La Découverte, 2002.

10. En 2006, est construite dans les Pyrénées-Atlantiques une usine de production d'éthanol à base de maïs, dans le cadre d'une diversification des activités chimiques du site industriel de Lacq. Cette culture est cependant gourmande en eau, herbicides et pesticides, et ne permet qu'un rendement énergétique très médiocre pour la production d'éthanol.

locaux, alors que de toute évidence les compagnies pétrolières (qui comptent bien sur l'aubaine pour se faire une image « verte »), achèteront éthanol ou huiles végétales là où le marché sera le plus favorable (c'est-à-dire ailleurs) ? Le premier producteur mondial d'éthanol carburant (52 % du tonnage) est le Brésil, avec des coûts défiant toute concurrence. Des pays comme la Malaisie se lancent dans une déforestation massive pour planter des palmiers à huile en vue d'exporter aux gros consommateurs que nous sommes le carburant « vert » que nous réclamons... en laissant faire le seul marché, il est peu probable que nos agriculteurs et l'environnement y gagnent beaucoup.

Il ne s'agit évidemment pas pour autant de rejeter l'usage des *agri-carburants*, qui sera de plus en plus nécessaire, mais simplement de constater où nous en sommes : nous dilapidons depuis plus d'un siècle une ressource géologique providentielle, bonne à tout faire, aussi bien matière première que source d'énergie, mais épuisable, et nous n'en avons aucune autre capable de la remplacer en totalité. Si substitution il y a, elle ne peut se faire « en bloc » : il faudra diversifier. Et surtout tenter de *valoriser* des ressources aujourd'hui considérées comme déchets, au lieu de reproduire les vieilles habitudes issues d'une ère d'abondance où il n'est pas nécessaire de trop se poser de questions. Il est probable par exemple que la production de carburants à partir de résidus agricoles ou forestiers soit une solution d'avenir, car peu coûteuse en énergie, celle nécessaire aux transformations chimiques étant en grande partie fournie par les déchets du processus. Cette filière dite *ligno-cellulosique* présente également l'avantage, comparativement à d'autres, de ne pas générer de coproduits encombrants dont on ne sait que faire (tourteaux par exemple), et qui n'ont plus aucune valeur marchande dès lors qu'on en produit trop.

FAUSSES SOURCES D'ÉNERGIE

Si le pétrole, comme les carburants d'origine végétale, sont bien des « sources » d'énergie dans le sens où on les trouve dans la nature, il en est d'autres, par exemple l'électricité, qui sont produites à partir

d'autres formes comme le charbon ou les chutes d'eau mais sont en réalité des *vecteurs* d'énergie (ils permettent de faire voyager l'énergie et de la convertir d'une forme à une autre) ou des *moyens de stockage* énergétique (de l'« énergie en conserve », comme l'eau retenue par un barrage), ce qui est très différent. La confusion est d'autant plus facile que les combustibles liquides familiers sont à la fois une source, un vecteur (ils coulent à flot dans des conduites, sont transportés dans des citernes) et un excellent moyen de stockage d'énergie. Pour faire avancer une voiture, il n'est pas *a priori* nécessaire d'y transporter une source d'énergie, mais seulement d'y stocker la quantité d'énergie nécessaire, qui bien sûr doit provenir d'une source, mais pas nécessairement du pétrole ou des carburants végétaux.

L'énergie nécessaire à la locomotion étant de type « ordonné », contrairement à la chaleur, il est logique de chercher un stockage qui appartienne à la même catégorie : c'est le cas des accumulateurs électriques, dont on a vu, au moins au xx^e siècle, les limites liées aux masses très importantes nécessaires. Il existe cependant d'autres moyens de stocker l'énergie, sous une forme cinétique ou potentielle, c'est-à-dire convertissable théoriquement à 100 % en travail utile car il s'agit de formes d'énergie « sans entropie ».

Les gaz comprimés

Chacun d'entre nous l'a observé : un ballon gonflé lâché sur le sol rebondit, parce qu'il restitue en un temps très court l'énergie qu'il avait sous forme cinétique en arrivant au sol, et qu'il a emmagasinée une fraction de seconde sous forme potentielle par l'augmentation de pression du gaz intérieur consécutive à sa déformation. Sur le même principe, un réservoir, rigide cette fois, de gaz neutre sous pression (de l'air par exemple) peut restituer l'énergie¹¹ qui a été dépensée pour la compression du gaz, en expulsant ce gaz jusqu'au retour à la pression ambiante.

11. En pratique, légèrement moins, tout comme le ballon qui rebondit un peu moins haut à chaque fois.

Certains¹² ont vu là un moyen de faire fonctionner des voitures avec de l'air comprimé ; cette possibilité est bien réelle mais ne constitue pourtant pas un moyen de stockage performant. Quelques calculs simples permettent de s'en rendre compte ; il ne s'agit pas de déterminer les potentialités réelles du système mais plutôt ses potentialités maximales, dans un monde idéal forcément moins cruel que le monde réel. La pression maximale p_{max} est déterminée par les limites de résistance des matériaux constituant le réservoir ; on sait en faire qui résistent à de très hautes pressions mais il faut également qu'ils ne soient pas trop lourds, sinon cela revient à dépenser l'énergie qu'ils contiennent pour les déplacer... En pratique, une pression de 300 atmosphères est déjà une valeur conséquente nécessitant le recours à des techniques performantes. La pression minimale est, par définition, la pression atmosphérique ; notons-la p_{atm} . Des calculs simples de thermodynamique, accessibles à tout étudiant de première année universitaire scientifique, montrent qu'en première approximation le travail *maximal* récupérable au cours de la détente d'un gaz entre ces deux pressions est obtenu lorsque le gaz reste à la même température (détente dite *isotherme*) et vaut en joules¹³ :

$$W = p_{max} V \ln (p_{max}/p_{atm})$$

où V est le volume du réservoir en mètres cubes, \ln le logarithme népérien (désolé pour les non-matheux !) et où les pressions sont exprimées dans leur unité légale, le pascal¹⁴ ($1 \text{ atm} = 10^5 \text{ Pa}$). Ainsi avec un réservoir de 200 litres, on obtient :

$$W = 300 \times 10^5 \times 0,2 \times \ln (300) = 3,4 \times 10^7 \text{ J.}$$

Ces 34 millions de joules ne font, tout compte fait, même pas 10 kWh. Y compris en tenant compte de leur caractère « ordonné », qui est un avantage par rapport à de l'énergie libérée sous forme thermique par un carburant, et en supposant que le moteur susceptible de les

12. Comme le constructeur de voitures MDI, voir : <http://www.mdi.lu>.

13. Le travail est habituellement désigné par la lettre W en raison de l'anglais *work*.

14. En l'honneur de Blaise Pascal et de sa célèbre expérience sur la pression atmosphérique qu'il réalisa entre Clermont et le sommet du Puy-de-Dôme ; symbole : Pa.

utiliser est parfait (rendement de 100 %), cela ne fait guère que l'équivalent de 2 ou 3 litres d'essence... sachant que le calcul est très optimiste, il n'y a pas de quoi aller bien loin. Le constructeur MDI concède d'ailleurs que 340 litres d'air comprimés à 300 bars représentent, en pratique, l'équivalent énergétique de moins de 2 litres d'essence.

Les volants d'inertie

Si le stockage d'énergie potentielle sous forme de gaz sous pression est peu intéressant, peut-être est-il possible de stocker directement l'énergie sous forme cinétique ? Pour des raisons évidentes, il ne paraît pas possible d'utiliser l'énergie cinétique de *translation* d'une masse se déplaçant à grande vitesse en ligne droite, mais en revanche il est possible d'embarquer sur un véhicule une masse tournante possédant une énergie cinétique de *rotation*¹⁵. C'est ce qu'on nomme généralement un *volant d'inertie* ou *flywheel* en anglais, qui se présente sous la forme d'une masse cylindrique tournant à haute vitesse dans un boîtier sous vide (afin d'éviter les déperditions par frottement avec l'air) et stockant ou restituant l'énergie cinétique par l'intermédiaire de moteurs électriques.



11 | Principe du stockage d'énergie par volant d'inertie.

15. Pour des raisons mécaniques qu'on ne détaillera pas, il faut en réalité deux masses tournant en sens contraire, mais le raisonnement qui suit reste valable.

L'énergie ainsi emmagasinée est d'autant plus grande que la vitesse de rotation de la masse est élevée ; plus précisément pour un cylindre de masse m et de rayon R tournant à la vitesse ω , elle est égale à :

$$E = (1/4) m R^2 \omega^2.$$

Dans cette formule, l'énergie est obtenue en joules lorsque la masse est en kilogrammes, le rayon en mètres et la vitesse de rotation ω en radians¹⁶ par seconde. Il suffit donc d'augmenter la vitesse de rotation pour augmenter l'énergie... mais tous les matériaux ont leurs limites, qu'il convient de ne pas dépasser sous peine de faire exploser le cylindre sous la simple action de la force centrifuge ! Un calcul simple de mécanique montre que l'énergie maximale stockée par unité de masse dépend de la contrainte à la rupture du matériau (la force de traction par unité de surface qu'il est capable de supporter sans se rompre, notée souvent par la lettre grecque « sigma », σ) et de sa masse par unité de volume ρ selon la simple formule :

$$\text{énergie / volume} \approx \sigma/\rho.$$

Le stockage est donc le plus efficace, paradoxalement, lorsque la masse volumique est faible... à condition que la contrainte à la rupture soit élevée bien entendu ! Ce qui conduit à utiliser des matériaux composites à base de fibres de carbone, par exemple, pour lesquels l'ordre de grandeur de la densité énergétique obtenue est au mieux le mégajoule par kilogramme, certes inférieur à celle du pétrole (42 MJ/kg) mais pas ridicule quand même. Cependant, la nature même du dispositif (masse tournant à très grande vitesse) le rend dangereux en cas de défaut dans le rotor : une fissure peut entraîner une rupture catastrophique à grande vitesse, les débris expulsés se révélant alors aussi dangereux que des projectiles d'arme à feu... Ce risque impose la réalisation d'une enceinte très résistante qui vient dégrader le rapport entre l'énergie stockée et la masse du système ; en pratique, on aboutit à des densités énergétiques de l'ordre de 100 Wh/kg, soit à peu près

16. Le radian est l'unité « naturelle » d'angle ; 180 vaut π (3,1415926...) radians.

la même chose que les batteries de technologie récente, avec toute-fois l'avantage d'une puissance beaucoup plus importante, l'énergie pouvant être stockée et restituée très rapidement. Mais c'est clairement le risque de rupture catastrophique qui pose problème, à plus forte raison dans des véhicules transportant des passagers.

Le dihydrogène

Qui n'a pas entendu parler de « l'hydrogène » ? À en croire certains, il s'agirait là de l'énergie du futur. Les guillemets sont volontaires : il faut commencer par dissiper un malentendu, car l'*hydrogène* est un *élément* parmi la centaine existant dans l'univers (de symbole H) et c'est même le premier de la liste car il est le plus léger, formé uniquement d'un proton et d'un électron. En revanche, le *dihydrogène* est une *molécule* formée de deux atomes de l'élément hydrogène. C'est lui que tout le monde appelle « hydrogène », par abus de langage comme lorsqu'on parle de l'oxygène ou de l'azote de l'air, qui sont en fait le dioxygène et le diazote.

Or c'est bien la molécule de dihydrogène qui a un intérêt énergétique, absolument pas l'atome, qui lui se retrouve un peu partout associé à pratiquement n'importe quoi : bien sûr dans l'eau pour former avec l'oxygène la molécule d'eau H₂O, mais également dans le pétrole, la confiture, le bois, les pets de vache, le pain de seigle ou les dentelles du Puy... Or si l'*élément* hydrogène est particulièrement abondant, la *molécule* de dihydrogène est, elle, quasiment absente sur Terre à l'état naturel : il est donc nécessaire de la fabriquer, ce qui coûte de l'énergie.

Pourquoi le dihydrogène est-il intéressant ? Il peut être utilisé de deux façons : soit comme un combustible traditionnel, dont la réaction avec l'oxygène de l'air ne donne que de l'eau, soit pour alimenter, toujours avec l'oxygène de l'air, des *piles à combustible* qui sont des dispositifs produisant à la fois de l'électricité, de la chaleur et de l'eau¹⁷.

17. Remarquons au passage que nos moteurs Otto et Diesel produisent aussi de l'eau : c'est elle que nous voyons en hiver sous forme de fumée blanche, lorsqu'elle se condense en sortie du tuyau d'échappement. Le dioxyde de carbone, lui, ne se voit pas...

C'est donc un moyen de stockage d'énergie, qui peut à la fois remplacer les combustibles pétroliers des moteurs thermiques et concurrencer les batteries pour l'alimentation de moteurs électriques. Nous en reparlerons plus longuement car beaucoup d'efforts de recherche et d'industrialisation se concentrent sur lui actuellement, en particulier dans le secteur automobile, mais retenons au moins pour l'instant une chose : *le dihydrogène n'est pas, et ne sera jamais, une source d'énergie ;* seulement un moyen (assez peu commode d'ailleurs) de la stocker.

PARTIE 3

LA LOGIQUE DE L'HYBRIDATION

9

Des besoins très inconstants

Allons-y carrément : sautons un siècle ! Nous avons laissé l'automobile à ses premiers tours de roues, alors que les moteurs à pétrole commençaient à s'imposer. La disponibilité et le coût du carburant aidant, l'âge d'or de la voiture individuelle que constitua le xx^e siècle a vu se raffiner sans cesse les moteurs et les châssis, se rationaliser le style sous les impératifs de l'aérodynamisme, apparaître l'électronique embarquée pour le plus grand bien de la sécurité, du confort et de la dépollution. Mais finalement, osons le dire : la façon d'avancer n'a pas fondamentalement changé, elle repose encore sur ce bon vieux moteur à combustion interne, aux pistons toujours cylindriques sauf niches exotiques pour originaux¹, et dont les seules évolutions concernent la façon de l'approvisionner le mieux possible en air et en carburant, ou encore les ruses de Sioux déployées pour essayer de limiter sa tendance naturelle à vibrer et à casser les oreilles des automobilistes. La voiture

1. NSU, puis Citroën, et aujourd'hui seulement Mazda, ont proposé des automobiles à moteur rotatif, concept très séduisant sur le papier inventé par Felix Wankel dans les années 50, mais souffrant d'une fiabilité problématique et d'une consommation excessive. Des pistons ovales ont aussi été testés en moto (Honda 750 NR)...

électrique a bien tenté çà et là quelques retours, notamment à l'occasion d'offensives méritoires de constructeurs français et américains² dans les années 90, mais sans parvenir à convaincre au-delà de quelques flottes administratives ou d'entreprises, faute essentiellement d'une autonomie suffisante.

Pourtant, depuis peu quelques modèles attirent l'attention des médias, voire la monopolisent, alors que le baril de pétrole s'envole et que les alertes de pollution à l'ozone se multiplient dans les grandes agglomérations ; on parle de voitures « propres » qui associeraient, par une alchimie mystérieuse, les vertus de l'électricité et du moteur à explosion en ne retenant que les avantages des deux. Leur qualificatif d'« hybride » suscite la raillerie chez quelques-uns, qui expliquent doctement avec un sourire en coin que cette solution bâtarde n'est qu'un cache-misère pour voiture électrique avortée, et un coup de pub sans lendemain³. Pourtant, le succès de la formule n'est plus seulement d'estime, surtout dans les pays où les réglementations antipollution très strictes contraignent les moteurs Diesel à faire de la figuration, et quasiment chaque constructeur se vante aujourd'hui de savoir construire, voire de commercialiser, des voitures hybrides. Certains expliquent bien que le consommateur n'en veut pas vraiment vu les faibles avantages apportés pour un surcoût conséquent, et que lorsqu'ils en proposeront, leurs modèles seront bien supérieurs à ceux disponibles aujourd'hui chez les concurrents ; mais il devient de plus en plus difficile de balayer d'un revers de main les questions qui fusent à ce sujet. Alors, opération marketing passagère ou tendance lourde du futur automobile ? Tentons une approche rationnelle du sujet.

2. PSA proposa les 106 et AX électriques, General Motors les remarquables EV1, envoyées en 2005 à la destruction obligatoire malgré les protestations de leurs utilisateurs (qui n'en étaient pas propriétaires).

3. Voir par exemple l'intervention de Noël Goutard, ex-PDG de Valéo, dans l'émission France Europe Express de France 3, le 18 octobre 2005.

DU VIRTUEL AU RÉEL

À moins de cent chevaux⁴, ça n'avance pas. C'est en gros ce que l'automobiliste moyen (ne) se dit et s'entend dire aujourd'hui, lorsqu'il ou elle se renseigne pour se procurer une automobile familiale capable d'emmener ses proches dans des conditions de confort, de sécurité et de performances « suffisantes ». Une voiture « de père de famille », comme la Peugeot 407 par exemple, dépasse la tonne et demie à vide, et l'automobiliste moderne considère comme « indispensable » de pouvoir accélérer franchement quand il roule déjà à 120 km/h ou plus sur autoroute. Dès lors, il paraît assez utopique de vendre sous le nom d'automobile de frêles quadricycles motorisés comme des tondeuses à gazon, ce qui fut pourtant fait aux temps héroïques que nous avons mentionnés.

Mais de ces cent chevaux, combien sont réellement utilisés lors d'un parcours type ? Même en considérant comme « normale » la surcharge pondérale certaine de nos voitures contemporaines, combien de canassons sont à l'œuvre pour aller au supermarché, rendre visite à belle-maman, partir en vacances par l'autoroute ou flâner sur les routes de campagne ? L'indicateur de puissance effective n'étant encore qu'une rareté⁵, l'automobiliste l'ignore totalement, à moins d'être ingénieur motoriste.

Nos considérations quelque peu techniques de la fin de la première partie permettent de répondre dans les grandes lignes à cette question. Les calculs et leurs représentations graphiques sont formels : on a besoin de beaucoup de puissance lors des accélérations marquées (particulièrement à haute vitesse) et dans les côtes prononcées. Le reste du temps, et même sur autoroute à la vitesse légale maximale de 130 km/h, certaines automobiles modernes bien profilées se contentent de la puissance⁶ d'un moteur de 2 CV ! Car rappelons-le, sur route plane à vitesse constante, la masse n'est rien, la résistance à

4. 73,55 kW, pour les modernes.

5. Lexus (branche « luxe » de Toyota) en a introduit un sur le RX 400h, gradué en kW comme il se doit pour la vitrine technologique qu'est ce gros tout-terrain de luxe, à motorisation hybride.

6. La 2 CV 6 possédait un moteur de 602 cm³ et 21 kW environ.

l'avancement par le roulement et, surtout, la pénétration dans l'air sont tout. Certes, une voiture plus massive devra généralement s'équiper de pneus plus gros pour éviter de les faire crier au premier virage, dégradant indirectement sa fluidité aérodynamique et augmentant quelque peu sa résistance au roulement, mais de façon marginale. La masse n'est excessive que dans les accélérations et les montées... ou les freinages et les descentes, mais pour les freins cette fois.

Or l'automobiliste ne passe pas son temps à accélérer vivement, la vitesse légale étant bien vite atteinte, ni à gravir le col du Tourmalet, même en habitant à son pied : ses chevaux ou kilowatts sont donc là pour répondre à une demande réelle mais passagère, et constituent le reste du temps un luxe aussi superflu que les nombreux litres d'huile et kilos de sucre stockés naguère par ma grand-mère en prévision de la prochaine guerre. Mais où est le problème, me direz-vous ? Sachant qu'il paraît difficile de changer le moteur en cours de route, et qu'un modèle de 100 kW peut *a fortiori* se contenter de n'en fournir que 10 ou 20 si telle est la demande du conducteur, quel désavantage y a-t-il à utiliser un moteur le plus souvent surpuissant, hormis celui de le payer plus cher ?

QUI PEUT LE PLUS, PEUT LE MOINS... MAIS MAL

Si l'énergie était gratuite, le mieux ne serait effectivement pas l'ennemi du bien ; mais la fin du pétrole à bas prix nous force à un peu plus de mesure. Rappelons la définition du rendement d'un moteur thermique : c'est le rapport entre le travail mécanique utile qu'il fournit et l'énergie qu'il consomme sous forme de chaleur, apportée par la combustion du carburant. Pour écrire vite et faire sérieux, on le désigne souvent par la lettre grecque éta (η) :

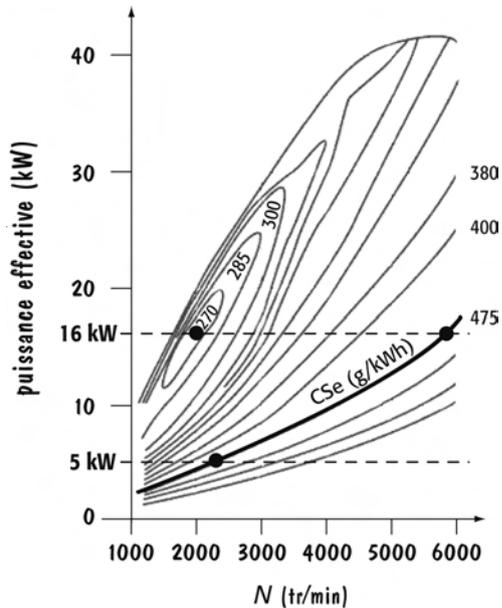
$$\text{rendement : } \eta = \frac{\text{travail fourni}}{\text{chaleur consommée.}}$$

Ainsi, on pourra lire dans des fiches techniques qu'un moteur moderne est gratifié d'un « excellent » rendement $\eta = 0,33^7$... mais il

7. Par exemple, pour un moteur à essence.

s'agit là d'un rendement *maximum*. Car en plus de chauffer le milieu ambiant plus qu'ils ne font avancer les véhicules pour les raisons thermodynamiques que nous avons déjà évoquées, les moteurs à combustion interne de nos automobiles ont un défaut qui accentue cette tare : sous-utilisés (ou sur-utilisés, mais c'est bien plus rare et moins critique), leur rendement passe de médiocre à lamentable. Pour rendre les choses plus précises, les ingénieurs utilisent un diagramme sur lequel ils portent l'ensemble des situations possibles de fonctionnement du moteur et les *consommations spécifiques*⁸ correspondantes, exprimées généralement en grammes de carburant par kWh de travail fourni. Cette unité biscornue n'exprime certes pas un rendement⁹ *stricto sensu*, mais sachant qu'une même masse du même carburant libère toujours la même quantité de chaleur à la combustion, le chiffre obtenu est inversement proportionnel au rendement : meilleur est ce dernier, plus faible est la masse de carburant brûlée pour 1 kWh de travail fourni. Tout comme lorsqu'on mesure les consommations en litres aux cent kilomètres, sauf que là c'est du moteur seul qu'il s'agit. Attention toutefois : tous les carburants ne dégagent pas la même

12 | Diagramme de consommation spécifique d'un moteur à essence (source : Techniques de l'Ingénieur).



8. Qui n'ont rien à voir avec la consommation du véhicule ; elles sont caractéristiques du moteur seul.

9. Qui par définition n'a pas d'unité, puisqu'il est le rapport de deux énergies.

chaleur par gramme brûlé, ni surtout par litre, les densités n'étant pas les mêmes entre, par exemple, l'essence et le gazole ! Il faudra s'en rappeler lorsqu'on comparera les vertus des moteurs de type Otto et de type Diesel.

Dans un tel diagramme, l'axe horizontal représente la vitesse de rotation du moteur, appelée encore *régime* et exprimée en tours par minute, et l'axe vertical la puissance¹⁰ développée par le moteur. Toute la zone située sous la courbe supérieure est utilisable, limitée à gauche par le régime de ralenti du moteur (en dessous, il cale) et à droite par son régime maximum. Les consommations spécifiques sont indiquées par un ensemble de lignes qu'il faut lire comme les courbes de niveau d'une carte de randonnée : si les chiffres portés représentaient l'altitude, on se trouverait donc aux alentours de 2000 tours par minute et 16 kW (qui sont ici l'équivalent des longitudes et latitudes sur les cartes) au fond d'une cuvette entourée de pentes assez raides. Mais il s'agit ici de grammes de carburant consommés par kWh de travail produit, et plus le nombre est petit, meilleur est le rendement : la cuvette (valeur minimale) correspond donc aux conditions optimales de fonctionnement du moteur, là où il se révèle le plus efficace. Sachant que le supercarburant sans plomb dégage 42,9 kJ de chaleur par gramme¹¹, et que 1 kWh vaut 3 600 kJ, le rendement de ce moteur *dans la cuvette* est par conséquent :

$$\eta = \frac{3600}{42,9 \times 270} = 0,31$$

ou peut-être un peu meilleur, le fond de la cuvette étant à une « altitude » légèrement inférieure à 270 g/kWh. Mais ces 31 % sont hélas le cas le plus favorable : si pour obtenir la même puissance d'environ 16 kW, le conducteur s'avise de faire rugir son moteur à près de 6 000 tours par minute (régime où la puissance maximale est bien supérieure, le moteur est donc sous-utilisé), la consommation

10. D'autres représentations utilisent le *couple* sur l'axe vertical, la puissance étant alors représentée par un ensemble d'hyperboles.

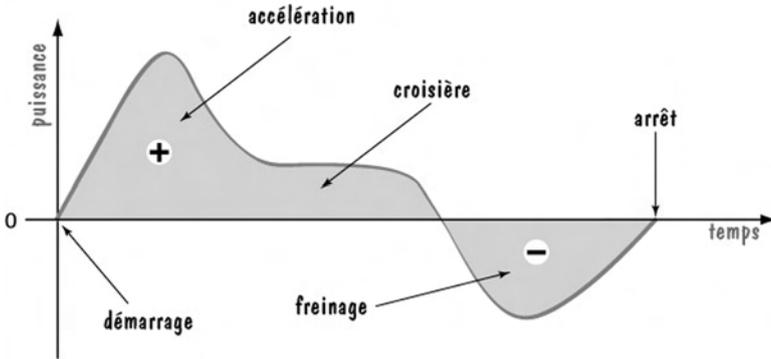
11. Données de l'Institut français du pétrole.

spécifique s'élève à 475 g/kWh soit un rendement catastrophique d'à peine 0,18. Et si ce cas peut sembler caricatural (à part quelques jeunes fous en mal d'affirmation bruyante ou quelques retraités un peu durs de la feuille, personne ne fait rugir son moteur pour rien), d'autres situations bien plus sournoises conduiront au même résultat : par exemple, ne demander que 5 kW au paisible régime de 2200 tours par minute, situation particulièrement courante en conduite à vitesse réduite, comme en agglomération ou faux plat descendant. Bref, s'il est dimensionné de façon à s'acquitter honorablement de sa tâche dans les circonstances plutôt rares où le conducteur lui demande de travailler raisonnablement, le moteur thermique se montre redoutablement inefficace lorsqu'il est mollement sollicité, c'est-à-dire la plupart du temps... mais comment faire autrement ?

L'ART DU TERRASSEMENT OU L'INTÉGRALE SANS PEINE

Quand on représente sous forme d'une courbe l'évolution au cours du temps de la puissance demandée par le conducteur, on obtient, même pour un automobiliste paisible, un relief particulièrement accidenté digne d'une crête alpine. Que ce soit en ville (succession d'accélération-freinages) ou sur route (dépassements, ralentissements, côtes et descentes), la puissance fournie réellement joue continuellement au yo-yo, comme la figure 13 le montre sur un cas ultrasimplifié correspondant à une accélération depuis l'arrêt, un maintien de vitesse de croisière puis un ralentissement jusqu'à l'arrêt. Au départ, si le conducteur impose une accélération constante la puissance croît progressivement, puis lorsque la vitesse de croisière est atteinte, elle redescend à un niveau beaucoup plus faible, surtout à vitesse modérée. Quand le véhicule ralentit pour s'arrêter, non seulement la puissance demandée baisse encore mais elle devient *négative* si le conducteur entame un freinage.

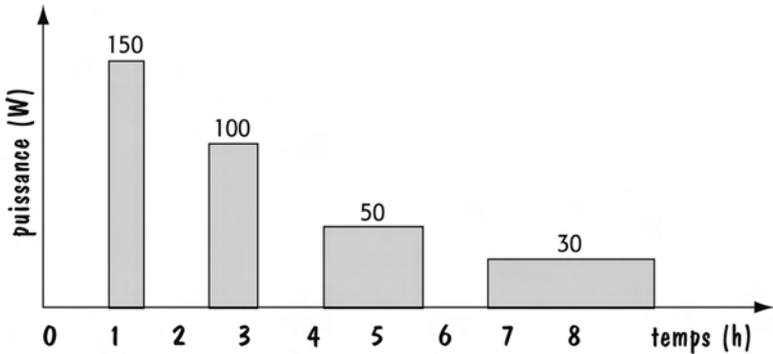
Ce freinage peut être réalisé par le moteur dans une certaine mesure (on apprend à l'auto-école qu'il est conseillé d'utiliser la *frein moteur* dans les longues descentes), et si cela ne suffit pas, par les dispositifs à



13 | Représentation schématique des variations de puissance.

friction convertissant l'énergie cinétique en chaleur que sont les *freins* traditionnels.

Si vous voulez faire peur à une personne traumatisée par les maths dans son enfance, parlez-lui de dérivée et d'intégrale. Pourtant ces deux notions vont se révéler particulièrement utiles ici, et la plupart des gens les manipulent sans même le savoir ; essayons d'en apporter la preuve. Nous avons sous les yeux une courbe accidentée représentant l'évolution de la puissance demandée au cours du temps ; or nous savons que l'énergie s'obtient à partir de la puissance en multipliant celle-ci par un intervalle de temps. Par exemple, une lampe à incandescence d'une puissance de 100 W qui reste allumée pendant une heure consomme une énergie de $100 \text{ W} \times 1 \text{ h}$, qu'on note 100 Wh (et lit cent watt-heures). C'est le cas le plus simple : la puissance étant constante, il suffit de la multiplier par le temps et le tour est joué. Même si c'est totalement inutile ici, on peut donner une représentation graphique de ce calcul : en portant sur un axe horizontal le temps, et sur un axe vertical la puissance, on obtient un rectangle dont la superficie représente l'énergie consommée par la lampe. L'air de rien cette représentation est quand même bien pratique : elle permet par exemple de visualiser qu'une ampoule de 50 W allumée pendant 2 heures consommera aussi 100 Wh, les deux rectangles ayant la même superficie.



14 | Différentes façons de dépenser la même énergie :
tous les rectangles ont la même superficie, qui représente une énergie (ici 75 Wh).

Que se passe-t-il maintenant lorsque la puissance varie ? La réponse des mathématiciens est qu'en regardant à la loupe la courbe de puissance, on finit toujours par trouver que ça ne varie pas, ou si peu ! Ainsi, même pour un moteur de voiture en fonctionnement réel, dont la puissance fluctue sans cesse, on peut dire qu'à très peu de chose près, la puissance reste constante au cours, par exemple, d'une milliseconde. On peut alors calculer le travail fourni dans ce même intervalle par la même méthode que pour la lampe :

$$\text{travail} = \text{puissance} \times \text{durée.}$$

Mais le travail réalisé se cumule dans le temps, et si on répète l'opération un très grand nombre de fois sur de courts intervalles de temps successifs, il devient possible de déterminer le travail total fourni par le moteur au cours, par exemple, d'un trajet d'une heure : sa valeur est représentée graphiquement par la somme des superficies de tous les petits rectangles ainsi réalisés. Le travail fourni par le moteur est donc, en définitive, proportionnel à l'aire située entre la courbe et l'axe du temps, que les mathématiciens appellent *l'intégrale de la puissance par rapport au temps*. On peut également dire la même chose de façon symétrique : la puissance du moteur est la *dérivée du travail fourni par rapport au temps*.

Il suffit donc de mesurer des surfaces sur ces diagrammes représentant les variations de puissance au cours du temps pour « lire » les énergies dépensées. Nous voyons ainsi graphiquement le rapport entre puissance et énergie : on peut très bien dépenser la même énergie avec une grande puissance pendant un temps très court ou une faible puissance pendant un temps très long¹². Mais il y a plus intéressant : puisqu'il y a aussi des demandes de *puissance négative* au cours du trajet (freinages), il y a une « consommation négative » de travail : en freinant, le conducteur se débarrasse d'un trop-plein d'énergie, habituellement transformé en chaleur par friction. Autrement dit, après que le moteur thermique a laborieusement (et avec un rendement peu glorieux) transformé de la chaleur en travail, les freins font exactement (et bien plus rapidement) l'inverse. Pas très malin. D'un point de vue de banquier, il serait logique de *compter négativement les surfaces situées en dessous de l'axe du temps* (partie repérée par le signe moins sur la figure précédente), lorsque la puissance est négative, puisqu'il s'agit d'énergie dont nous n'avons pas besoin. L'avantage, c'est qu'ainsi l'énergie totale nécessaire au trajet serait inférieure, puisqu'on retranche à l'énergie réellement nécessaire (surface repérée par le signe plus) celle qui est « en trop »...

Oui, mais cette belle idée reste une élucubration d'intellectuel tant qu'on ne dit pas *comment* on peut éviter de dépenser cette énergie « en trop » : avant que la voiture ne ralentisse, le moteur a *déjà* fourni le travail pour amener l'automobile à la vitesse qu'elle a, et c'est donc trop tard... à moins de permettre au moteur de « ravalier » l'énergie excédentaire ! Cela semble assez illusoire pour un moteur thermique¹³ (on n'a jamais vu un tel moteur refouler du carburant dans le

12. La foudre, par exemple, produit des dégâts par sa puissance énorme (de l'ordre du térawatt, soit la puissance de mille centrales nucléaires), mais la durée d'un éclair est très courte : de ce fait, l'énergie dégagée est relativement faible, de l'ordre de quelques centaines de kWh. Contrairement à ce qu'on pourrait croire, chercher à récupérer l'énergie de la foudre ne servirait à peu près à rien !

13. En réalité, pas tout à fait : au prix de quelques adaptations, un moteur à pistons peut servir de compresseur lorsqu'il est entraîné... il ne fabriquera jamais de carburant bien sûr, mais il peut remplir un réservoir de gaz sous pression qui constitue alors une réserve d'énergie.

réservoir lorsqu'il freine la voiture dans les descentes), mais c'est en revanche tout à fait possible avec d'autres, dont les moteurs électriques, qui sont par nature *réversibles*. Ils le sont même tellement qu'un ingénieur n'emploiera généralement pas le terme de *moteur* électrique, mais celui de *machine* électrique, qui peut suivant les besoins faire office de *moteur* (en transformant en travail de l'énergie électrique) ou de *frein* (et générateur, en transformant en énergie électrique du travail) suivant la façon dont il est « commandé » électriquement. Mais dans ce dernier cas, et contrairement aux freins classiques, l'énergie n'est pas « perdue » sous forme de chaleur, elle est stockée sous une forme « ordonnée » (d'énergie potentielle électrique) et peut aisément être reconvertie plus tard en travail. On a réussi à échapper (au moins partiellement) aux mauvais tours que nous joue l'entropie ; c'est un point essentiel pour le fonctionnement des voitures électriques et hybrides.

Le moteur électrique est donc nettement supérieur au moteur thermique *aussi* dans sa capacité à récupérer les surplus d'énergie, et pas seulement dans son rendement très supérieur ; cela n'a rien de nouveau, et s'il n'y avait le problème du stockage de l'énergie électrique cela ferait longtemps que tous les véhicules seraient électriques. Mais en observant les variations de puissance rencontrées pendant l'utilisation courante d'une voiture¹⁴, on peut se rendre compte d'une chose : s'il est très difficile de stocker l'énergie *totale* nécessaire pour parcourir quelques centaines de kilomètres, il est par contre envisageable de stocker les *petites quantités* d'énergie « en trop » correspondant aux passages à puissance négative, pour les réutiliser ensuite dès que possible : en associant un moteur thermique utilisant un combustible classique, un moteur électrique et un dispositif de stockage d'électricité de taille réduite, cela devrait marcher ! C'est sur cette idée que repose la *motorisation hybride*, nom qui ne veut pas dire grand-chose mais traduit l'association de moteurs de types différents.

14. Sur une longue période, on aboutit à une courbe beaucoup plus accidentée que celle, minimale, de la figure : des forêts de pics positifs et négatifs, et des plateaux plus ou moins longs suivant le trajet effectué.

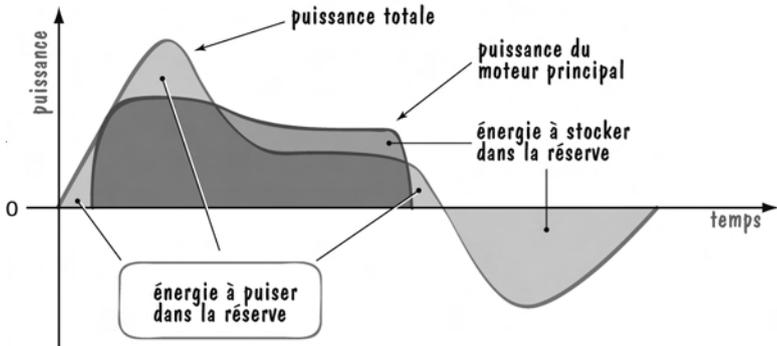
De plus, en réutilisant momentanément un surplus d'énergie disponible, il devient possible de choisir un moteur thermique de plus faible puissance (ou d'éviter de le faire travailler à ses limites, où son rendement est mauvais) sans que le conducteur le ressente, puisqu'il peut bénéficier de l'aide du moteur électrique, au moins tant que la batterie (ou tout dispositif de stockage approprié) n'est pas épuisée. De cette façon, le moteur thermique peut travailler plus près de son rendement maximum en régime de croisière, quand la puissance nécessaire est modérée. Mieux : la puissance nécessaire étant très souvent *vraiment* faible, on peut demander au moteur thermique de travailler un peu plus que nécessaire dans ce cas afin d'augmenter encore son rendement, et le travail supplémentaire peut servir à recharger la réserve électrique si elle est basse. Bref, la logique de la chose est celle qu'utilise un conducteur d'engin de chantier devant tracer une autoroute dans une région vallonnée : pour éviter les pentes trop raides, il creuse la colline pour y faire passer la route, et la terre ainsi récupérée sert aussitôt à combler le vallon suivant pour y faire un remblai, sachant qu'il n'est pas question de transporter des millions de mètres cubes de terre sur des dizaines de kilomètres.

Ainsi l'association de deux motorisations, *dont l'une réversible*, permet de jouer sur deux tableaux :

- récupérer (au moins en partie) l'énergie qu'on dissipe habituellement en chaleur dans les freinages ;
- se contenter d'une motorisation principale moins puissante, travaillant ainsi dans de meilleures conditions de rendement s'il s'agit d'un moteur thermique.

À partir du schéma précédent, on peut maintenant représenter ce que fait réellement le moteur principal dans un tel système, qui voit son fonctionnement devenir beaucoup plus régulier.

Celui-ci (thermique, par exemple) n'a plus à répondre à la totalité de la demande de puissance ; il peut même ne pas être démarré pour lancer la voiture, tant que la puissance du moteur auxiliaire réversible



15 | Le moteur principal ne suit pas instantanément la demande de puissance.

(par exemple électrique) et celle de la batterie sont suffisantes. Les différences entre les courbes « puissance totale » et « puissance du moteur principal » traduisent des flux d'énergie à partir de la réserve temporaire ou vers elle, suivant la règle très simple :

- $P_{\text{totale}} > P_{\text{mot. principal}}$: on puise dans la réserve d'énergie ;
- $P_{\text{totale}} < P_{\text{mot. principal}}$: on stocke dans la réserve d'énergie.

Tout ceci est bien intéressant sur le papier, mais il s'agit encore de grands principes ! Et en pratique, cette réserve d'énergie temporaire, quelles doivent être ses caractéristiques ? Pourquoi n'a-t-on pas depuis longtemps généralisé un tel système ? Parce que le pétrole était donné, certes... mais pas uniquement.

PAS TROP, MAIS VITE

Considérons (même si ce n'est pas le seul cas possible, on en reparlera) que notre moteur principal est un moteur thermique et le moteur secondaire un moteur électrique, associé à une batterie. On l'a bien compris : il ne s'agit en aucun cas de stocker dans celle-ci l'énergie nécessaire au trajet complet comme dans une voiture électrique, mais seulement une quantité suffisante pour aider le moteur thermique en cas de besoin, et inversement pouvoir récupérer de l'énergie « gratuite » des freinages ou stocker celle produite en surplus

par le moteur thermique tournant à son régime optimal. C'est déjà une bonne chose : vu ce que l'on sait des accumulateurs électriques, nous voilà soulagés d'un gros poids ! Malgré tout, il faut quand même estimer la « taille » de cette réserve d'énergie : cela dépend évidemment de l'usage du véhicule, mais sachant que les fortes demandes de puissance ne se produisent, dans les pays où la vitesse est réglementée, que lors des accélérations (forcément limitées en durée) et en côte, on peut en donner un ordre de grandeur en fixant la différence entre la puissance totale maximale et la puissance maximale du moteur thermique seul. Prenons par exemple 20 kW (soit environ 1/4 de la puissance d'une voiture moyenne actuelle ; ce chiffre peut naturellement être très différent suivant le véhicule, sa masse, son usage, sa conception) : si cette puissance d'appoint est puisée dans la réserve pendant 3 minutes, soit un vingtième d'heure, l'énergie ainsi soutirée vaut :

$$20 \text{ kW} \times (1/20) \text{ h} = 1 \text{ kWh}.$$

Ces 3 minutes peuvent sembler courtes, mais c'est long à l'échelle d'une accélération : les automobiles actuelles mettent couramment une dizaine de secondes seulement pour aller de 0 à 100 km/h en écrasant le champignon. Et s'il est tout à fait possible de grimper pendant plus de 3 minutes sur des routes de montagne, il ne faut pas oublier que celles-ci ont souvent des virages, parfois vicieux même, qui contraignent généralement le conducteur à ne pas exploiter en permanence la puissance maximum de son véhicule ! Le critère limitant dans la conception d'une voiture hybride¹⁵ n'est donc pas tellement la quantité d'énergie à stocker mais *la rapidité de son transfert*, autrement dit la *puissance* du dispositif de stockage... et bien sûr son aptitude à fonctionner longtemps sans faille.

Supposons que ces chiffres correspondent au bon ordre de grandeur ; où peut-on trouver une batterie capable d'une puissance de 20 kW et stockant au moins 1 kWh d'énergie ? Les batteries traditionnelles au plomb conviennent-elles ? Pour connaître la puissance d'une

15. Au moins lorsqu'elle n'offre aucune possibilité de recharge extérieure.

batterie, il suffit de connaître sa tension en volts et le courant maximal qu'elle peut débiter en ampères, et de multiplier les deux : le produit donne la puissance en watts. Par exemple, une batterie ordinaire pour automobile de 12 V capable de fournir un courant de démarrage de 640 A, délivre alors une puissance¹⁶ de $12 \times 640 = 7680 \text{ W}$. En résumé, parce que les formules c'est bien pratique :

$$\text{tension (V)} \times \text{intensité (A)} = \text{puissance (W)}.$$

Par ailleurs, le fabricant indique la capacité de la batterie en ampère-heure (Ah), par exemple 70 Ah. Cela signifie qu'on peut en obtenir¹⁷ un courant de 7 A pendant 10 h, ou 70 A pendant 1 h. Or si multiplier des volts par des ampères donne des watts, multiplier des volts par des ampère-heures donne des watt-heures, autrement dit une énergie. Il suffit donc de multiplier la tension d'une batterie par sa capacité pour connaître l'énergie qu'elle peut emmagasiner :

$$\text{tension (V)} \times \text{capacité (Ah)} = \text{énergie (Wh)}.$$

La capacité de 70 Ah est une valeur courante pour les batteries auto, elle correspond ainsi à une énergie stockée de $12 \times 70 = 840 \text{ Wh}$.

C'est presque un kilowatt-heure ! Suffirait-il de prendre une batterie un peu plus importante pour avoir le dispositif de stockage recherché pour notre motorisation hybride ? On trouve couramment pour de grosses voitures des batteries au plomb de 100 Ah, ce qui fait 1,2 kWh d'énergie stockée. Capables de débiter jusqu'à 850 A, on obtient avec elles une puissance d'environ 10 kW ; en utiliser deux permettrait donc d'avoir nos 20 kW... et du coup, on aurait plus de 2 kWh d'énergie. Mais en réalité, les choses sont un peu plus complexes : d'une part la puissance maximale et la capacité indiquées ne sont pas valables *simultanément*, autrement dit décharger la batterie très vite (pour avoir beaucoup de puissance) revient à diminuer sa capacité ; mais aussi et surtout ces batteries supportent mal les « mauvais traitements », c'est-à-dire les décharges rapides et profondes, leur durée de vie est

16. Dans la réalité, la tension d'une batterie dépend un peu du courant qu'elle débite (et de son niveau de charge) ; contentons-nous de calculs approximatifs.

17. Là aussi, la capacité dépend de la vitesse à laquelle la batterie est déchargée ; les capacités indiquées le sont en général pour des décharges lentes de plusieurs heures.

assez limitée et enfin leur rendement n'est pas des meilleurs, il faut dépenser nettement plus d'énergie pour les charger (surtout très vite) qu'on n'en récupère en sortie. C'est un défaut de toutes les batteries, mais plus ou moins prononcé suivant leur type : quand on les charge ou qu'on les décharge, ça chauffe ! On dégrade donc une partie de cette énergie ordonnée qu'est l'électricité en chaleur, et cette part n'est évidemment plus utilisable pour, par exemple, alimenter un moteur électrique. C'est « moins pire » qu'avec un moteur thermique, le rendement étant tout de même ici nettement plus proche de 1 que de 0, mais on n'y coupe pas : à chaque fois qu'on manipule de l'énergie, l'entropie est là pour nous embêter.

Bref, s'il est techniquement possible d'utiliser la technologie largement éprouvée des batteries au plomb pour constituer la réserve d'énergie temporaire d'une motorisation hybride, le résultat obtenu ne serait pas très performant ni très fiable. Ce n'est qu'avec l'évolution récente de la technologie des batteries, et en particulier l'apparition dans les années 90 des accumulateurs de type NiMH (pour *nickel/hydrures métalliques*, souvent mal traduit de l'anglais en nickel/métal hydrure), que les ingénieurs ont pu disposer de batteries présentant des performances suffisantes pour une utilisation automobile ; celle-ci demande en particulier une grande robustesse face à des conditions d'utilisation extrêmement variées et une longévité suffisante. De plus, la technologie NiMH n'utilise pas de métaux lourds très polluants, au contraire des batteries nickel-cadmium par exemple (NiCd), pourtant très bien placées pour leurs performances de puissance et de *cyclabilité*¹⁸, mais aujourd'hui condamnées pour des raisons environnementales.

Cependant le stockage d'énergie n'est qu'une partie du problème... les autres étant la transformation de cette énergie en travail au moyen de moteurs électriques, qui impose le passage par une électronique

18. La longévité des batteries est généralement exprimée en *nombre de cycles*, correspondant à autant d'opérations de charge et décharge complète. On verra que cette notion est à considérer avec beaucoup de précautions dans le cas de véhicules hybrides, où les charges et décharges ne sont jamais totales. Attention, ne pas confondre la cyclabilité et la recyclabilité !

de puissance¹⁹ souvent coûteuse, et surtout l'orchestration générale des différents interprètes : moteur thermique, machine électrique, convertisseurs électroniques et batterie. Sans une gestion fine de l'ensemble des composantes, le fonctionnement de l'ensemble risque fort de virer à la cacophonie et d'imposer aux différents organes des contraintes qui nuiront à leur longévité. Et c'est là que les choses se compliquent : il n'y a pas *une* façon de concevoir une automobile hybride (même en ne retenant que la combinaison moteur thermique – machine électrique), mais de nombreuses, dont certaines restent sans doute à inventer ou à redécouvrir dans de vieux brevets oubliés... Pour commencer, comme le ferait un entomologiste explorant une contrée inconnue peuplée d'insectes bizarres, essayons de donner une classification sommaire de la famille des hybrides.

19. On appelle *électronique de puissance* l'ensemble des composants (transistors, diodes, condensateurs...) capables de supporter de forts courants et de fortes tensions, donc de fortes puissances, par opposition à l'électronique tout court de nos postes de radio et chaînes Hi-Fi ou à la micro-électronique de nos ordinateurs, beaucoup plus frugales en watts.

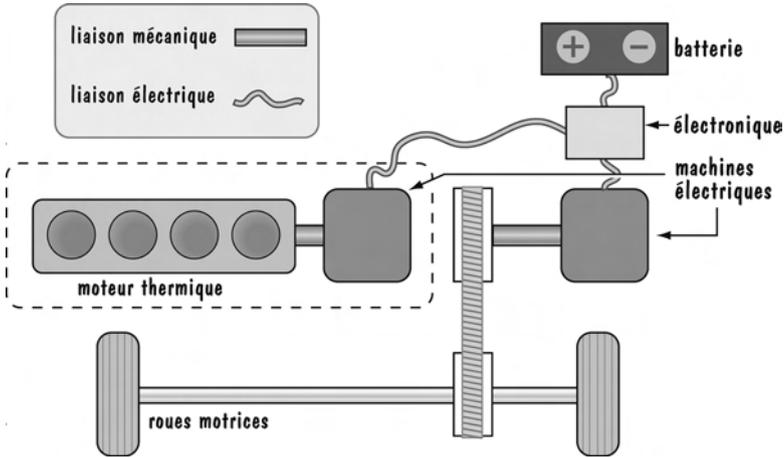
10

Taxinomie temporaire et approximative

HYBRIDE SÉRIE

Débutons par le cas le plus simple. Prenez une voiture électrique « pure », comportant donc une réserve d'énergie électrique, un moteur électrique et de l'électronique de puissance entre les deux. Amputez éventuellement la batterie d'une bonne part, puisque vous n'avez plus besoin de stocker beaucoup d'énergie. Rajoutez un groupe électrogène, c'est-à-dire un moteur thermique connecté à une machine électrique fonctionnant en générateur, produisant l'électricité qui rechargera la batterie. N'oubliez quand même pas le réservoir de carburant pour le moteur thermique, et vous avez terminé la construction schématique de ce qu'il est convenu d'appeler une *motorisation hybride série*.

Par rapport à une motorisation thermique seule, les avantages sont multiples : bien sûr la réversibilité des machines électriques permet la récupération d'énergie dans les ralentissements, mais il est également possible de se passer de transmission au sens où on l'entend habituellement (boîte de vitesses et embrayage), car le moteur électrique peut fonctionner depuis l'arrêt jusqu'à sa vitesse de rotation maximale,



16 | Motorisation hybride de type série.

contrairement au moteur thermique qui ne peut pas descendre en dessous de son régime de ralenti sans caler et n'est pas suffisamment puissant à bas régime. La puissance *moyenne* nécessaire pour la conduite étant faible, il n'est pas non plus nécessaire d'avoir un moteur thermique puissant ; il peut donc être plus léger, moins coûteux et travailler de façon régulière dans sa zone de fonctionnement optimale. La machine électrique reliée aux roues, par contre, est seule à répondre à la demande de puissance et doit donc être dimensionnée en conséquence. Mais surtout cette disposition rajoute des étapes de conversion énergétique par rapport au cas où le moteur thermique est relié mécaniquement aux roues, ce qui ne peut que faire baisser le rendement : rappelez-vous notre mauvaise copine l'entropie, qui s'amuse à dégrader tout notre travail !

De tels véhicules ont été fabriqués et commercialisés, notamment par Renault sous la forme du *Kangoo Elect'Road*¹, mais il s'agit vraiment dans ce cas d'une voiture électrique rechargeable sur laquelle on a greffé un petit groupe électrogène afin d'éviter la panne électrique en rase

1. Subtil jeu de mots franco-anglais...

campagne, et non d'une voiture conçue comme hybride dès le départ. Ses quelques rares utilisateurs (le modèle n'est plus commercialisé) ont d'ailleurs pu se rendre compte de l'utilité du moteur thermique comme solution de dépannage... et uniquement comme solution de dépannage, son utilisation en continu se soldant par une consommation comparable à celle d'une voiture à essence, les performances en moins. Cette solution est néanmoins retenue depuis longtemps (à la batterie près, inutile) dans la traction ferroviaire sur les lignes non électrifiées : la réalisation d'une transmission mécanique capable de faire démarrer un train aussi bien que de le maintenir à haute vitesse étant extrêmement difficile, les motrices Diesel sont en réalité dotées de moteurs électriques pour faire tourner les roues ; de même les navires modernes utilisent souvent des moteurs électriques pour faire tourner les hélices même si la source d'énergie reste un carburant liquide. Mais ces deux exemples ne visent pas l'économie d'énergie, simplement les avantages liés à la souplesse des moteurs électriques. En revanche, des locomotives hybrides à récupération d'énergie comportant d'énormes batteries de stockage existent bel et bien depuis quelque temps, et permettent un gain très important de carburant².

Enfin, un cas un peu particulier dont nous reparlerons est celui des véhicules utilisant une pile à combustible : hormis quelques funestes exceptions ayant prouvé leur capacité à dépenser sans compter leur dihydrogène³, tous les modèles (encore non commercialisés car ruineux) de voitures à pile à combustible sont des hybrides où le « groupe électrogène » de la figure précédente (le moteur thermique et la machine électrique qui lui est reliée) est remplacé par une pile à combustible. Il est donc faux de dire, comme on l'entend souvent, que l'architecture hybride est une étape transitoire avant l'avènement tant attendu des piles à combustible, car celles-ci n'ont strictement aucune chance d'être énergétiquement et économiquement viables

2. Par exemple ce modèle : http://www.railpower.com/products_hl_ggseries.html

3. Presque 50 litres de dihydrogène liquide aux cent kilomètres pour l'*HydroGen3* de General Motors, lors d'une traversée de l'Europe en 2004 (voir la dernière partie).

sans l'hybridation avec un stockage électrique réversible, de surcroît plus facilement réalisable dans leur cas que dans celui des moteurs thermiques.

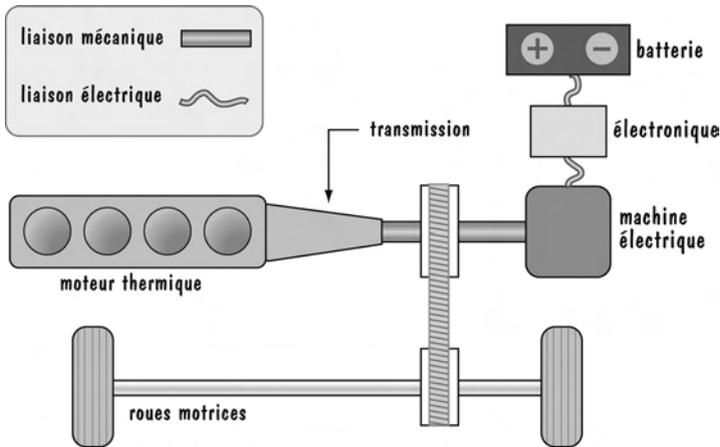
HYBRIDE PARALLÈLE

Continuons avec une architecture explorée depuis longtemps par de nombreux constructeurs automobiles, que ce soit sous forme de véhicules de recherche ou sous forme de modèles commercialisés⁴ : la *motorisation hybride parallèle*. Le terme est trompeur car on peut imaginer un moteur électrique et un moteur thermique côte à côte, alors qu'ils sont généralement sur le même axe ! Le « parallélisme » signifie ici que les deux moteurs contribuent parallèlement au travail faisant avancer le véhicule (comme deux chevaux d'un attelage, en somme), par opposition au cas précédent où le moteur thermique ne pouvait en aucun cas entraîner directement les roues. Précisons d'emblée qu'il existe plusieurs solutions différentes pour parvenir à ce résultat, le schéma ci-contre ne devant donc pas être pris au pied de la lettre !

Ici, c'est plutôt une motorisation thermique à laquelle on rajoute un complément électrique : si on enlève toute la partie droite (machine électrique, batterie et électronique), on se retrouve avec l'architecture traditionnelle des voitures à moteur thermique : connexion mécanique directe entre l'arbre moteur et les roues, via une transmission composée d'une boîte de vitesses, nécessaire pour maintenir le moteur à un régime convenable, et d'un embrayage⁵, nécessaire pour désaccoupler le moteur des roues, au passage des vitesses et à l'arrêt de la voiture lorsque le moteur tourne au ralenti.

4. Les Honda Insight, Civic IMA et Accord IMA sont des hybrides parallèles disponibles sur le marché (seulement la Civic en France) ; en France, Renault comme PSA ont produit de nombreux véhicules de recherche ou de salon hybrides parallèles, mais commercialisé aucun jusqu'à présent. Le 31 janvier 2006, PSA présentait deux démonstrateurs hybrides parallèles Diesel-électrique sur base de 307 et C4, en annonçant une commercialisation possible en 2010.

5. Les voitures à boîte automatique peuvent utiliser un convertisseur de couple hydraulique, qui permet aussi un certain découplage de l'arbre moteur et des roues.



17 | Motorisation hybride de type parallèle.

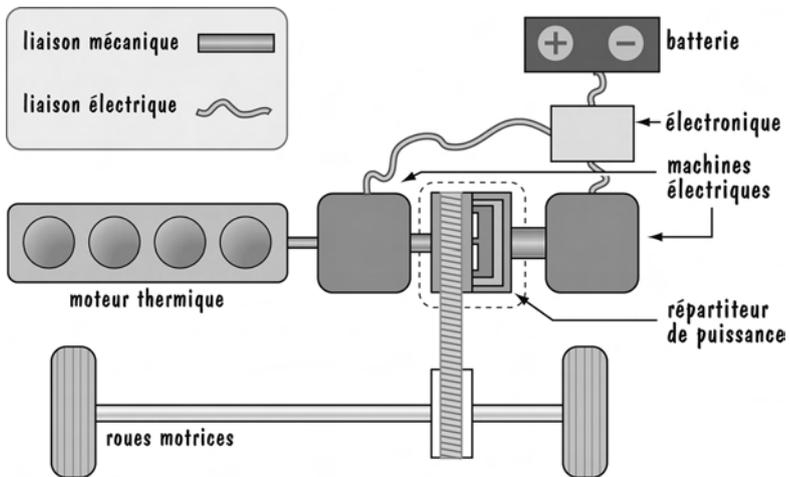
La machine électrique située à droite peut se comporter de différentes façons : soit aider le moteur thermique en pompant de l'énergie dans la batterie (c'est alors un *moteur électrique*), soit le freiner (et la voiture avec) en produisant de l'énergie électrique envoyée à la batterie (c'est alors un *générateur électrique*)... soit ne rien faire du tout. Il faut bien garder à l'esprit les caractéristiques particulières des machines électriques pour comprendre le fonctionnement de ces systèmes, et en particulier leur caractère réversible : la *même* machine peut jouer le rôle de moteur ou de générateur, mais pas en même temps évidemment. Et entre les deux situations, si la machine n'est ni moteur ni générateur, elle s'apparente à une simple roue libre, à double sens même ! Autrement dit, et contrairement à ce qu'on lit trop souvent dans des revues automobiles tentant d'expliquer le fonctionnement des voitures hybrides, la question à se poser pour une machine électrique n'est pas « est-ce qu'elle tourne ? », mais « comment est-elle commandée ? » : qu'elle soit à l'arrêt ou en rotation (qui peut se produire dans les deux sens, contrairement au moteur thermique), une machine électrique peut jouer le rôle de moteur (et être consommatrice d'énergie) ou de frein (et être productrice d'énergie).

La figure 17 ne rend pas nécessairement compte de l'implantation réelle des différents organes : ainsi, sur les voitures hybrides Honda actuellement commercialisées, la machine électrique se situe entre le moteur thermique et la transmission, et tourne donc toujours au même régime que le moteur thermique puisqu'elle lui est reliée mécaniquement de façon permanente. Inversement, dans les 307 et C4 hybrides présentées à la presse début 2006 par PSA, la machine électrique se situe à l'intérieur de la transmission, entre l'embrayage et la boîte de vitesses. Cette différence a son importance : en rendant possible le découplage du moteur thermique et de la machine électrique, la deuxième solution présente quelques avantages. En particulier, il est possible de stopper complètement le moteur thermique lorsque la puissance demandée est peu importante (conduite urbaine par exemple) en faisant avancer la voiture avec le seul moteur électrique, qui par ailleurs bénéficie toujours des différentes démultiplications de la boîte de vitesses. Lors des ralentissements, la récupération d'énergie est aussi plus efficace car le freinage (s'il n'est pas trop puissant) peut être réalisé en totalité par la machine électrique, et donc l'énergie correspondante stockée pour une utilisation ultérieure. Dans le premier cas par contre, le moteur thermique toujours en rotation constitue nécessairement lui aussi un frein quand on relâche l'accélérateur, mais qui dissipe l'énergie cinétique en chaleur. Inversement, la solution retenue par Honda permet de lancer directement le moteur thermique au moyen de la machine électrique en se passant du démarreur traditionnel, ce que ne permet pas l'autre disposition.

HYBRIDE SÉRIE-PARALLÈLE OU À DÉRIVATION DE PUISSANCE

Si vous n'avez pas déjà mal à la tête, venons-en maintenant à l'hybridation au carré, hybride d'hybride série et d'hybride parallèle, appelée *motorisation hybride série-parallèle* par certains (Toyota notamment), ou à *dérivation de puissance* par d'autres. Cette solution originale occupe une place particulière, d'une part parce qu'elle a été retenue par

les concepteurs de la Prius⁶ que tout le monde connaît aujourd'hui, et d'autre part parce qu'elle fait appel à un type de transmission *électro-mécanique* tout simplement impossible à réaliser sur des véhicules non hybrides. Dans le type hybride série, la totalité de la puissance fournie par le moteur thermique transite par voie électrique, et les roues reçoivent mécaniquement la totalité de la puissance mécanique développée par une des machines électriques. Dans le type hybride parallèle, la totalité des puissances des moteurs thermique et électrique est transmise aux roues par voie mécanique. Dans le type hybride à dérivation de puissance, ça se complique... la puissance du moteur thermique prenant des chemins à la fois électrique et mécanique, dans des proportions variables suivant les circonstances. Tentons un schéma explicatif.



18 | Motorisation hybride à dérivation de puissance.

6. La Toyota Prius est la première voiture hybride de série à avoir été commercialisée, fin 1997 au Japon (type NHW10). Une deuxième version techniquement améliorée mais à la carrosserie identique (NHW11) est apparue en 2000, également pour l'exportation ; l'actuelle et troisième version (NHW20), sensiblement modifiée mais reprenant la même architecture, commercialisée en France depuis 2004, a remporté le prix européen de Voiture de l'année en 2005.

La clef de cette architecture est un répartiteur de puissance (appelé *Power Split Device* en anglais dans les documents Toyota) qui permet à chacun des acteurs du dispositif (moteur thermique, machines électriques 1 et 2) de tourner à des vitesses différentes suivant les besoins et dans une relative indépendance, par un simple jeu d'engrenages appelé *train épicycloïdal* (vocabulaire très utile pour briller dans les dîners en ville). Il nécessite que deux arbres moteur soient concentriques, celui du moteur thermique traversant une des machines électriques. Remarquable de compacité, cet engrenage permet une simplification de taille pour la transmission ; nous en décrirons plus loin le fonctionnement.

Pour l'immédiat, essayons de comprendre par quel cheminement tortueux est née la première automobile hybride moderne de grande série, au Japon à la fin du XX^e siècle.

11

Un pari industriel risqué

Les voitures hybrides ne sont pas une nouveauté : même en oubliant les premiers essais d'il y a un siècle, on voit depuis nombre d'années des constructeurs automobiles présenter à la presse des prototypes¹ plus ou moins exotiques associant moteurs thermiques et électriques, particulièrement depuis les deux chocs pétroliers de 1973 et 1979, qui ont dû convaincre leurs équipes dirigeantes de la nécessité d'améliorer le rendement énergétique des modèles proposés. Pourtant, encore moins que les voitures électriques qui avaient tenté un *come-back* dans les années 90, les automobiles hybrides ne semblaient être jusqu'à récemment mûres pour la commercialisation.

Dans le même temps, en septembre 1993 un programme ambitieux démarrait en silence chez Toyota, constructeur japonais connu pour son envergure imposante et ses produits d'une fiabilité exemplaire, mais pas pour son goût de la rupture technologique ni l'audace de son style : quand une Toyota passe dans la rue, elle ne fait généralement pas tourner les têtes des amateurs de belles carrosseries, pas plus

1. Comme la Citroën Xsara Dynactive ou la Renault Scénic Hybride.

qu'elle ne suscite de commentaires passionnés de la part des amateurs de technique automobile. Les Toyota sont avant tout des bêtes de somme increvables, à l'image de ces tout-terrain rustiques arborant la marque en grosses lettres et sillonnant les pistes les plus cassantes de la planète. Et de fait, le but avoué du projet lancé chez ce constructeur, s'il était ambitieux, n'avait rien de très excitant *a priori* : il s'agissait tout simplement de définir et de construire la voiture globale du XXI^e siècle, celle dont chaque Terrien moyen – ou au moins celui des pays développés – devrait avoir envie, étant donné les contraintes prévisibles liées à son mode de vie. D'où le nom de code G21, G pour *global* et 21 pour le siècle. Quelle mouche avait donc piqué Eiji Toyoda, le *chairman*² d'alors et descendant du fondateur de la marque, pour qu'il impulse un projet à la fois si mégalomane et si platement rationnel ? À la fin des années 80, où la croissance atteignait encore en moyenne 4 % par an, le Japon vivait toujours sur sa lancée d'après-guerre, perpétuant un miracle économique qui s'essouffait à peine. En 1990, tout commence à cafouiller : l'effondrement d'une des plus caractéristiques bulles spéculatives qu'ont connues les pays industrialisés entraîne les Japonais dans une décennie de renoncements et d'austérité. Il est temps de se poser des questions sur la façon de survivre à long terme, qui ne consiste sans doute pas, pour un constructeur automobile, à proposer des produits toujours plus gros, toujours plus puissants, toujours plus luxueux.

LE PROJET G21 OU L'HYBRIDATION PAR ÉLIMINATION

Le cahier des charges d'une nouvelle automobile aura rarement été aussi peu précis : à part réaliser « la voiture globale du XXI^e siècle », rien n'est demandé aux ingénieurs chargés de mener à bien le projet G21. Un peu comme chez Citroën au temps glorieux de l'invention de la DS, il s'agit de partir d'une feuille blanche, et de déterminer

2. La direction de Toyota comporte deux personnes, appelées en anglais *chairman* et *president* (le premier étant généralement un ancien *president*), termes traduits tous deux en français par président...

les solutions les plus rationnelles techniquement pour parvenir au but. Mais quel but ? Les jeunes générations ayant tendance à toiser leurs aînées de quelques centimètres, l'habitacle de l'automobile du futur doit être spacieux ; mais sans que les dimensions extérieures ne gênent la circulation en milieu urbain, puisque la population tend à se regrouper de plus en plus dans les villes. Et si le nombre de Terriens désirant goûter à l'automobile continue à croître, il est impératif que la motorisation employée consomme aussi peu de carburant que possible : un objectif de 20 km par litre³ en circulation urbaine, soit 5 litres aux cent kilomètres⁴, est fixé. Rien de plus n'est connu au départ : ni l'implantation du moteur, ni son type, ni la transmission de la puissance aux roues avant ou arrière, ou aux quatre. « Yaka » faire au mieux avec ce qu'on peut.

Les premières réunions comprenant un nombre restreint d'ingénieurs, et restant confidentielles à l'intérieur même de l'entreprise, tentent de définir les grandes lignes de cette automobile pour le prochain siècle. Fin 1993, le premier rapport résume les objectifs essentiels à atteindre : un habitacle spacieux obtenu par utilisation d'un empattement⁵ assez long, une position d'assise semi-haute afin de faciliter l'accès à bord, une carrosserie aérodynamique afin de favoriser l'économie de carburant, d'environ 20 km par litre, et un moteur transversal en position avant associé à une transmission automatique à haut rendement énergétique. En novembre 1993, Takeshi Uchiyama, un ingénieur de 47 ans qui avait commencé sa carrière dans l'entreprise sur le développement de logiciels (à son corps défendant, car il voulait « construire des voitures ») est nommé responsable du projet G21 par Akihiro Wada, vice-président exécutif de Toyota.

3. C'est ainsi que les Japonais mesurent la consommation de leurs voitures, un peu comme les Anglais ou les habitants des États-Unis, qui comptent en *miles per gallon*. Mais le *gallon* change de volume en traversant l'Atlantique !

4. Les normes japonaises de mesure de consommation, très différentes des européennes, reflètent l'état très congestionné du trafic sur l'île. La même Prius commercialisée en Europe en 2006 consomme 3,0 litres aux cent kilomètres selon la norme « 10-15 » japonaise, contre 4,3 selon le cycle mixte européen.

5. Distance séparant l'essieu avant et l'essieu arrière.

Tous les ingénieurs connaissent bien sûr le principe de la motorisation hybride, que chaque constructeur a au moins testée sur quelques prototypes de salon ou véhicules de recherche. Ils savent également le gain qu'on peut en tirer en rendement énergétique, découlant directement de principes élémentaires de physique qu'ils maîtrisent depuis leurs plus jeunes années. Néanmoins tous ou presque pensent que la technologie n'est pas mûre, et ils n'envisagent donc pas dans un premier temps de l'utiliser pour leur voiture du siècle prochain mais se concentrent sur les moyens de grappiller quelques pour cent de rendement en additionnant des techniques déjà connues : injection directe d'essence, assistance de direction électrique, transmission à variation continue⁶ utilisant des poulies à diamètre variable afin de maintenir le moteur dans sa plage de fonctionnement la plus efficace... En août 1994, Uchiyamada exprime encore son opposition à la solution hybride pour plusieurs raisons : son coût trop élevé, l'inadaptation de l'outil productif de Toyota à l'industrialisation en grande série d'un tel dispositif, et enfin les performances des batteries, notoirement insuffisantes et sans espoir d'amélioration à court terme.

Parallèlement, certains membres du groupe G21 doivent plancher sur un *concept car* prévu pour le Salon automobile de Tokyo d'octobre 1995, et dont la définition est la même : une voiture compacte préfigurant l'automobile moyenne du XXI^e siècle. Quand Uchiyamada fait part, en novembre 1994, de l'avancement du projet G21 à son patron Wada, celui-ci lui annonce que la direction tient maintenant à ce que le *concept car* soit équipé d'une motorisation hybride, afin que soit présenté pour cette occasion le savoir-faire technique le plus actuel du constructeur. Toutefois, s'agissant d'un modèle unique de salon, aucune production en série n'est envisagée ; mais même avec ce bémol, concevoir une telle motorisation pour un prototype d'exposition en moins d'un an n'a rien d'une partie de plaisir. L'équipe restreinte en

6. Si elle produit l'effet d'une transmission à variation continue « classique » (comme celle d'un scooter), la transmission de la Prius qui naîtra du G21 en est totalement différente dans son principe.

charge du véhicule décide alors rapidement de s'orienter vers une solution comprenant un moteur 4 cylindres de 1 500 cm³ à injection directe⁷ d'essence, permettant déjà une diminution sensible de la consommation, associé à un moteur électrique, dont Toyota maîtrise la fabrication pour ses voitures électriques⁸, et à une transmission à variation continue. Le nom de la voiture est choisi : ce sera *Prius*, de l'adverbe latin pouvant se traduire par « auparavant » ou « plus tôt » et signifiant ici que le prototype était né avant le XXI^e siècle.

Dans la foulée, Uchiyamada expose au cours d'une réunion l'avancement de la Prius et du projet G21 à ses supérieurs, en suggérant pour ce dernier de fixer comme objectif une diminution de consommation d'un tiers par rapport à un véhicule équivalent existant. À sa grande surprise, Wada se montre insatisfait et lui fait remarquer qu'une automobile du XXI^e siècle doit viser une consommation⁹ divisée par 2 ! Choqué, l'ingénieur en chef proteste, refuse un objectif aussi irréaliste, conscient des limites des solutions techniques envisagées... et se voit répondre qu'il n'a qu'à trouver autre chose afin que ce soit possible. C'est à partir de ce jour que la Prius et le projet G21 vont se rejoindre, et que la motorisation hybride va être envisagée sérieusement pour une automobile produite en série : n'ayant pas d'autre solution, Uchiyamada obtient le renfort d'équipes d'ingénieurs de recherche travaillant déjà sur l'hybridation et se lance à fond dans cette voie. Tout en sachant que si de tels systèmes n'étaient pas à proprement parler nouveaux, personne à ce jour n'avait vraiment résolu les difficultés techniques liées à la batterie, à l'électronique et au logiciel de contrôle. Les contraintes pesant sur un prototype à peine montré à la presse et sur une automobile vendue et garantie à des conducteurs ordinaires n'étant pas de même nature...

7. L'injection directe d'essence avait été introduite peu de temps auparavant dans la grande série par Mitsubishi, suivi de près par Toyota.

8. Une version électrique du tout-terrain de loisirs *RAV4* était alors en voie de commercialisation aux États-Unis.

9. Les Japonais comptant en kilomètres par litre et non en litres aux cent kilomètres, la proposition originale de Uchiyamada était une amélioration de 50 %... et la réponse de Wada, 100 % sinon rien.

LES PROBLÈMES COMMencent

Une motorisation hybride offre par définition une grande variété d'architectures possibles, par l'application des règles de la combinatoire : l'équipe G21 en identifie et étudie des dizaines. Quelques-unes sont finalement gardées, dont celle de la future Prius de série évidemment, mais aussi celle de la Prius prototype qui sera exposée au Salon de Tokyo de 1995, très différente : de type parallèle, elle comprend un moteur à injection directe d'essence et une transmission à variation continue classique à poulies et courroie. Le temps étant plus que compté, il est impossible de tester en vrai les solutions retenues avant de choisir la meilleure : un recours intensif à la simulation sur ordinateur s'impose. Cela tombe bien, Uchiyamada en connaît un rayon et finit par penser que ses premières années chez Toyota n'ont pas été complètement inutiles. L'achat massif de stations de travail informatiques et de logiciels permet de tester virtuellement le comportement de quelques motorisations à partir des paramètres de contrôle que sont la demande d'accélération ou de freinage du conducteur, la masse de la voiture, la pente de la route et la quantité d'énergie stockée dans la batterie.

Tandis que la voiture destinée au Salon de Tokyo de 1995 est construite, les ingénieurs choisissent en définitive une autre voie pour celle qui sera la « vraie » Prius. L'économie de carburant n'est pas le seul critère : il faut également que la conduite soit la plus fluide possible et la mise en mouvement de l'automobile particulièrement aisée, puisqu'il s'agit d'une voiture amenée à rencontrer les conditions de circulation souvent heurtées des zones périurbaines. Les transmissions classiques comportant plusieurs rapports, manuelles ou automatiques, entraînent nécessairement de légers à-coups au moment du passage des vitesses même si leurs versions modernes les minimisent. Les transmissions à variation continue du type de celles qui équipent les scooters ou certaines voitures¹⁰ n'offrent pas ce désavantage ; mais la nature hybride de la motorisation complique les choses : il faut

10. Telles que les Audi équipées de la transmission « Multitronic » ou certaines Nissan.

pouvoir arrêter le moteur thermique en roulant¹¹, et le redémarrer, pour tirer profit au maximum des situations où le véhicule peut se contenter de la puissance électrique fournie par la batterie, et où le moteur thermique se montre très inefficace.

Avec une courroie reliant mécaniquement l'arbre moteur, appelé donc à s'arrêter net et repartir sans cesse, et de l'autre côté l'essieu moteur dont on voudrait que les roues n'adoptent pas ce même comportement caractériel, il n'y a pas d'autre solution que de rompre par moments cette liaison mécanique. Opération qui est habituellement confiée à un embrayage, qu'il soit à friction ou hydraulique¹² ; or la conception de cet organe, principalement s'il est amené à fonctionner très souvent, pose de nombreux problèmes. Pour la variante à friction qui met simplement en contact deux surfaces, chaque ouverture ou fermeture du mécanisme occasionne une usure mécanique : chacun sait que la conduite urbaine, nécessitant de nombreux changements de vitesse et donc autant d'ouvertures-fermetures d'embrayage, conduit sur les voitures à transmission manuelle à une usure plus rapide de celui-ci que la conduite routière. De plus, ces phases transitoires de friction, dégageant de la chaleur, sont préjudiciables au rendement : toujours cette mauvaise copine l'entropie qui attend le moment propice pour gâcher le travail du moteur. Pour la variante hydraulique ce n'est pas mieux, la transmission du mouvement par l'huile entraînant des pertes d'efficacité permanentes. Le problème semble donc particulièrement coriace... à moins de prendre un peu de recul et d'oublier tous ces mécanismes permettant aux voitures d'avancer depuis environ un siècle.

UNE TRANSMISSION FORCÉMENT NOUVELLE

Parmi les trois dernières solutions envisagées par l'équipe G21, l'une utilise un dispositif particulièrement ingénieux qui supprime

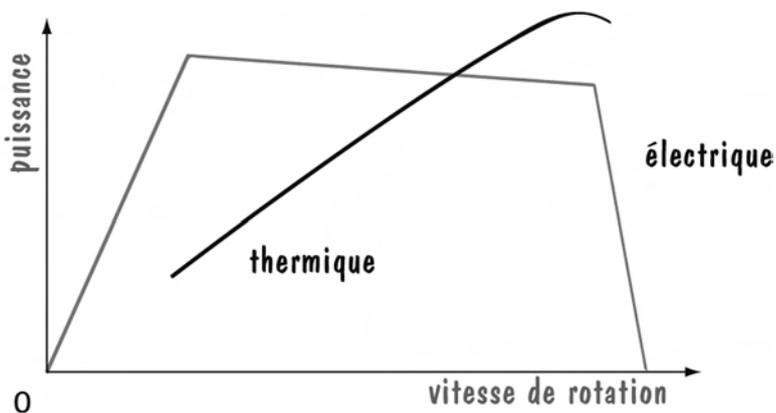
11. Certaines voitures hybrides, comme les Honda actuellement commercialisées, n'ont pas cette possibilité, ce qui en fait aux yeux de certains des « semi-hybrides ».

12. Dans beaucoup de transmissions automatiques on trouve également des « convertisseurs de couple » fonctionnant également de façon hydraulique.

la nécessité de rompre la transmission mécanique, tout en permettant au moteur thermique de s'arrêter lorsque la voiture roule, ou de continuer à tourner lorsqu'elle est arrêtée. Mieux, il joue également le rôle de boîte de vitesses, et tient dans la main. Comment un tel miracle est-il possible ? Et pourquoi ne l'a-t-on pas déjà monté sur toutes les automobiles depuis longtemps ? Comme toujours en matière de technique, il n'y a jamais de miracle, et rarement de grandes révolutions. La plupart des principes mécaniques de transmission du mouvement ont déjà été explorés depuis longtemps, en particulier au début du ^{xx}e siècle quand l'automobile n'était pas encore aussi standardisée qu'aujourd'hui, et constituait le grand terrain de jeu des inventeurs. Les transmissions que nous connaissons aujourd'hui, très peu nombreuses en regard de l'immense variété des solutions envisagées, ont été retenues parce qu'elles résolvaient correctement un problème dans le cadre de certaines contraintes : coût, complexité, fiabilité, facilité de fabrication en grande série. Pendant un siècle, le prix du pétrole n'étant pas vraiment un paramètre de grande importance pour l'ingénieur, toute solution « inutilement compliquée » ayant pour principal avantage d'économiser le carburant n'avait donc aucune raison d'obtenir le feu vert pour le passage en production. En particulier, pourquoi se casser la tête à concevoir une transmission ne pouvant fonctionner *que* sur une motorisation hybride ?

C'est là qu'est l'astuce : plutôt qu'adapter (et compliquer) un système existant déjà sur des voitures à moteur thermique, les ingénieurs de l'équipe G21 choisissent de le simplifier en tirant parti des caractéristiques bien particulières des moteurs électriques. Nous sommes tellement habitués aux moteurs à essence ou Diesel de nos automobiles que nous en oublions leurs défauts majeurs : ils ne savent pas démarrer tout seuls (contrairement aux machines à vapeur, qui ont d'autres défauts il est vrai), et une fois en route sont incapables de fonctionner en dessous d'une certaine vitesse de rotation. C'est pourquoi il était nécessaire de les lancer, autrefois à la manivelle et aujourd'hui à l'aide d'un petit moteur électrique (le démarreur) ; et s'ils continuent

à tourner au ralenti dans les bouchons en brûlant leur carburant en pure perte, c'est uniquement par fierté, pour ne pas avoir à demander une fois de plus l'aide de leur petit frère électrique, tellement moins imposant qu'eux, après s'être arrêtés maladroitement en hoquetant. De plus, comme le montre le graphique ci-dessous, leur puissance croît presque proportionnellement au régime de rotation : il est donc nécessaire, pour répondre aux demandes de puissance très fluctuantes et ne dépendant pas *que* de la vitesse de la voiture, de trouver un moyen de faire varier le régime du moteur thermique plus ou moins indépendamment de la vitesse du véhicule. C'est tout bêtement la raison d'être d'une boîte de vitesses, autrefois à 3 ou 4 rapports, aujourd'hui 5, 6, voire 7 ou même 8 rapports¹³ pour ceux qui ont les moyens... ou d'anciennes voitures exotiques¹⁴.



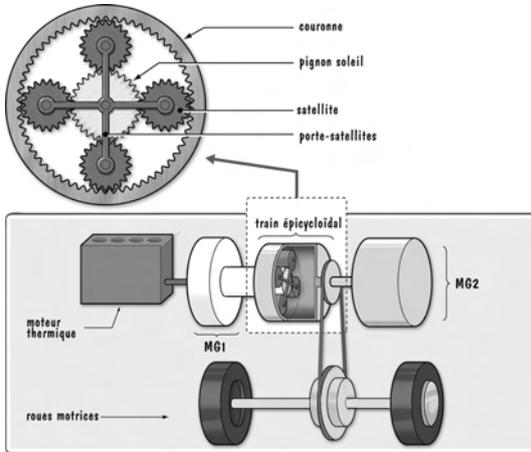
19 | Caractéristiques de puissance schématisées d'un moteur électrique et d'un moteur thermique.

Un moteur électrique, en revanche, démarre très bien dès qu'il reçoit le courant approprié (puisque c'est lui qui est chargé de réveiller le moteur thermique !), et c'est même à vitesse nulle qu'il développe

13. Sans compter les transmissions à variation continue ou « CVT », qui en ont une infinité.

14. La Mitsubishi Colt de 1978 comportait une boîte manuelle à deux étages, 8 rapports et 2 leviers de vitesse. Solution idéale en montagne, hélas abandonnée sur les versions suivantes.

le couple¹⁵ le plus important. De plus, il peut développer sa puissance quasi-maximum sur une large plage de vitesses, contrairement au moteur thermique qui doit hurler à haut régime pour cela. Or les transmissions traditionnelles sont conçues en fonction des tares des moteurs thermiques : leur impossibilité de fonctionner en dessous d'un certain régime impose un mécanisme de débrayage, et leur caractéristique de puissance nécessite la présence de plusieurs « rapports » pour la boîte de vitesses. Avec un peu d'astuce, et l'aide de moteurs électriques, il est possible de jeter aux oubliettes ce schéma traditionnel, comme nous allons le voir à l'aide d'une figure.



20 | Liens entre les différents moteurs et les éléments du train épicycloïdal.

La solution finalement retenue par les ingénieurs consiste à prendre deux moteurs-générateurs électriques (désignés en abrégé par MG1 et MG2 dans la suite) et à les relier au moteur thermique (MT en abrégé) par l'intermédiaire d'un ensemble d'engrenages appelé *train épicycloïdal*. Oublions pour l'instant la troisième dimension, et raisonnons sur le premier schéma plan. On y voit trois éléments bien distincts :

15. Le couple (ou *moment* d'une force en langage de physicien, mais qui n'a rien à voir avec le temps) est l'analogie de la notion de force pour la rotation ; il mesure la « force de rotation » créée par le moteur sur son axe ; son unité est le newton-mètre (Nm). Précision utile : la puissance (en watts) d'un moteur est égale à son couple (en Nm) multiplié par sa vitesse de rotation (en radians par seconde).

- la roue dentée centrale, encore appelée *pignon soleil* par analogie avec le système solaire et son étoile centrale, est directement fixée à l'axe de la première machine électrique (MG1) ;
- les 4 roues dentées intermédiaires, qui viennent s'engrener sur la roue centrale, sont appelées *satellites* et sont libres de tourner sur leurs axes respectifs, mais ces derniers sont solidaires d'une armature en forme de croix qui tourne en même temps que l'axe du moteur thermique (MT) ;
- la roue dentée extérieure, qui vient s'engrener sur les satellites, est solidaire en permanence de la deuxième machine électrique (MG2) *et des roues motrices*, si bien qu'on peut, pour la compréhension du mécanisme, l'assimiler tout simplement à une roue de la voiture.

Cette disposition permet à la fois de se passer d'embrayage et de boîte de vitesses, grâce à la présence d'un moteur électrique au couple très important (MG2) capable de mouvoir la voiture en toutes circonstances, alors que le rapport de transmission est fixe entre lui et les roues. Non seulement le problème de la connexion mécanique des divers éléments est solvable, mais il est ici résolu de manière plus simple que sur les transmissions classiques !

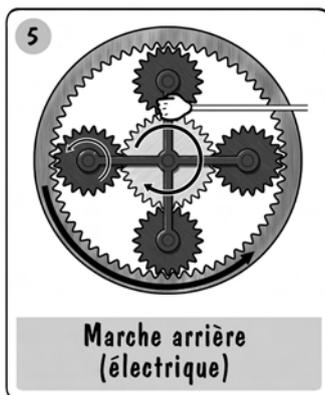
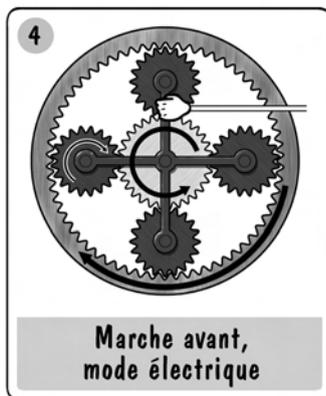
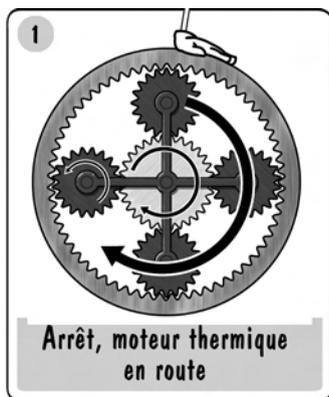
Pour comprendre comment l'ensemble fonctionne, analysons séparément différentes phases typiques de conduite au moyen des schémas de la page 137, où les flèches ne représentent que les sens de rotation, indépendamment des vitesses plus ou moins grandes des éléments.

- Dans le schéma n° 1, la voiture est à l'arrêt, moteur thermique tournant. À quoi bon pourrait-on objecter, puisqu'il n'est pas nécessaire de produire du travail pour rester sur place ? Pas si vite, n'oublions pas qu'il faut parfois chauffer l'habitacle en hiver dans les bouchons, ou recharger la batterie ! Dans le premier cas, seule la chaleur du moteur thermique est utilisée, et MG1 tourne « en roue libre », n'étant ni moteur ni générateur ; dans le second en

revanche, il oppose une résistance au mouvement des satellites, ce qui impose d'injecter un peu plus d'essence dans le moteur que pour un simple ralenti (ceci est automatique, le conducteur n'intervient pas), mais une partie de l'énergie thermique de ce carburant est ainsi transformée en électricité et stockée.

- Pour que la voiture se mette en route et passe au stade n° 2, il est nécessaire que quelque chose mette en rotation la grande couronne, qui rappelons-le est reliée directement aux roues motrices. Si le moteur thermique se contente de tourner comme dans le cas précédent quand MG1 est en « roue libre », il n'exerce pratiquement aucune force sur les dents de cette couronne, puisque les satellites sont libres de tourner sur leur axe. Pour qu'une force existe, il faut que MG1 « résiste » (imaginez qu'il est complètement bloqué par exemple, c'est plus facile) ; or s'il résiste il est générateur, produit de l'électricité... qui peut être soit stockée dans la batterie, soit directement utilisée par MG2 qui fonctionne alors en moteur et aide lui aussi au démarrage de la voiture ! C'est là une caractéristique marquante de cette transmission : une partie de la puissance emprunte une voie électrique, *même quand la batterie n'est pas sollicitée*. Et ce passage variable par un chemin électrique joue le rôle de boîte de vitesses, ce qui lui vaut le nom de *transmission électromécanique*.
- La voiture ayant accéléré jusqu'à sa vitesse de croisière (schéma n° 3), il n'est plus nécessaire de forcer beaucoup¹⁶ pour faire tourner la grande couronne, ni de faire tourner vite le moteur thermique puisqu'une faible puissance est suffisante. Il faut donc que la couronne puisse tourner rapidement (la voiture va vite) tandis que le moteur thermique tourne lentement. Ceci impose que l'armature supportant les satellites tourne moins vite que la couronne, ce qui a pour effet de faire tourner le pignon soleil dans le sens opposé. Et comme le couple nécessaire au niveau des roues

16. En termes techniques, d'appliquer un couple important.



est faible, on peut même *freiner* avec MG2, qui devient générateur, produit du courant... qu'il envoie à MG1 devenu moteur ! La situation est inverse de la précédente, et le passage de l'une à l'autre se fait graduellement par les variations des vitesses et des couples imposés aux moteurs électriques. Ce cas de figure un peu particulier, assez difficile à comprendre, a quelquefois été qualifié de « mode hérétique » par certains¹⁷.

- Les cas n° 4 et 5 sont vite expédiés : dans l'un comme dans l'autre, le moteur thermique ne sert à rien ! Les satellites sont alors de simples renvois passifs et la voiture fonctionne comme une voiture électrique ordinaire. C'est toute l'élégance de cette transmission : permettre le passage graduel d'un mode hybride à un mode électrique pur, sans le moindre embrayage ou dispositif de découplage mécanique.

Mais bien entendu, si la simplicité de la partie mécanique est plutôt une heureuse surprise, d'autres casse-tête attendent les ingénieurs du côté de la partie électrique du système. Et leur tâche n'est pas allégée par le nouveau président Hiroshi Okuda, arrivant en août 1995 : il exige quelques mois après sa prise de fonctions que la voiture soit commercialisée fin 1997, soit un an plus tôt que la date déjà considérée irréaliste sur laquelle se basaient les ingénieurs.

L'ÉLECTRONIQUE ET LA BATTERIE RÉSISTENT

Une batterie se charge et se décharge avec un courant continu, or les moteurs électriques ont besoin de courant alternatif¹⁸ pour fonctionner ; il faut donc un dispositif capable de « mettre en forme » le courant avant de l'envoyer dans les bobinages électriques. Actuellement, cette opération est réalisée au moyen de semi-conducteurs, des transistors de puissance agissant comme des interrupteurs ultra-

17. On pourra par exemple en lire une explication humoristique (en anglais) à l'adresse suivante : <http://prius.ecrostech.com/original/SideBars/Overdrive.htm>

18. Les moteurs à courant continu existent ; mais leurs versions modernes sont en réalité d'une conception peu différente de celle des moteurs à courant alternatif.

rapides en passant quasi instantanément de la position « ouverte » (ne laissant pas passer le courant) à la position « fermée » (se comportant alors en conducteur). Nous avons tous des millions de transistors chez nous, et même lorsque nous sortons en balade, car ils constituent le cœur des circuits intégrés et microprocesseurs assurant le fonctionnement de nos ordinateurs, mais également d'innombrables accessoires électroniques (montres, GPS, climatisation ou ABS de nos voitures...). Toutefois, ce ne sont pas en général des transistors *de puissance*, car le rôle de la plupart d'entre eux est de « traiter l'information », ce qui nécessite des puissances très faibles et permet en conséquence une miniaturisation extrême. Mais ces petites bêtes dégagent quand même un peu de chaleur lorsqu'elles fonctionnent (toujours cette satanée entropie...), n'étant jamais parfaitement conductrices quand on leur demande de l'être et opposant une certaine résistance au passage du courant. Chaleur qu'il faut évacuer si on ne veut pas faire fondre le composant, ce qui nécessite de souffler dessus (c'est ce que font les ventilateurs de nos ordinateurs) ou au moins de laisser un peu de place autour en comptant sur la convection naturelle !

Cette chaleur dissipée est naturellement d'autant plus importante que la puissance électrique en jeu est élevée ; si l'on sait faire aujourd'hui des microprocesseurs à ventilation « naturelle », de gros transistors de puissance ont à évacuer des flux thermiques d'une tout autre ampleur. Et c'est un des problèmes les plus coriaces que doivent résoudre les ingénieurs dirigés par Uchiyama : le boîtier électronique permettant d'alimenter les moteurs, l'*onduleur*¹⁹, chauffe plus que prévu. Certes moins qu'un moteur thermique (encore heureux !), mais les semi-conducteurs ne supportent pas non plus les mêmes températures ; et justement la présence du moteur thermique à proximité²⁰ rajoute une source de chaleur extérieure non négligeable, qui n'existe pas dans les voitures purement électriques. Or il n'est pas question que ce boîtier

19. Le terme anglais est *inverter*, qui donne quelquefois lieu à la (mauvaise) traduction *inverseur*.
20. Pourquoi mettre le boîtier électronique sous le capot, alors ? Pour raccourcir au maximum les connexions alimentant les moteurs, qui deviennent d'excellentes antennes émettrices de parasites sinon.

tombe en panne : sans batterie la voiture fonctionne encore (elle a seulement une puissance totale diminuée), mais pas sans onduleur ; c'est le talon d'Achille de cette transmission électromécanique.

Toyota a pourtant cherché à limiter les risques en concevant et fabriquant lui-même ses transistors : la fiabilité de ceux du marché, non destinés à l'automobile, ayant été jugée insuffisante, une usine de composants électroniques située à Hirose fournissait déjà des transistors de puissance depuis 1989. Ces composants, appelés « IGBT » pour *Insulated Gate Bipolar Transistor*²¹, sont soumis à de rudes contraintes thermiques et mécaniques, leurs différents matériaux pouvant se dilater de façon inégale au gré des variations de température ; leur rupture mécanique est tout autant à craindre que leur « claquage » électrique. Les IGBT sont bien utilisés depuis les années 80 en traction ferroviaire, sur le *Shinkansen*²² par exemple, mais la multiplicité des moteurs et des onduleurs correspondants limite les dégâts en cas de panne, un essieu moteur en moins permettant encore à la rame de circuler presque normalement. Ce n'est plus le cas sur une automobile, où il n'est évidemment pas question de monter des IGBT de secours pour prendre le relais le cas échéant vu le prix de l'accessoire, très conséquent malgré ses dimensions centimétriques ! La « plaque de base » du composant, support sur lequel il est fixé et qui aide à évacuer la chaleur produite, posera de nombreux problèmes aux ingénieurs. D'abord envisagée en cuivre, excellent conducteur thermique mais se détériorant trop rapidement, elle laisse finalement la place à un matériau composite plus robuste, à base de carbure de silicium et d'aluminium. Mais la conduction de la chaleur est insuffisante, et l'équipe d'électroniciens est en définitive obligée de rajouter un circuit de refroidissement supplémentaire, afin de garantir la longévité de l'onduleur. Circuit nécessairement séparé de celui du moteur thermique, les températures n'étant pas les mêmes...

21. Qu'on peut traduire par *transistor bipolaire à grille isolée*, mais qu'on traduit rarement...

22. Réseau japonais de trains à grande vitesse.

Tout ceci n'est rien en regard du problème le plus inquiétant, pour ne pas dire désespérant : celui de la batterie. Pourtant Toyota possède une expérience en la matière, notamment avec la conception du *RAV4 EV*²³ qui sera vendu aux États-Unis de 1997 à 2003, et basé sur des batteries de type nickel/hydrures métalliques (NiMH) du même type. Aujourd'hui très populaire dans les quartiers chics de Californie, où il complète à merveille les panneaux photovoltaïques installés sur le toit des villas, ce véhicule, quelquefois appelé ironiquement « le transporteur de batteries » par les ingénieurs Toyota, doit emmener toute son énergie sous forme électrique, ce qui le leste de 450 kg contenus dans un volume d'environ 400 litres. Cette grosse batterie, d'une tension de 288 V et d'une capacité de 95 Ah, stocke $288 \times 95 = 27\,360$ Wh, soit un peu plus de 27 kWh²⁴. La puissance du moteur entraînant cette voiture est de 50 kW, que cette batterie *king size* n'a pas trop de mal à fournir. Pour une voiture hybride, il n'est pas question d'emporter plus d'un dixième, voire un vingtième de l'énergie trimballée par le *RAV4 EV* : le problème de la masse et du volume occupés est donc relativement insignifiant. Un vingtième de 450 kg, cela ne fait que 22,5 kg, et pour le volume, 20 litres ; pas de quoi s'affoler.

Mais il y a un *hic* : le moteur électrique d'une voiture hybride, même s'il n'est pas l'unique source de puissance motrice, ne saurait se contenter de développer un vingtième de 50 kW, soit 2,5 kW, autant dire une misère ! L'objectif serait plutôt autour des 20 kW, ce qui est une tout autre histoire. Or la puissance, comme la capacité de stockage d'énergie, varie proportionnellement à la masse (et au volume) de la batterie pour une technologie donnée ; les fabricants indiquent souvent dans leurs fiches techniques les performances de leurs produits en Wh/kg pour la densité d'énergie massique et en W/kg pour la densité de puissance massique. Tout comme le marchand de fruits et légumes indique le prix des cerises au kilo, plutôt que le prix de la cerise. Bref,

23. Version électrique du tout-terrain de loisirs *RAV4* de Toyota.

24. Une petite règle de trois, toujours instructive, donne la densité énergétique de 61 Wh/kg.

si la *quantité d'énergie électrique* stockée n'est plus un problème avec la motorisation hybride, la *puissance de la batterie* en est un, et de taille ! Il est absolument nécessaire d'aller très au-delà de la grosse centaine de watts par kilogramme nécessaire pour le RAV4, et les meilleures batteries existantes sont encore loin du compte.

Or qui dit puissance *électrique*, dit également, dans un monde où notre mauvaise copine l'entropie rôde toujours là où on voudrait l'oublier, puissance *thermique* : une batterie qui se charge ou se décharge chauffe, chacun peut en faire l'expérience avec son appareil photo numérique par exemple. Et bien sûr, une batterie puissante électriquement a des chances de chauffer puissamment, ce qui a deux effets néfastes : d'une part dissiper en chaleur l'énergie « ordonnée » de la batterie, donc diminuer le rendement²⁵ ; et d'autre part contribuer à raccourcir la vie de cette même batterie, qui n'aime pas les très hautes températures. Il est donc nécessaire de concevoir une batterie qui chauffe le moins possible d'elle-même, ce qui signifie que sa *résistance interne* doit être faible ; et il faut également veiller à la refroidir efficacement pour qu'elle dure longtemps. Les ingénieurs du projet G21 songent d'abord à implanter la batterie comme celle du RAV4 : sous le plancher. C'est une mauvaise idée ; l'endroit est très chaud et difficile à refroidir lorsque la voiture roule sur du bitume sombre ayant accumulé l'ensoleillement estival. Après d'incessants échecs, la batterie refusant régulièrement de coopérer, ils décident finalement de la placer à l'intérieur de la voiture, derrière la banquette et alimentée en air de refroidissement par des ouïes placées dans l'habitacle : ainsi en été, quand le conducteur et les passagers profitent de la climatisation, la batterie aussi... c'est déjà mieux, mais l'objectif n'est pas encore atteint. Devant le retard pris, Toyota renonce à fabriquer en

25. Le principe de la récupération d'énergie doit d'ailleurs être tempéré par le rendement des conversions d'énergie effectuées : celles-ci n'étant jamais parfaites, il peut être plus intéressant de faire fonctionner le moteur thermique avec un rendement non optimal mais en utilisant directement son travail mécanique pour faire avancer la voiture, que de le maintenir dans sa zone « idéale » mais au prix de pertes lors des conversions. La gestion du système hybride a été revue en ce sens entre les versions NHW11 (2000-2003) et NHW20 de la Prius.

interne ce composant pourtant essentiel, et crée en décembre 1996 une *joint-venture* avec Matsushita Electric Corporation et Matsushita Battery, sous le nom de Panasonic EV Energy. Malgré cela, la batterie restera un cauchemar jusqu'aux derniers instants. En mai 1997, quelques mois avant la commercialisation du modèle au Japon, des journalistes sont invités à essayer la voiture sur le circuit de Higashifuji ; on leur précise d'emblée qu'ils n'ont droit chacun qu'à deux tours de circuit et pas plus : les ingénieurs ne sont pas sûrs que la batterie tienne jusqu'à la fin du test. En 2000, lors du lancement de la deuxième version de Prius²⁶ destinée également à l'exportation, c'est une batterie de conception totalement différente, et plus fiable, qui équipera les voitures. Des taxis canadiens ont depuis largement dépassé avec elle la barre des 300 000 km sans devoir la changer.

LE MOTEUR À CINQ TEMPS

Les problèmes électriques et électroniques ont beau être coriaces, c'est quand même le moteur thermique qui, au départ, transforme l'énergie thermique du carburant en travail : il est donc important de lui consacrer quelques efforts afin de l'optimiser. Pour une voiture destinée à battre des records de sobriété, il paraît logique de privilégier le rendement ; sur le papier, les moteurs Diesel partent avec un avantage sur leurs équivalents Otto, en raison notamment de leur taux de compression plus élevé. Pas question cependant de retenir ce moteur au Japon, pays densément peuplé où il est considéré à juste titre comme beaucoup plus polluant que le moteur à essence : au milieu des années 90 le filtre à particules n'est pas encore au point²⁷, et d'autres polluants comme les oxydes d'azote (toujours émis en grande quantité aujourd'hui) restreignent eux aussi l'usage du Diesel à l'utilitaire lourd. De plus un bloc-moteur Diesel est toujours plus lourd que son équivalent à essence, et plus coûteux à fabriquer, deux mauvais

26. Modèle NHW11, souvent confondu avec la version initiale (NHW10) car possédant la même carrosserie. La version disponible en 2006 (NHW20) est donc la troisième.

27. Il sera introduit en série par PSA en 2000 sur la 607 Peugeot.

points quand on cherche l'allégement de la voiture et l'obtention d'un prix de vente encore décent après l'ajout des composants propres à l'hybridation. Il ne reste donc plus que le moteur à essence... mais ce n'est pas une raison pour reprendre bêtement un moteur existant.

Dans les automobiles mues uniquement par un moteur thermique, celui-ci doit répondre simultanément à des objectifs contradictoires : être suffisamment puissant pour rendre la conduite sûre et agréable, ne pas consommer trop de carburant, ne pas trop polluer²⁸, être capable de passer en un clin d'œil du régime de ralenti à celui de puissance maximale, etc. L'art de l'ingénieur étant celui du compromis, tous les objectifs ne se voient pas attribuer la même priorité en fonction des qualités attendues du véhicule à construire : l'acheteur d'une Ferrari accorde généralement peu d'importance aux émissions polluantes de son bolide, et beaucoup à la vitesse (voire à la sonorité) des montées en régime du moteur. Dans une voiture hybride, le moteur thermique est appelé à fonctionner d'une façon très particulière ; on le coupe lorsque la puissance demandée est faible, la traction devenant alors électrique, et on l'aide lorsque la puissance demandée est forte, avec là encore le secours d'un moteur électrique. Autrement dit, son existence se rapproche de celle d'un moteur stationnaire comme ceux utilisés dans les groupes électrogènes, ronronnant tranquillement dans une plage de régimes restreinte au lieu d'alterner les phases de sprint et de farniente. Les contraintes n'étant plus les mêmes, les ingénieurs en tirent logiquement les conséquences : moins de priorité à la puissance pure, davantage au rendement.

Dans un moteur à essence idéal, qui n'existe pas dans le monde réel mais dont l'étude permet de ne pas avancer à l'aveuglette, le rendement théorique η dépend directement du taux de compression²⁹ τ selon la recette suivante :

28. Souvent confondues en France, consommation et pollution sont deux notions fort différentes et parfois contradictoires ; nous y reviendrons dans la partie suivante.

29. Rapport entre les volumes maximal et minimal de gaz emprisonnés dans le cylindre par le piston au cours du cycle ; vaut environ 10 pour un moteur à essence et 20 ou plus pour les anciens Diesel, un peu moins sur des moteurs récents turbocompressés.

$$\eta = 1 - \tau^{1-\gamma}$$

où le paramètre γ vaut en théorie exactement 1,4 et en pratique plutôt 1,22 pour les ingénieurs soucieux de faire coller les formules à la réalité. Ce dernier chiffre étant lié à la nature des gaz présents dans le moteur, seul le taux de compression représente une possibilité de réglage pour l'ingénieur, et sa recette indique clairement que plus il est élevé, plus le rendement l'est également (l'exposant étant négatif, plus on augmente τ moins on retranche à la valeur 1). Il suffirait donc pour améliorer le rendement de comprimer énormément le mélange gazeux en fin de course du piston... mais cette opération a des limites fixées par le carburant lui-même ! Si la pression et la température augmentent trop en effet, la combustion se produit spontanément avant d'être déclenchée par la bougie, et avant que le piston ait terminé sa course donc en freinant brutalement son mouvement : ce phénomène appelé *cliquetis* en raison du bruit caractéristique qu'il provoque doit être absolument évité sous peine d'endommager le moteur.

Peu d'espoir du côté du taux de compression donc... mais rappelons-nous le moteur archaïque de Lenoir : celui-ci n'avait pas eu l'idée de comprimer le mélange avant la combustion, pour la simple raison que cette phase du cycle est *consommatrice* d'énergie. Et de fait, si le taux de compression apparaît dans la formule précédente, cela ne signifie pas qu'on dépense moins d'énergie en comprimant davantage les gaz (il en faut plus, bien évidemment !) mais qu'on récupère *globalement* plus de travail grâce à leur *détente* plus importante. Tout simplement parce que le piston effectue des va-et-vient entre les mêmes positions extrêmes, à l'aller comme au retour. Et si le piston allait *plus loin* en fin de détente qu'en début de compression ? On pourrait ainsi faire varier indépendamment le taux de compression (limité par le carburant) et le taux de détente (qu'on souhaite le plus élevé possible pour un meilleur rendement).

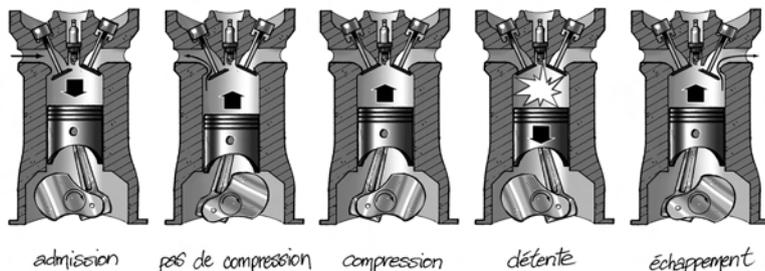
Tout ceci, un certain James Atkinson y avait déjà pensé... en 1882. Pas tant par nécessité d'économiser le carburant, que par celle de contourner les brevets de Nikolaus Otto, qui tentait alors de

monopoliser la fabrication des moteurs à quatre temps avant que quelques hommes de loi ne ressortent de l'oubli les écrits de Beau de Rochas. Par un dispositif articulé assez complexe, le moteur Atkinson parvient à effectuer les quatre temps en un seul tour de vilebrequin, et surtout à faire décrire au piston des courses différentes lors des phases de compression et de détente³⁰ ; pour cette raison on l'appelle quelquefois « moteur différentiel ». Il est donc possible d'augmenter la course de détente (et en conséquence, le rendement) sans dépasser la valeur maximale du taux de compression ; mais un tel moteur est plus complexe à réaliser, donc plus coûteux et plus fragile également. En outre, ses nombreuses articulations introduisent des frottements supplémentaires qui viennent rogner les gains de rendement théoriques dus à son architecture, c'est pourquoi il est aujourd'hui une curiosité de musée, dans sa définition initiale tout au moins.

Mais l'idée de rendre à la détente sa liberté par rapport à la compression trotte longtemps encore dans la tête de nombreux inventeurs, et c'est un ingénieur américain, Ralph Miller, qui dépose dans les années 40 un brevet pour un dispositif permettant d'obtenir presque le même effet que celui d'Atkinson, mais à moindre frais. L'idée est simple : en gardant le mécanisme bielle-manivelle du moteur Otto, où les mouvements du piston sont toujours les mêmes à l'aller et au retour, il est possible de rendre la compression *effective* plus courte que la détente... en ne fermant pas tout de suite les soupapes au début de la compression ! Le mélange air-carburant qui vient d'être aspiré est ainsi refoulé en partie « pour rien » par la soupape d'admission restée ouverte, et c'est seulement lorsque celle-ci se ferme que la compression du gaz commence. À la détente par contre, on laisse les soupapes fermées jusqu'au bout afin de récupérer le maximum de travail. Avec une fermeture « ordinaire » des soupapes d'admission (comme sur les moteurs Otto), un moteur à cycle Miller aurait donc un taux de compression excessif et égal au taux de détente ; mais

30. Les courses du piston sont même différentes pour les *quatre* temps du cycle !

grâce à cette astuce la compression peut être limitée à la valeur voulue, indépendamment de la détente. On nomme quelquefois « cinquième temps » la phase précédant la compression réelle et pendant laquelle l'air frais est refoulé.



21 | Les 5 temps du moteur à cycle Miller.

Toutefois, le moteur de Miller présente aussi des défauts, sinon nous en verrions davantage sous les capots des automobiles : si son rendement est meilleur que celui du moteur Otto, sa puissance est par contre assez limitée³¹. Or une voiture à moteur thermique se doit de répondre facilement aux puissances très fluctuantes qu'exige la conduite, ce qui handicape le moteur Miller utilisé seul, et le destine plutôt à des usages où son fonctionnement est régulier... ce qui est justement le cas d'une motorisation hybride ! Logiquement, les ingénieurs Toyota choisissent donc très tôt un moteur peu puissant mais au rendement élevé pour leur future Prius : ce sera un moteur à cycle Miller, que le service communication de Toyota présente plus volontiers sous le nom d'Atkinson. Sur la version commercialisée en novembre 1997 au Japon, il ne développe que 43 kW, très peu pour un moteur de 1 500 cm³ : à titre de comparaison, la puissance d'un moteur à essence Renault actuel de 1 390 cm³ est de 72 kW. La raison principale est un

31. Mazda utilise également le cycle Miller dans une voiture luxueuse, la Xedos 9 sortie en 1995 (encore appelée Millennia ou Eunós 800 suivant les pays) ; son défaut de puissance était compensé par un compresseur à double vis Lysholm. Très sobre pour sa puissance, elle ne rencontra que peu de succès ; il est vrai que le cours du pétrole était alors très bas.

régime maximum extrêmement paisible de 4 000 tours par minute³² : plus lent qu'un Diesel ! En contrepartie, son rendement est lui aussi comparable à ceux des moteurs à gazole : sa consommation spécifique est inférieure à 230 g/kWh soit une efficacité³³, exceptionnelle pour un moteur à essence, de presque 37 %.

Un autre problème des motorisations hybrides étant de pouvoir lancer et stopper le moteur thermique le plus discrètement possible, l'équipe de Uchiyamada s'aide également des soupapes pour diminuer les vibrations correspondantes : les moments de l'ouverture et de la fermeture de la soupape d'admission ne sont pas fixes mais variables grâce à un dispositif, maintenant assez répandu, appelé « VVT-i » dans le jargon de la maison³⁴. De cette façon, dans ces phases transitoires délicates où un taux de compression trop élevé provoquerait des vibrations inconfortables, on n'obtient plus qu'un frémissement à peine perceptible. Ce problème des secousses indésirables fut également une raison de plus qui poussa les ingénieurs à rejeter la solution du moteur Diesel, dont la mise en route et l'arrêt sont encore moins discrets. Finalement, ainsi équipé, le moteur à essence de la Prius possède un taux de compression effectif variable entre 4,8 et 9,3, alors que le taux de détente, caractéristique du cycle Miller, est égal à 13. Mais les tableaux chiffrés des revues automobiles (ou même de certaines publications Toyota !) n'étant généralement pas prévues pour les moteurs à cycle Miller, il n'est pas rare de lire qu'un moteur de Prius affiche un taux de compression de 13 alors qu'il s'agit bien de son taux de détente.

32. La version suivante verra ce régime augmenter jusqu'à 4 500 t/min, et 5 000 t/min pour le modèle actuel.

33. En prenant pour l'essence un contenu énergétique de 42,9 MJ/kg (pouvoir calorifique inférieur, selon l'Institut français du pétrole). Le moteur de la Prius actuelle (NHW20) descend à 225 g/kWh (Koichiro Mura *et al.*, *SAE Technical Paper Series*, 2004-2001-0064).

34. En langage technique, il s'agit d'un système de calage variable de la distribution.

12

Un accueil contrasté

SYMPATHIE DES UNS, MOQUERIES DES AUTRES

Enfin, en décembre 1997, la Prius, première voiture hybride de grande série, est livrée aux clients japonais. Pas question de l'exporter pour l'instant : le constructeur n'est sans doute pas suffisamment sûr du produit, et ne se risque pas à gâcher une réputation mondiale de fiabilité qu'il sait excellente. Pourtant l'accueil ressenti juste avant le lancement, lors des présentations à la presse, l'incite à prévoir dès le départ un accroissement de la production par rapport aux prudents objectifs initiaux : commençant par les 1 000 exemplaires mensuels prévus, les usines en sortiront le double six mois plus tard. L'accueil est effectivement très favorable au Japon, malgré des insuffisances probables (difficiles à vérifier, la voiture n'ayant pas été exportée) que des journaux spécialisés relatent chez nous en termes sévères. On lit par exemple dans *l'Automobile Magazine* de juillet 1998 :

«Si vous sollicitez trop le moteur électrique, en montagne ou sur un parcours rapide, le voyant de batterie affiché au tableau de bord devient rouge, puis, une petite tortue apparaît. Dès lors, vous perdez

de la vitesse et accélérer devient une tâche difficile. Si vous arrêtez le moteur à ce moment précis, redémarrer deviendra une épreuve de force. »

et plus loin :

« Si gravir une montagne est déjà une rude épreuve, la descendre devient totalement effrayant. Du fait que les freins rechargent les batteries, on a l'impression d'être au point mort. Si la pédale possède une course constante, on sent en revanche une variation très nette de la puissance. Le mordant n'est pas prononcé et l'endurance discutabile peut s'avérer dangereuse. On se croirait revenu à l'époque des freins à tambour. »

Tout ça pour ça, doivent se dire les concurrents rassurés. S'ils saluent la prouesse technique, aucun ne semble prendre réellement au sérieux cette curieuse automobile, pas spécialement élégante de surcroît. En 1998, une voiture hybride reste encore une bête de cirque, pas une menace commerciale.

POLÉMIQUES

Si ces curieux engins (essentiellement représentés par la Prius malgré l'apparition de nombreux autres modèles) sont encore loin d'envahir les routes, surtout en Europe, il est certain que les hybrides sont maintenant sorties de l'anonymat, voire devenues des symboles de la « voiture propre », ou de la contestation de la politique pétrolière de l'administration Bush chez de nombreuses vedettes américaines. Rarement des sommes dépensées en recherche et développement à long terme auront aussi vite engendré des retombées publicitaires : constructeur à l'image sérieuse mais soporifique, Toyota s'est offert grâce à la Prius une coloration « verte » et *high-tech* à la fois. La publicité étant l'art de se faire remarquer, le premier à proposer une automobile radicalement différente dispose immédiatement d'un avantage certain.

Il est tentant pour d'autres de surfer sur cette vague, et même de faire parler de soi de façon polémique en contestant à Toyota la paternité de ses travaux. Récemment par exemple, l'entreprise *Antonov PLC*,

spécialisée dans les transmissions, fondée et dirigée par l'inventeur franco-roumain Roumen Antonov, estima que Toyota avait copié le brevet européen n° 0414782 pour la transmission géniale de simplicité de la Prius, et intenta au constructeur un procès en avril 2005. Le dispositif d'Antonov, publié en 1989, permet effectivement de répartir la puissance entre un moteur thermique et deux machines électriques au moyen d'un train épicycloïdal. Il y a bien de troublantes ressemblances entre les deux techniques... mais faut-il en conclure que Toyota (ou son équipementier Aisin, spécialiste des transmissions) a réellement copié le brevet d'Antonov ? Un petit tour sur des sites publics de brevets, notamment celui du *United States Patent and Trademark Office*¹, suffit à se rendre compte que Toyota s'est certainement inspiré... d'inventions bien antérieures à celle de Roumen Antonov.

La notion d'engrenage épicycloïdal est probablement due à James Watt lui-même, qui en eut besoin dès 1781 pour transformer en mouvement rotatif les allers-retours du piston de sa machine à vapeur. Non qu'il ne connût le système bielle-manivelle... mais celui-ci était breveté ! Il ne s'agissait pas alors, tout de même, d'un système identique à celui de la Prius, seules deux roues s'engrenaient l'une sur l'autre. Bien plus tard, l'automobile mais aussi la bicyclette inspirèrent les inventeurs mécaniciens ; le changement de vitesses pour vélo dans le moyeu fut inventé en 1902 par la firme anglaise Sturmey-Archer en utilisant précisément un engrenage épicycloïdal ; les boîtes de vitesses automatiques traditionnelles d'automobiles en font également une grande consommation. Mais toujours pas pour l'association de moteurs électriques et thermiques, il est vrai. L'idée lumineuse d'utiliser ce mécanisme pour un véhicule hybride serait donc récente ? Parmi les milliers de brevets recensés à l'USPTO traitant de transmissions à train épicycloïdal, certains nous montrent que l'imagination humaine converge souvent vers les mêmes résultats quand les buts sont les mêmes. Ainsi le brevet *US 3 732 751*, déposé le 2 mars 1971

1. <http://www.uspto.gov/>

par Baruch Berman, George Howard Gelb, Neal Allen Richardson et Tsih C. Wang, décrit très exactement le fonctionnement d'une transmission associant un moteur thermique, deux machines électriques et un train épicycloïdal, en tout point semblable à ce qui fait avancer une Prius. La transmission est également de type continu, la récupération d'énergie est décrite, seule l'affectation des divers étages du train aux différents moteurs change. Remontons encore plus loin dans le passé : en 1902, John C. Henry dépose le brevet *US 707 230* qui présente « *un véhicule qui peut être mû par un moteur électrique, ou par la vapeur, ou les deux, et où le moteur à vapeur peut être utilisé pour entraîner le moteur électrique servant de générateur dans le but de charger la batterie²* ».

La jonction entre l'essieu moteur et les deux sources de puissance utilise également un train épicycloïdal, certes dans une configuration différente de celle trouvée sur une Prius, mais on reste quand même admiratif devant l'imagination des inventeurs de toute époque... et sceptique devant la prétention de certains d'avoir été les premiers. Disons-le clairement : pour qui veut une description précise et détaillée de la motorisation d'une Prius (y compris les raisons d'une meilleure dépollution, le fonctionnement de la pédale d'accélérateur ou la tension choisie pour la batterie !), le brevet *US 3 732 751* constitue un très bon départ. Avec le brevet européen n° 0414782, beaucoup plus d'imagination sera nécessaire.

2. «... a vehicle which may be run with an electric motor or steam power, or by both, and where the steam-engine may be used to drive the motor as a generator for the purpose of charging the battery thereon. »

PARTIE 4

EXPÉRIENCES

13

En route vers l'inconnu

LE VILAIN PETIT CANARD

En novembre 2000, deux articles attirent mon attention dans les numéros 1224 et 1225 du *Moniteur Automobile*, magazine belge souvent nettement plus intéressant (notamment par ses pages techniques) que la moyenne de ses concurrents, et pour lequel la passion de l'automobile ne semble pas se limiter aux « calandres agressives » ou aux « lignes viriles » des nouveaux modèles, ou encore aux moyens de localiser les radars. Il y est question d'une voiture techniquement très exotique, arrivant enfin, bien qu'au compte-gouttes, en Europe : la Prius. Autant le dire tout de suite : le premier article, tentant d'expliquer le fonctionnement de la voiture, me laisse avec les synapses en vrac. J'ai vaguement saisi quelques termes, sans plus. Le second, qui relate un essai détaillé de cette curiosité, est forcément plus abordable puisque se plaçant du point de vue du conducteur ; le journaliste, qui semble avoir bien compris le fonctionnement du véhicule, est visiblement très impressionné et ses commentaires laudatifs excitent ma curiosité. Autant la technique est complexe,

autant, d'après lui, la conduite de cette voiture est d'une lumineuse simplicité et parfaitement naturelle.

Mon véhicule d'alors, affichant 115 000 km au compteur, est loin de l'usure maximale mais son freinage plutôt faiblard ne m'incite pas à le conserver jusqu'à sa retraite ; peut-être pourrait-il même constituer un prétexte pour m'offrir, de façon totalement déraisonnable, cette voiture étrange venue d'ailleurs. Mais arriver à essayer un tel oiseau rare est déjà un défi : à l'époque, seuls quelques concessions Toyota sont autorisées à vendre et à entretenir cet ordinateur sur roues, que même les vendeurs ne connaissent pas. Après une tentative ratée chez un concessionnaire toulousain (le seul commercial habilité à présenter cette chose est en congé lorsque je m'y rends, et personne ne prend le risque de tenter de la démarrer), je tombe par hasard sur un modèle flambant neuf garé en bas de chez moi. Le propriétaire, que je finis par rencontrer, ne tarit pas d'éloges sur sa nouvelle acquisition, qui pourtant ne paye pas de mine face aux Audi ou Mercedes qu'il a conduites auparavant. Me voilà donc en grande partie rassuré... et encore plus intrigué. Il me propose très aimablement de l'essayer, ce qui engendre chez moi une suite d'impressions contradictoires, de la déception à l'étonnement admiratif.

Durant l'été 2001, ne reculant devant aucun sacrifice pour satisfaire ma curiosité expérimentale, je me rends dans le garage Toyota de ma petite ville, encore non habilité à distribuer cette voiture confidentielle. C'est bien lui qui a « importé » celle que j'ai pu essayer, en provenance d'un gros concessionnaire de Bordeaux. Lorsque j'annonce au vendeur mon intérêt pour l'engin, il s'excuse de ne pouvoir me le faire essayer, à quoi je réponds que c'est déjà fait. Lorsqu'ensuite je manifeste mon intention de l'acheter, il appelle le patron qui se précipite illico sur son téléphone pour joindre son homologue bordelais : « *Vite, passez-moi Untel, je suis sur le point de vendre une Prius !* ». L'événement semble d'une rareté extrême (il n'a eu lieu ici qu'une fois), et mon entrée dans la concession a pratiquement fait le même effet que la venue de la reine d'Angleterre en personne. Le délai de livraison n'est même pas

rédhibitoire : tous les véhicules destinés au marché français se trouvant stockés en quelque endroit en attente de clients, je pourrais prendre livraison de la voiture une dizaine de jours après la commande si je le souhaitais. Visiblement, il faut être fou pour vouloir acheter une voiture chère (147 800 F prix catalogue) et qui ne donne même pas l'impression de l'être : pas très grande, pas très puissante, pas très belle, et pas la moindre trace de chrome sur la calandre ou ailleurs, en dehors du logo de la marque.

LA COMMUNAUTÉ DES AMATEURS

Un conducteur un peu perdu

Fin août 2001, me voilà finalement au volant d'une automobile tellement bizarre qu'elle me fait quelque temps redouter d'avoir poussé un peu loin ma curiosité naturelle. Elle est certes confortable, particulièrement relaxante en ville où l'absence de changement de vitesse est appréciable (ma précédente voiture était équipée d'une boîte manuelle), mais les premiers pleins se traduisent par une consommation décevante : parfois plus de 6 litres d'essence aux cent kilomètres, c'est moins qu'auparavant dans les mêmes conditions de circulation périurbaine (une économie de 2 litres environ pour des prestations comparables) ; toutefois on pourrait s'attendre à mieux pour une technologie révolutionnaire. J'entreprends donc quelques recherches pour, au moins, comprendre plus en profondeur le fonctionnement de cette curiosité sur roues, et peut-être trouver des raisons de ne pas regretter mon choix.

La tâche s'avère difficile en France, ou absolument personne ne semble connaître cette technologie d'un peu près, même dans le milieu universitaire ou les écoles d'ingénieurs. Lueur d'espoir : à Lyon, l'*INRETS*¹ a réalisé une étude sur la Prius de première génération², en disséquant un exemplaire importé du Japon : je commande donc

1. Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité.

2. *Rapport d'évaluation du véhicule Toyota PRIUS*, B. Jeanneret et F. Harel, rapport LTE 9925, septembre 1999.

le rapport qu'on m'expédie gracieusement. Le travail, très technique comme il se doit, est fort intéressant mais ne me permet pas de saisir dans les grandes lignes le fonctionnement du véhicule : il y est surtout question de mesures d'émissions polluantes, de consommation et de performances d'accélération, mais le fonctionnement des entrailles de la bête n'est pas réellement expliqué.

Heureusement, internet permet de s'affranchir des distances, du moins pour la recherche de documentation technique, et s'il m'est évidemment difficile de lire des documents en japonais, l'anglais constitue une langue d'autant plus utile pour moi qu'elle est, dans sa variante scientifique ou technique, très proche des racines latines. C'est donc parti pour des heures de surf assisté par moteur de recherche, dans l'espoir d'être un peu moins seul à m'intéresser à cette innovation roulante.

Les États-Unis, terre de contrastes...

C'est peut-être un cliché, mais il est en l'occurrence parfaitement justifié : au pays où presque tout le monde trouve normal de conduire des monstres de deux tonnes ou plus à moteur V8 pour conduire ses enfants à l'école, et où le gouvernement refuse de signer le protocole de Kyoto sur la limitation des émissions de gaz à effet de serre, les hybrides font un tabac. Honda avait déjà, en 1999, commercialisé aux États-Unis un coupé sportif léger hybride dénommé *Insight*, battant tous les records d'économie de carburant (3,5 litres d'essence aux cent kilomètres environ) et rencontrant un certain succès auprès de personnes militant contre la voracité énergétique, pourvu qu'elles soient capables de se contenter d'une petite voiture à deux places et quasiment sans coffre. À l'arrivée de la Prius en 2000, berline 5 places habitable, même les familles avec enfants vont pouvoir acheter hybride, et beaucoup le feront avec un certain militantisme, créant diverses associations et nombre de sites internet afin de promouvoir ce mode de transport. On trouve ainsi parmi eux *PriusOnline*, *Hybrid Cars*, *Prius Chat*, *Insight Central*... il faudra attendre fin 2005 pour que

naïsse en France l'équivalent sous la forme du *Prius Touring Club*³, association loi de 1901 visant à promouvoir l'utilisation de véhicules plus économes et moins polluants. Aux États-Unis, le contraste est d'autant plus marquant avec les habitudes automobiles du pays que non seulement la moyenne des véhicules en circulation accuse une certaine obésité, mais en plus elle se nourrit quasi exclusivement à l'essence. Troquer la voiture de l'« *average Joe* »⁴ pour une Prius revient donc, bien souvent, à une division par 3 (plus que par 2) de la consommation : l'effet est encore plus spectaculaire que celui observé au Japon où, même si le Diesel reste tout aussi marginal, la taille des véhicules est beaucoup plus raisonnable.

De plus, aux États-Unis, le Diesel est carrément interdit dans certains états, faute d'une dépollution suffisante. Le classement des véhicules diffusé par l'EPA⁵ distingue clairement le bilan « émission de CO₂ » de celui concernant la pollution de l'air, en attribuant respectivement un *Greenhouse Gas Score* et un *Air Pollution Score* sur des échelles de 0 à 10. Ils peuvent être très différents : si ce sont toujours des hybrides comme la Toyota Prius ou la Honda Civic IMA qui occupent les premières places aussi bien en émission de CO₂ (10/10) qu'en pollution de l'air (9,5/10), les premières voitures Diesel, des Volkswagen Golf, s'acquittent d'un très honorable 8/10 en émission de gaz à effet de serre... et d'un infamant 1/10 en pollution de l'air. Pas très loin d'ailleurs d'autres véhicules à essence, dont certaines versions à boîte de vitesses manuelle de l'hybride Honda Insight, affublées d'un médiocre 2/10 ! Dépollution et réduction de consommation sont en effet deux choses très différentes (voire contradictoires dans certains cas), ce qui est clairement expliqué au consommateur américain... mais toujours pas au français. Pourquoi ?

Plus étonnant : même des agences gouvernementales comme l'EPA éditent en 2001 plusieurs documents visant à populariser l'usage de

3. <http://www.priustouringclub.com/>

4. Équivalent américain du « Dupont moyen ».

5. *Environmental Protection Agency*, soit l'agence de Protection de l'environnement (<http://www.epa.gov/>).

voitures hybrides, quand les deux seuls constructeurs à proposer de tels véhicules (Toyota et Honda) sont alors japonais. Des fascicules téléchargeables très « grand public » sont mis à la disposition de l'internaute : sur un site commun du département de l'Énergie des États-Unis et de son agence de Protection de l'environnement⁶, on trouve de petits livrets illustrés intitulés *Technology Snapshots* qui présentent la Prius et l'Insight en des termes très élogieux. Qu'on en juge : « *Un nouveau type de voiture qui se conduit comme n'importe quelle autre voiture... seulement en mieux* » ; « *Les prétentions de Toyota concernant la Prius sont confirmées par des tests en laboratoire indépendants du département de l'Énergie et de l'agence de Protection de l'environnement* »... imagine-t-on en France l'Ademe⁷ encourager ouvertement les consommateurs à acheter des voitures concurrentes de celles proposées par les constructeurs « nationaux » ?

En avril 2006, une recherche sur le site de l'Ademe avec le mot-clé « hybride » ne donne toujours que 9 références de documents, dont aucun ne parle spécifiquement de ce type de motorisation. Quatre parlent d'autobus ou de poids lourds, un des nouvelles techniques de dépoussiérage, un autre d'unités de méthanisation de produits organiques agricoles et non agricoles à petite échelle, un septième constitue un fascicule administratif de présentation du « PREDIT⁸ 3 » et seulement deux concernent la voiture de M. Tout-le-Monde. Parmi ces derniers, l'un comporte le terme hybride, sans l'amorce d'une définition, dans un tableau recensant les différents types de véhicules, et l'autre (*Les véhicules particuliers en France, Données et Références*, avril 2005) fait l'effort d'une phrase : « *Compte tenu de l'innovation technologique qu'elle propose et de son prix encore élevé (près de 25 000 € pour le premier prix), le modèle hybride, la Toyota Prius, a débuté honorablement sa carrière commerciale puisque les ventes de cette dernière dépassent déjà le cap des 600 exemplaires.* » Bref, un autre monde.

6. <http://www.fueleconomy.gov/>

7. Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.

8. Programme de recherche et d'innovation dans les transports terrestres.

Le Mini-Scanner du saint Graham

Parmi les particuliers fervents défenseurs des voitures hybrides, certains font preuve d'une pédagogie remarquable pour en expliquer le fonctionnement, et deviennent de véritables « gourous » d'une communauté d'amateurs à la recherche d'informations techniques. Parmi eux, Graham Davies, ingénieur britannique vivant aux États-Unis, est certainement l'un des plus populaires et respectés. Propriétaire d'une Prius, il entreprend d'en détailler le fonctionnement de la façon la plus compréhensible qui soit au moyen d'un site internet⁹ qu'il réalise à ses moments perdus, assez nombreux à l'époque où il traverse une période de chômage. Appliquant ses compétences d'ingénieur en électronique embarquée, il réalise même un montage se branchant sur la prise diagnostic de sa voiture (connexion située sous le tableau de bord et utilisée par les garagistes pour des contrôles divers) qui lui permet de lire quantité d'informations échangées entre les différents ordinateurs de la voiture, comme le courant débité par la batterie ou son niveau de charge, la vitesse de rotation et le couple des deux moteurs électriques, la puissance demandée au moteur thermique ou des dizaines d'autres paramètres... Fidèle à l'esprit d'entreprendre américain, il crée une société pour commercialiser son appareil, sous la forme d'un petit boîtier pour microcontrôleur¹⁰ assemblé à la main par ses soins et qu'il baptise *Mini-Scanner*¹¹. Grâce à cet objet, que je finirai par acquérir en mai 2004, 120 propriétaires de Prius dans le monde pourront traduire en mesures chiffrées les hypothèses plus ou moins vagues émises sur les forums de discussion à la suite d'impressions de conduite subjectives. Depuis, d'autres au Canada¹² ont entrepris d'offrir le même type de possibilités aux conducteurs de la Prius actuelle (le Mini-Scanner n'étant opérant que sur l'ancien

9. <http://www.ecrostech.com/prius/original/PriusFrames.htm>

10. Un microcontrôleur est une unité de traitement de l'information de type circuit intégré rassemblant un microprocesseur et d'autres composants, tels que de la mémoire et des périphériques d'affichage.

11. <http://www.ecrostech.com/Products/MiniScanner/Intro.htm>

12. <http://hybridinterfaces.ca/index.html>

modèle), en utilisant directement l'écran d'affichage multifonctions de la voiture. Décortiquons maintenant quelques expériences réalisées au moyen de cet appareil, qui s'est avéré fort utile pour comprendre le fonctionnement en conditions réelles d'une voiture hybride, ici une Prius de deuxième génération (type NHW11), qui n'est aujourd'hui plus fabriquée.

14

Mesures

EXPLORER LES LIMITES

L'une des inquiétudes des premiers utilisateurs de voitures hybrides, souvent évoquée dans les forums de discussion dédiés à ce sujet sur la toile, est de se retrouver avec une batterie principale¹ déchargée et donc un véhicule aux performances fortement diminuées. C'est d'ailleurs un argument souvent évoqué par les « antihybrides » : selon eux, de telles voitures pourraient voir leur puissance chuter en pleine accélération, par exemple à l'occasion d'un dépassement, privant le conducteur des moyens nécessaires pour effectuer la manœuvre en toute sécurité. Cette crainte est d'ailleurs alimentée par la présence sur les Prius des deux premières générations d'un voyant très particulier au tableau de bord : en forme de tortue, il s'allume pour prévenir le conducteur que la réserve d'énergie électrique est momentanément épuisée, et qu'il convient donc de laisser à la voiture le temps de souffler avant de lui demander le maximum de ses possibilités mécaniques. En réalité, la

1. Comme les voitures « ordinaires », les hybrides possèdent également, en plus de leur batterie haute tension, une petite batterie standard 12 V au plomb.

batterie n'est jamais complètement « vide », ni d'ailleurs complètement « pleine », la gestion automatique du système hybride n'autorisant que l'utilisation d'une fraction de sa capacité afin de privilégier la longévité de la batterie, prévue pour durer autant que la voiture. Mais entre une batterie réellement déchargée et une autre à mi-charge refusant de se décharger davantage, le résultat est évidemment, pour le conducteur, identique.

L'écran qui trône au centre du tableau de bord d'une Prius comporte bien une jauge de batterie indiquant son niveau de charge, mais de façon très approximative et non chiffrée ; certains propriétaires ont même pu croire à une panne de cette jauge en ne la voyant jamais bouger. En réalité, c'étaient simplement les conditions particulières d'utilisation de leur véhicule qui occasionnaient des variations de niveau de charge tellement faibles qu'elles ne pouvaient apparaître sur cette échelle grossière. Le Mini-Scanner, en revanche, permet d'afficher la charge de la batterie en pourcentage de la charge totale, à 0,5 % près. Il est donc l'instrument idéal pour guetter l'apparition de la tortue.

La batterie vient seconder le moteur thermique via le moteur électrique dans deux cas : soit lorsque la puissance demandée est faible, auquel cas la propulsion peut être purement électrique tant que le niveau de charge est suffisant ; soit lorsque la puissance demandée est forte, et le moteur électrique vient alors ajouter son effort à celui du moteur thermique. Inutile d'espérer « vider » la batterie dans le premier cas : la gestion du système est programmée pour que le moteur thermique démarre bien avant que le niveau minimal de charge soit atteint, afin de fournir la puissance nécessaire au mouvement mais aussi de recharger la batterie jusqu'à un niveau moyen. Pour espérer épuiser la batterie, il faut donc demander une puissance élevée à la voiture, supérieure à celle que le moteur thermique peut fournir seul, et pendant suffisamment longtemps. Cette situation n'est pas réalisable en roulant vite : même bien au-delà des vitesses légales, jusqu'à 160 km/h², la voiture

2. 170 km/h pour la Prius actuelle, mieux profilée et dont le moteur thermique est légèrement plus puissant.

peut se contenter encore de son seul moteur thermique pourvu que la route soit horizontale, l'allure constante et le vent nul. C'est d'ailleurs pour cela que sa vitesse est limitée électroniquement à cette valeur : la batterie s'épuiserait vite si un conducteur pouvait la maintenir à une allure plus rapide. Il est donc nécessaire de chercher ailleurs qu'en vitesse pure les conditions pour avoir besoin de forte puissance pendant longtemps ; or nous avons vu que ce sont les accélérations et les montées qui sont gourmandes sur ce point. L'accélération ne saurait durer éternellement, car on atteint rapidement la vitesse limite ; reste donc à trouver une longue montée, accessoire qui se trouve généralement en zone montagneuse, sous la forme par exemple d'une route d'accès à un col ou à une station de sports d'hiver. Par chance, je bénéficie de toutes ces commodités et j'ai donc pu faire une séance de travaux pratiques sur la route d'accès à la station de Luz-Ardiden dans les Pyrénées. Sur une distance de 13 km, la dénivelée est de 1 000 m soit une pente, régulière, de presque 8 %. Cette valeur n'est pas exceptionnelle en soi, mais il est difficile de trouver des pentes à 10 % ou davantage sur plus de 10 km. Même le mont Ventoux n'offre aux cyclistes qu'une pente moyenne de 7,5 % au départ de Malaucène (sur 21 km tout de même), et le « mur » tant redouté de la route sud, s'élevant de Saint-Estève au Chalet Reynard, fierte avec les 10 % pendant 10 km.

Mais avant d'en venir aux résultats, quelques chiffres sur la batterie qui fut l'objet de ce test cruel. Sur une Prius de deuxième génération, sa plage utile de fonctionnement va d'environ 40 % à 80 % de la charge maximale ; il reste donc $80 - 40 = 40$ % de cette capacité pour stocker de l'énergie. S'agissant d'une batterie de 273,6 V ayant une capacité électrique de 6,5 Ah, la capacité *énergétique* totale vaut $273,6 \times 6,5 = 1\,778$ Wh, et 40 % représentent 711 Wh. C'est donc nettement moins d'un kilowatt-heure que nous avons en réserve ou que nous pouvons stocker ; pire : la voiture essayant en général de se maintenir près du milieu de la zone utile (donc vers 60 % de charge), c'est la moitié de cette valeur, soit environ 360 Wh, qui sera le plus souvent

disponible en cas de nécessité. Par ailleurs la masse de la voiture est de 1 265 kg à vide ; avec les divers pleins, le pilote (70 kg) et quelques menues affaires on peut l'estimer à 1 400 kg en ordre de marche. La variation d'énergie potentielle d'une telle masse sur une dénivelée de 1 000 m vaut par conséquent :

$$\Delta E_p = m g \Delta h = 1\,400 \times 9,81 \times 1\,000 = 13,7 \text{ MJ} = 3,8 \text{ kWh.}$$

C'est plus de dix fois la réserve disponible dans une batterie à mi-charge ; il faut donc espérer que c'est bien de l'essence que vient la majeure partie de l'énergie nécessaire à l'ascension.

Celle-ci ayant été entreprise après la traversée du village de Luz-Saint-Sauveur, faite en partie sur le mode de fonctionnement électrique de la voiture, le niveau de la batterie est même en dessous de la valeur médiane : 55 %. Le Mini-Scanner permettant de lire plusieurs paramètres, tout en les stockant sur un ordinateur *via* son port série, il est judicieux de lui demander en priorité le niveau de la batterie, le courant qu'elle débite ou reçoit, le régime du moteur thermique plus quelques autres paramètres comme des températures prises en divers endroits, au cas où il se passerait quelque chose d'inquiétant.

Première surprise : bien que je ne ménage pas l'accélérateur, au début de l'ascension la charge de la batterie commence par *remonter*. La pente est en effet un peu moins forte à cet endroit, et la route relativement droite ; la vitesse de croisière est donc assez rapidement atteinte et la voiture peut la maintenir en utilisant moins de puissance que le moteur thermique est capable d'en fournir : le surplus est donc utilisé par un des moteurs électriques (MG1) pour charger la batterie. Rappelons-nous la formule donnant la puissance ascensionnelle :

$$P_{asc} = m g v p / 100$$

avec la vitesse de la voiture v en mètres par seconde et la pente p en pourcentage. Pour 90 km/h (soit 25 m/s), la puissance nécessaire est environ :

$$P_{asc} = 1\,400 \times 9,81 \times 25 \times 8 / 100 = 27\,468 \text{ W} \approx 27 \text{ kW.}$$

Par ailleurs la puissance aérodynamique vaut :

$$P_{aéro} = (1/2) \rho S C_x v^3$$

ce qui avec cette voiture ($C_x = 0,29$, $S = 2 \text{ m}^2$) et un air à $1,2 \text{ kg/m}^3$ donne :

$$P_{\text{aéro}} = (1/2) 1,2 \times 2 \times 0,29 \times (25)^3 = 7440 \text{ W} \approx 8 \text{ kW.}$$

(ayant arrondi vers le bas auparavant, compensons ici !). Il reste la puissance nécessaire pour vaincre la résistance au roulement :

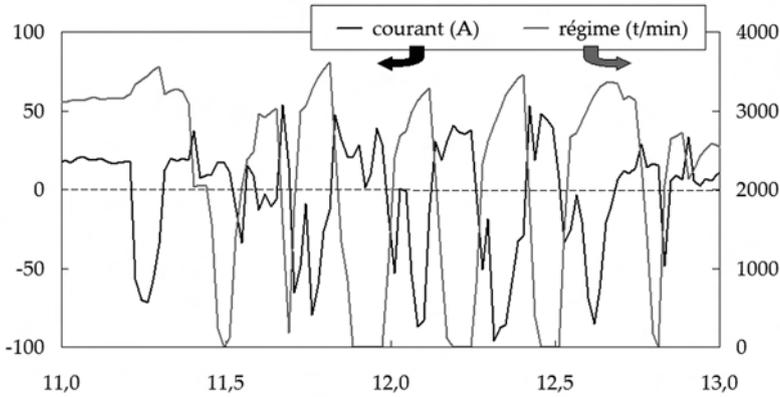
$$P_{\text{roul}} = C m g v$$

qui en prenant $C = 0,01$ donne moins de 4 kW. La somme $27 + 8 + 4$ donne 39 ; c'est donc une quarantaine de kilowatts qui sont nécessaires à maintenir la vitesse maximum autorisée dans cette côte. Bien entendu, il en faut davantage pendant l'accélération, mais une fois celle-ci terminée, le moteur thermique de la voiture étant capable d'une puissance de 53 kW^3 , il reste encore un peu de marge pour charger la batterie, ce qui explique que son niveau peut remonter. Plus loin, les choses sérieuses commencent : les lacets s'enchaînent, ce qui impose de nombreux changements de rythme. Ralentissement à chaque entrée de virage, et réaccélération en sortie. La batterie est mise fortement à contribution lors des relances, avec des courants de décharge frôlant une centaine d'ampères, mais elle reçoit également du courant lors des ralentissements, que ce soit en relâchant simplement l'accélérateur ou en appuyant sur la pédale de frein (voir encadré : *Un freinage à double effet*). Un examen détaillé des variations du régime du moteur thermique et du courant de batterie dans une succession de lacets rapprochés le montre clairement, comme on peut le voir sur la figure 22.

On remarque que le moteur à essence se coupe régulièrement : à chaque ralentissement (demande de puissance négative), il est inutile qu'il tourne, son régime retombe donc à zéro. Le courant de batterie est compté positivement lorsque la batterie se charge, et négativement lorsqu'elle se décharge ; le zéro est indiqué par un trait interrompu. Les forts pics négatifs correspondent aux phases où le moteur électrique MG2⁴ vient aider le moteur thermique dans sa lourde tâche de relancer

3. En toute rigueur, cette puissance dépend de la vitesse de la voiture ; elle est inférieure à basse vitesse.

4. Moteur électrique principal, relié de façon fixe aux roues motrices.



22 | Variations du régime du moteur thermique et du courant de batterie dans une succession de lacets en montée.

la voiture en sortie de virage ; et quand le courant est positif, c'est que la puissance du thermique est supérieure à ce qui est nécessaire. Cela se produit le plus souvent quand la voiture roule à sa vitesse de croisière (extrême gauche du graphique : les deux courbes sont positives) ou lorsqu'elle ralentit : si la puissance demandée est négative, elle est effectivement inférieure à celle du moteur thermique, qui est nulle lorsqu'il est arrêté ! C'est ce qui correspond aux croisements successifs des courbes dans la partie droite du graphique.

Globalement cependant, la batterie se décharge lors de la montée, les accélérations en sortie de virage étant nombreuses et les freinages ou phases à vitesse constante insuffisants pour compenser les fortes décharges. Celles-ci ont lieu principalement lors d'accélération à faible vitesse car le moteur thermique ne peut développer sa pleine puissance du fait de la conception de la transmission. Mais cette décharge progressive est aussi due à la conduite : le test réalisé ici a été conduit sans ménager la mécanique, dans la limite des vitesses autorisées bien sûr mais aussi dans la limite de l'adhérence des pneus, car il est très facile de faire déraiper la roue intérieure au virage si l'on accélère trop fort. La poussée d'un moteur électrique est en effet immédiate à bas régime, contrairement

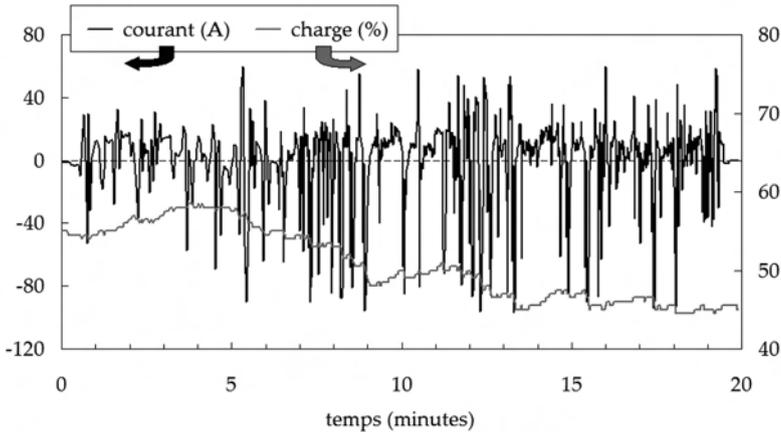
UN FREINAGE À DOUBLE EFFET

Le freinage d'une voiture hybride est complexe : pour permettre la récupération d'énergie lors des ralentissements, il est impératif que la pédale de frein n'actionne pas directement le circuit de freinage classique, mais envoie un ordre à un ordinateur qui se débrouille pour utiliser au mieux les moyens de freinage à sa disposition c'est-à-dire, d'une part une machine électrique, qui utilisée en générateur freine le véhicule tout en produisant un courant envoyé à la batterie, et d'autre part les freins traditionnels. Le freinage électrique est limité en puissance par ce que peut supporter la batterie : inutile de produire une puissance électrique supérieure à ce qu'elle peut encaisser, soit une vingtaine de kilowatts dans le cas présent. On peut donc en conclure que l'énergie sera efficacement récupérée lors des ralentissements modérés (où le freinage électrique suffit) et en grande partie gaspillée en chaleur lors des freinages intensifs (où les freins traditionnels sont nécessairement mis à contribution), ce qui incite naturellement à adopter une conduite anticipative. Un freinage de ce type a également l'avantage de ralentir l'usure des freins à friction : au rythme actuel, les plaquettes avant de ma voiture, qui pourtant évolue beaucoup en milieu péri-urbain, seront à changer aux alentours de 360 000 km.

à celle d'un moteur thermique : leurs caractéristiques sont très complémentaires comme nous l'avons vu au chapitre précédent. Sur la figure 23 on a porté, pour l'ensemble de la montée (13 km, 1 000 m de dénivelée), à la fois le courant de la batterie (échelle de gauche en ampères) et son niveau de charge (échelle de droite en pourcentage, couvrant la totalité du domaine d'utilisation) en fonction du temps. Ce test pourtant exigeant ne permet donc pas, finalement, d'atteindre le niveau de charge minimal. Pas de tortue à l'horizon. Épuiser une batterie de Prius est pourtant possible, mais cette situation ne se rencontre pas en conduite courante, même en montagne.

C'est en réalité la *descente* qui permet d'atteindre les limites de la batterie. En effet, au cours de celle-ci chaque ralentissement provoque l'utilisation prioritaire de MG2⁵ en générateur pour produire du

5. Ce moteur est le seul relié directement aux roues, c'est donc lui qui sert de frein et générateur d'électricité dans les ralentissements.

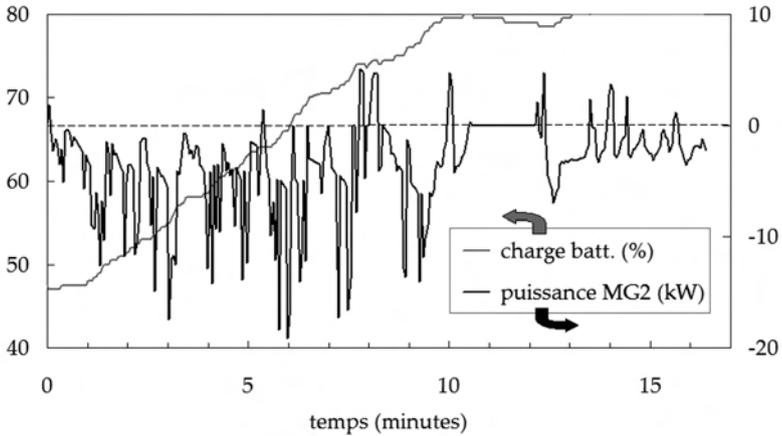


23 | Courant et niveau de charge de la batterie pour l'ensemble de la montée.

courant, et secondairement l'utilisation des freins classiques. Or, la majeure partie de l'énergie mécanique utilisée pour la montée provenant directement du moteur thermique, seule une faible partie a été puisée dans les réserves de la batterie. Ce qui signifie que même avec un taux de conversion médiocre de l'énergie potentielle de pesanteur en énergie électrique, la quantité d'électricité produite par la voiture lors de la descente risque fort de dépasser les capacités de stockage de la batterie... et c'est bien ce qui se produit, comme on le voit sur la figure 24.

On y a remplacé le courant de la batterie par la puissance de MG2, qui est négative la plupart du temps comme il se doit puisqu'il se comporte en générateur tout en ralentissant la voiture, et on a conservé l'affichage du niveau de charge de la batterie. Celui-ci plafonne à 80 % (valeur maximale autorisée par la régulation) bien avant la fin de la descente, alors qu'au bas de la montée il était à 55 % seulement : on charge donc beaucoup plus vite la batterie à la descente qu'on ne la décharge à la montée, ce qui est tout à fait logique pour une voiture hybride (mais ne le serait pas pour une automobile électrique). Connaissant la puissance de MG2, il est maintenant facile d'en déduire

le travail qu'il produit au cours de la descente selon la méthode exposée dans la partie précédente, en calculant la surface comprise entre la courbe de puissance et la ligne zéro : on obtient environ 820 Wh au bout d'une dizaine de minutes, lorsque la charge arrive à saturation.



24 | Récupération d'énergie à la descente, et saturation de la batterie.

Cependant il serait faux de croire que tout le travail produit par le générateur électrique est récupérable : cette énergie sert à charger la batterie, opération qui produit un peu de chaleur, donc dégrade une partie du travail. De même, lorsque la batterie se déchargera plus tard pour alimenter le moteur électrique, elle chauffera un peu et laissera encore s'échapper une fraction de cette énergie sous une forme inutilisable pour faire avancer la voiture. Cette satanée entropie est toujours là ! Bref, au mieux on peut estimer que seulement environ 0,6 kWh sera réellement récupéré, sur une dénivellée de 700 m environ (la batterie étant saturée avant d'atteindre le point le plus bas). Sachant la variation d'énergie potentielle correspondante de la voiture :

$$\Delta E_p = m g \Delta h = 1400 \times 9,81 \times 700 = 9,61 \text{ MJ} = 2,67 \text{ kWh}$$

on peut estimer le rendement de cette récupération d'énergie en divisant 0,6 par 2,67 : on obtient environ 22 %. Cela peut paraître peu, mais c'est mieux que rien, c'est-à-dire le résultat auquel parviennent

les voitures n'ayant qu'un moteur thermique ! Par ailleurs, ce résultat n'est pas un maximum, les conditions idéales n'ayant pas été réunies (il aurait fallu rouler plus vite !) et les générations actuelles de voitures hybrides ont progressé sur ce point. Néanmoins, sachant que cette descente a été longue de 8 km, et qu'en mode électrique à faible vitesse (en ville par exemple) la voiture consomme autour de 140 Wh au kilomètre⁶, on peut dire que cette motorisation offre, dans ces conditions, 1 km de ville gratuit pour 2 de descente à 8 %. Toujours ça de pris !

COMPRENDRE LE FONCTIONNEMENT STANDARD

Il est également légitime, une fois que l'on est rassuré sur la capacité à grimper d'une voiture hybride (et plutôt déçu par sa capacité à stocker le surplus d'énergie dans les longues descentes), de chercher à comprendre son fonctionnement dans des situations plus « normales ». Ce sont probablement celles-ci qui intéresseront la majorité des conducteurs ! On distingue généralement, quand on parle d'automobile, la conduite sur route, celle sur autoroute et celle en ville, pour laquelle, il faut bien le reconnaître, la plupart des automobiles ne sont pas conçues. La première est caractérisée par une vitesse modérée, limitée à 90 km/h mais comprenant généralement des passages à allure plus réduite pour la traversée de zones habitées ou lorsque le tracé de la chaussée nécessite de ralentir. Sur autoroute en revanche, il est en principe possible de maintenir la vitesse maximale de 130 km/h en permanence, hormis les zones de péage ou de travaux : l'allure y est donc élevée et régulière. En ville enfin, l'automobiliste se débat avec les feux et les ronds-points pour tenter de maintenir une vitesse moyenne supérieure à celle d'un cycliste. Examinons ces trois cas séparément, principalement sous l'angle de la puissance demandée au moteur thermique et à la batterie.

6. Cette valeur est même pessimiste, mais elle donne un résultat rond dans le calcul qui suit.

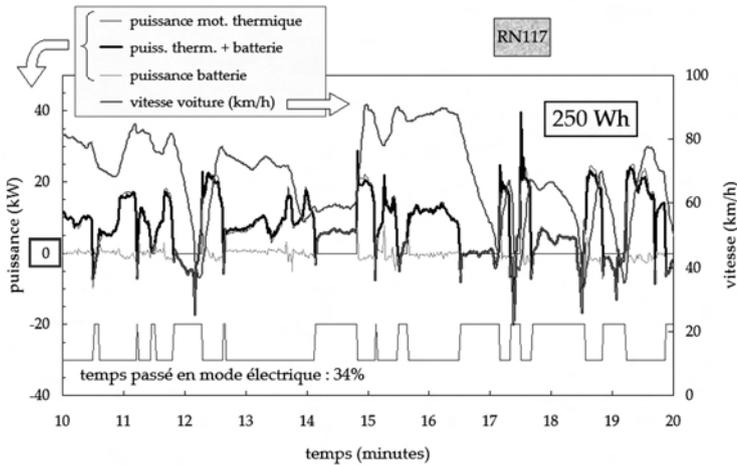
La route

La figure 25 permet de dresser un « portrait » typique de la conduite sur route dans une région au relief très peu marqué (la conduite en montagne a déjà été traitée !). L'axe horizontal représente toujours le temps, l'axe vertical de gauche une échelle de puissance en kilowatts et celui de droite, la vitesse de la voiture. Trois puissances sont affichées : celle du moteur thermique, celle de la batterie et la somme des deux, qui représente à peu de choses près⁷ celle disponible pour faire avancer la voiture. La puissance totale est très souvent difficile à distinguer de la puissance du moteur thermique, car la plupart du temps la batterie ne débite quasiment rien ; c'est essentiellement lorsque la voiture roule en mode électrique que les deux courbes s'écartent et que la puissance totale devient, cette fois, égale à la puissance de la batterie. On observe également que la puissance totale est parfois *négative*, lorsqu'on demande à la voiture de ralentir. Dans ce cas, une partie de l'énergie en trop est stockée dans la batterie. La ligne en créneaux du bas de la figure est un indicateur de mode électrique : chaque fois que la ligne est en haut, le véhicule avance sans faire appel au moteur thermique. Ce qui ne signifie pas nécessairement que la batterie débite : elle peut également ne rien faire ou se recharger, en cas de ralentissement. Sur 20 minutes de conduite (dépassant la figure présentée) le temps passé dans ces conditions a été de 34 %, sur une route globalement horizontale avec de légers reliefs. Il est donc faux de dire qu'une voiture hybride n'utilise le mode électrique qu'en ville : sur route également, dès que la demande de puissance est faible, le moteur thermique se coupe. Ici la vitesse moyenne sur 22 km était de 68 km/h, à cause de fréquentes traversées de villages ou hameaux.

Sur cette figure se trouve également une échelle d'énergie, sous la forme d'un rectangle de 250 Wh : puisque l'énergie est une puissance multipliée par un temps, *les énergies sont des surfaces sous les courbes de puissance* (limitées par la ligne de zéro). Ceci permet de

7. Pas tout à fait, puisqu'un moteur électrique n'a pas un rendement de 100 % ; mais il s'en approche.

voir très grossièrement que le travail total demandé pour faire avancer la voiture au cours de ces 10 minutes est de l'ordre du kilowatt-heure. Plus précisément, si on compte le travail total effectué par le moteur thermique et qu'on divise par le temps total, autrement dit qu'on calcule la puissance *moyenne* qu'il fournit, on arrive à 8,5 kW seulement, dont 0,4 kW qui sert à charger la batterie ! Rappelons que la puissance maximale du moteur thermique est de 53 kW sur cette automobile, donc même à mi-puissance où le rendement est le meilleur, il reste encore entre 25 et 30 kW. Autrement dit, c'est une puissance largement excessive *en moyenne* pour ce genre d'utilisation.



25 | Conduite sur route.

Terminons par une estimation de la consommation *de travail* de la voiture, c'est-à-dire d'énergie « ordonnée » utilisée pour la propulsion, par opposition à l'énergie totale contenue dans le carburant. La vitesse moyenne était de 68 km/h, et la puissance moyenne utile de 8,1 kW (en ne comptant pas le 0,4 kW ayant rechargé la batterie, qui servira ultérieurement). Diviser des kilowatts par des kilomètres par heure nous donne des kilowatt-heures par kilomètre :

$$\frac{8,1 \text{ kW}}{68 \text{ km/h}} \approx 0,120 \text{ kWh/km} = 120 \text{ Wh/km}$$

ou encore, puisque nous sommes habitués à exprimer les consommations sur cette distance, 12 kWh pour cent kilomètres. Un litre d'essence valant environ 9 kWh thermiques, et la voiture consommant sur ce type de parcours environ 4,5 litres aux cent, le rendement est donc d'environ $12/(4,5 \times 9) = 30 \%$.

L'autoroute

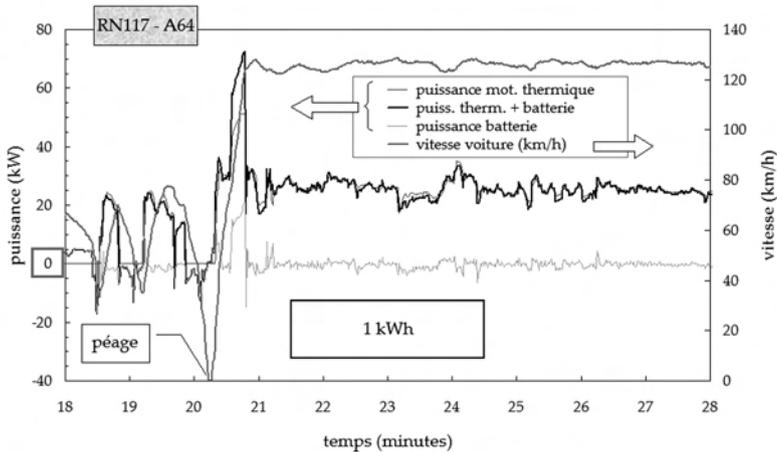
Ici la situation est très différente : en principe, on maintient une vitesse proche de 130 km/h entre deux péages avec toute voiture moderne. Ceci nécessite bien sûr davantage de puissance, mais pas tant que cela si l'aérodynamique est soignée, et que l'autoroute ne comporte pas de fortes montées. Comme on peut le voir sur la figure 26, qui montre la fln du trajet sur route et une portion de celui sur autoroute, ce qui coûte cher en puissance c'est d'accélérer après le péage (ce qui fut fait ici de façon volontairement marquée). Attention : l'échelle en kilowatts monte beaucoup plus haut que celle de la figure précédente ! Mais après l'accélération initiale la puissance nécessaire est inférieure à 30 kW, exactement 25,7 kW en moyenne ici, pour une portion d'autoroute globalement horizontale parcourue à une vitesse moyenne de 125,6 km/h. Empressons-nous de calculer la consommation de travail comme nous venons de le faire⁸ :

$$\frac{25,7 \text{ kW}}{125,6 \text{ km/h}} \approx 0,205 \text{ kWh/km} = 205 \text{ Wh/km}$$

ou encore, 20,5 kWh aux cent kilomètres. Rouler vite coûte nettement plus cher en énergie : l'augmentation est de 64 % par rapport au cas précédent, pour la même distance parcourue ! La consommation de carburant s'en ressent forcément, la voiture exigeant à cette vitesse jusqu'à 6,5 litres d'essence aux cent kilomètres. Cependant le rendement est légèrement meilleur, car le moteur travaille pratiquement dans sa zone optimale :

$$20,5/(6,5 \times 9) = 35 \%$$

8. Ici l'influence de la batterie est négligeable.



26 | Conduite sur autoroute (droite de la figure).

Sur une voiture traditionnelle, l'effet de l'augmentation de vitesse sur la consommation est davantage masqué par la forte dégradation du rendement à basse vitesse ; les écarts entre route et autoroute sont donc moindres. Mais sur un véhicule optimisé énergétiquement, capable de conserver un rendement correct en toutes circonstances, la vitesse se paie forcément... ou plutôt, la modération est récompensée.

Enfin, le mode électrique n'est sur ce type de parcours jamais utilisé⁹... sauf dans la phase de ralentissement qui précède la sortie.

La ville

On entend souvent dire qu'une voiture hybride roule grâce à l'électricité en ville et utilise son moteur thermique sur route : rien n'est plus faux. Nous avons déjà vu l'importance du mode électrique sur route ; nous allons voir maintenant l'importance du moteur thermique en ville ! La figure 27 représente avec les mêmes conventions que précédemment un peu plus de 10 minutes de conduite urbaine. On voit que la vitesse comme la puissance totale utilisée sont extrêmement variables, ce qui n'étonnera personne. Par rapport à la conduite sur

9. Ce qui ne signifie pas que les moteurs électriques sont inactifs (ils fonctionnent toujours car ils sont partie intégrante de la transmission), mais que le moteur thermique fournit de travail.

route, les passages à puissance négative (les ralentissements) sont également plus importants, ce qui est tout aussi logique. La voiture circule en mode électrique bien plus fréquemment (76 %), ce qui semble encore naturel vu les faibles vitesses pratiquées (moyenne de 32 km/h). *Mais il est totalement faux d'en déduire que l'énergie utilisée provient de la batterie* : elle vient bien, comme toujours, en moyenne exclusivement du travail du moteur thermique, qui fournit une puissance *moyenne* de seulement 4,1 kW. Dans cet exemple particulier la batterie s'est pourtant légèrement déchargée, fournissant une puissance additionnelle moyenne de 0,24 kW ; toutefois ce ne sont que des fluctuations et, si l'essai avait été poursuivi, on aurait vu le niveau de charge remonter. Tenons compte cependant de cette légère décharge pour calculer comme précédemment la consommation de travail de la voiture :

$$\frac{(4,1 + 0,24) \text{ kW}}{32 \text{ km/h}} = 0,135 \text{ kWh/km} = 13,5 \text{ kWh/100 km.}$$

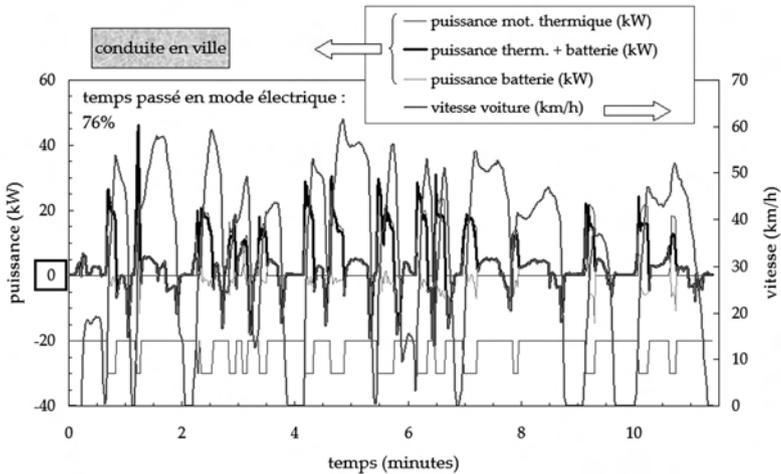
On remarque que cette valeur est à peine plus élevée que celle relevée sur route (12 kWh/100 km). Elle pourrait même, en toute logique, être inférieure, la vitesse moyenne étant moins importante donc la traînée aérodynamique plus faible ; mais les conversions d'énergie plus nombreuses entre les parties mécanique et électrique exigent néanmoins la production d'un travail « inutile » (puisqu'il sera *in fine* converti en chaleur), que nous avons néanmoins comptabilisé ici. Pour une consommation de 5 litres aux cent kilomètres dans ces conditions (ce qui est tout à fait réaliste voire pessimiste), on peut calculer le rendement du moteur thermique :

$$13,5 / (5 \times 9) = 30 \%$$

soit la même valeur que pour un trajet sur route.

Pour se convaincre visuellement que toute l'énergie est bien fournie par le moteur thermique et non par une décharge de la batterie, il suffit de représenter sur une même figure non pas les puissances, mais les *travaux*¹⁰ cumulés effectués par le moteur thermique et la batterie ; on

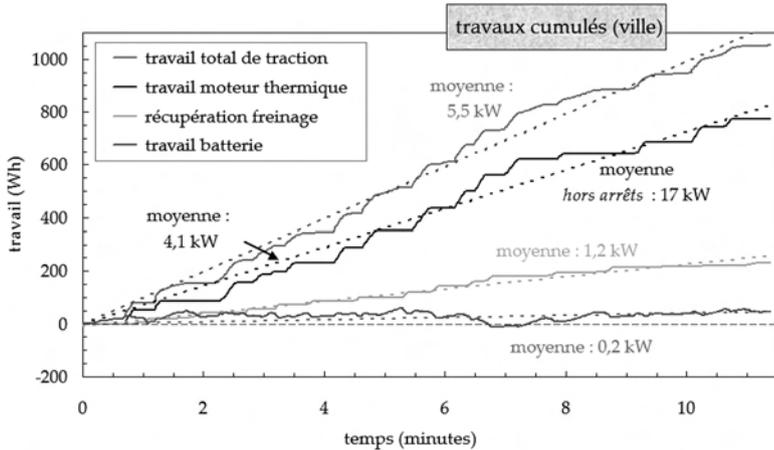
10. C'est-à-dire en langage scientifique, les intégrales des puissances par rapport au temps.



27 | Conduite en ville.

peut également comptabiliser l'énergie récupérée lors des freinages, et additionner le tout pour obtenir le travail total que demanderait la même voiture si elle n'utilisait que des freins à friction. On voit immédiatement sur la figure 28 que le moteur thermique travaille par à-coups : chaque palier dans la courbe montante correspond au mode électrique, où le moteur thermique est arrêté. Sa puissance *moyenne* est d'environ 4,1 kW seulement ici (c'est la pente de la ligne en tirets), mais *si on ne compte que le temps où il fonctionne, elle est de 17 kW*, ce qui lui permet de travailler dans de bien meilleures conditions. C'est une des raisons qui expliquent les consommations spectaculaires des hybrides en ville, l'autre étant la récupération d'énergie au freinage : même très imparfaite, elle fournit ici une puissance « gratuite » de l'ordre du kilowatt, ce qui n'est pas négligeable.

Pourtant, bien entendu, les transformations d'énergie mécanique en énergie électrique et inversement ne se font pas sans pertes (toujours l'entropie...), mais malgré cela le gain obtenu sur le rendement du moteur thermique est largement suffisant pour que le jeu en vaille la chandelle. Il n'est en rien nécessaire d'avoir une batterie de forte



28 | Travaux cumulés des différentes sources d'énergie.

capacité pour y parvenir : comme on le voit, le moteur thermique se coupe et se remet en route sans arrêt, et la batterie permet le fonctionnement purement électrique sur des temps allant de quelques secondes à la minute, exceptionnellement quelques minutes. Il est de toute façon nécessaire de faire fonctionner souvent le moteur thermique afin que le catalyseur qui assure sa dépollution ne refroidisse pas en dessous de sa température de fonctionnement.

CONSOMMATION

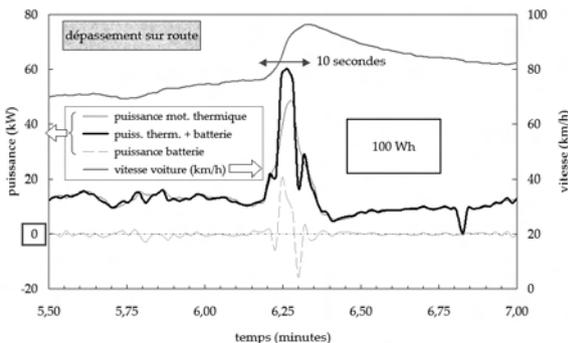
Même s'il est intellectuellement satisfaisant de penser que les ingénieurs ont fait tout leur possible pour que la voiture consomme moins, la question essentielle reste quand même bien sûr : est-ce que ça marche ? La réponse est oui, mais il est utile de la nuancer pour distinguer les différents cas d'utilisation (plus ou moins rationnels) d'une automobile.

Théoriquement, c'est en ville qu'une telle motorisation affiche la plus grande supériorité par rapport aux solutions conventionnelles. En pratique également : consommer autour de 5 litres aux cent kilomètres en milieu urbain est tout à fait normal, sans effort particulier, sur une

ANALYSE D'UN DÉPASSEMENT

Lors de la conduite à vitesse stabilisée, le moteur thermique délivre le plus souvent toute la puissance nécessaire à la propulsion. La partie électrique est en revanche d'une grande utilité dans les situations de demande brusque de puissance comme lors d'un dépassement, examiné « à la loupe » sur la figure ci-dessous. En effet, un moteur thermique ne peut développer sa pleine puissance qu'à haut régime, contrairement à un moteur électrique. L'analyse fine de ces courbes révèle que la batterie répond quasi-instantanément aux injonctions du conducteur, tandis que la puissance thermique arrive de façon plus progressive. La puissance électrique répond aux plus infimes hésitations du pied droit, visibles comme des « accidents » sur le pic de puissance central, et la batterie en profite même pour se recharger au cours de l'accélération si c'est possible (pics négatifs de la courbe « puissance batterie »). Au total, ce dépassement « pied au plancher » d'un semi-remorque sur route n'aura vidé la batterie que de 7 Wh, soit environ 1 % de sa capacité utile, car il aura été bref : $\text{énergie} = \text{puissance} \times \text{temps}$, ne l'oublions pas ! Comme dans le cas des perfectionnements de Watt, puissance et efficacité vont ici de pair. Si l'hybridation thermique-électrique a d'abord acquis sa réputation sur des voitures visant avant tout une grande sobriété énergétique, parions qu'elle démontrera ses avantages de façon plus spectaculaire encore sur des automobiles conçues pour la performance, dont l'existence est rythmée par des accélérations et freinages vigoureux.

Par ailleurs, la réactivité de la partie électrique permet également une meilleure dépollution du moteur thermique grâce au lissage de son fonctionnement, puisque ce sont les brusques transitoires de celui-ci qui posent souvent problème.



automobile hybride de gabarit moyen. Mais il ne faut pas confondre « conduite en ville » et « petits trajets d'un ou deux kilomètres effectués moteur froid, en hiver avec le chauffage à fond ». En effet, comme sur toute automobile, le moteur thermique d'une hybride a un mauvais rendement à froid, ce qui pénalise les premières minutes de fonctionnement. De plus, sur une architecture comme celle de la Prius où la propulsion purement électrique est possible, la logique de contrôle du moteur thermique est très particulière au démarrage afin de favoriser la dépollution... au prix d'une plus forte consommation. Rappelons-le en effet, faible consommation et faible pollution sont deux choses bien distinctes, qui dans ce cas précis sont contradictoires.

Pourquoi ? Le catalyseur permettant aux gaz d'échappement d'être correctement dépollués ne fonctionne qu'au-dessus d'une certaine température. Afin de l'atteindre plus rapidement, le moteur thermique d'une Prius est réglé au cours de la première minute de mise en route de façon à fonctionner de la façon la plus *inefficace* possible pour un moteur, c'est-à-dire en produisant un maximum de chaleur et un minimum de travail. La mise en température du catalyseur est ainsi obtenue en un temps record, de l'ordre de quelques dizaines de secondes. Concrètement, ceci est obtenu par une avance à l'allumage¹¹ négative, autrement dit le moteur présente un retard à l'allumage, tout à fait provisoire et volontaire ! Durant cette phase, la voiture avance uniquement grâce à la batterie en autorisant des courants de décharge plus importants que lors du mode électrique habituel, sauf si le conducteur écrase l'accélérateur, ce qui force alors le passage en mode hybride normal pour des raisons de sécurité. L'utilisation (parfaitement irrationnelle) d'une voiture même hybride par tranches de 5 minutes toutes les 2 heures ne se soldera donc par aucun record inférieur de consommation urbaine ; par contre un taxi qui roule la

11. Dans un moteur à essence ordinaire, l'étincelle qui enflamme le carburant est produite légèrement avant la fin de la compression afin de tenir compte du temps de propagation de la combustion, d'où le terme « avance à l'allumage ». Mon père, né en 1926, passa son permis de conduire sur une automobile où c'était encore au chauffeur de réaliser manuellement ce réglage par une manette spécifique.

journée durant en ville pourra aisément consommer 5 litres aux cent kilomètres dans une voiture de type Prius, là où des Diesel à boîte de vitesses automatique descendent difficilement sous les 9 litres.

LE RECORD DES RECORDS

En août 2005, quatre propriétaires américains de Prius décidèrent de se lancer un défi : parvenir à dépasser la barre (symbolique pour eux) des 100 *miles per gallon*, autrement dit descendre sous la barre des 2,35 litres d'essence aux cent kilomètres, en moyenne sur un plein. Le refroidissement du moteur étant un des facteurs les plus négatifs en matière de consommation, ils entreprirent de vider le réservoir d'une traite, en se relayant toutes les 4 heures. Auparavant, ils avaient mûrement choisi le parcours, non pas sur circuit mais sur route ouverte, avec quelques côtes et descentes : un aller-retour sur un parcours de 37 km comportant 12 feux de circulation. Leur voiture (appartenant à l'un d'entre eux) était strictement de série, mais comportait néanmoins deux modifications qui peuvent s'apparenter à une forme de tricherie : l'huile du moteur était de viscosité 0W20 contre 5W30 préconisée par le constructeur (ce qui ne portait pas à conséquence vu la conduite pratiquée), et surtout les pneus étaient gonflés à 4,1 bar, bien au-delà de la limite autorisée, dans le but de réduire au maximum la résistance au roulement. L'essai eut lieu près de Pittsburgh en Pennsylvanie.

Résultat de l'expérience : deux jours et 2248 km plus tard, parcourus à une vitesse moyenne d'environ 50 km/h, la consommation de la voiture s'élevait à 109,3 miles per gallon, soit 2,15 litres aux cent kilomètres. Le moteur thermique avait fonctionné environ 1/3 du temps. Totalement infaisable en conduite de tous les jours, mais instructif. Le récit de leur aventure peut se consulter (en américain) ici :

<http://www.priuschat.com/forums/1-vt10705.html>

La consommation dépend aussi naturellement du type de parcours effectué, et on a vu que l'autoroute parcourue à la vitesse maximale constitue, après les très courts trajets moteur froid, le deuxième motif de déception pour les conducteurs d'hybrides qui voudraient croire aux miracles plus qu'à la réalité de la physique. Mais il importe aussi, pour obtenir les meilleurs résultats, de ne surtout pas appliquer les recettes d'économie valables sur les voitures traditionnelles ! La légère déception causée par mes premiers relevés de

consommation s'explique par ma conduite d'alors, « avec un œuf sous le pied », qui est totalement contre-productive dans le cas de la Prius. Il ne s'agit pas non plus de conduire comme un forcené pour réaliser les meilleurs résultats, mais la seule règle à suivre est de faire tourner le moteur thermique à son meilleur rendement, donc à des régimes moyens, et *surtout pas* de « privilégier le mode électrique » comme on a pu le lire dans de nombreux articles de la presse automobile, par ailleurs riches en relevés de consommation délirants. En effet, l'énergie électrique vient de toute façon de la combustion de l'essence dans une telle voiture, et son stockage-déstockage occasionne forcément des pertes. Insistons sur ce point : même hybride, une Prius tire *toute* son énergie de l'essence, puisqu'elle n'est pas rechargeable sur une prise extérieure.

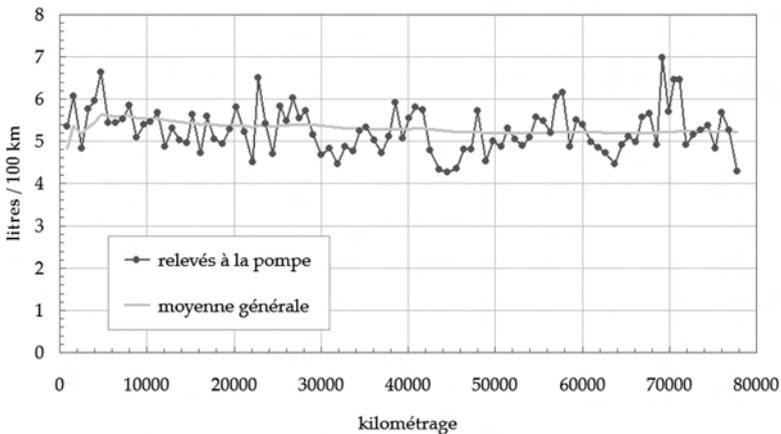
Anecdotiquement, de nombreux couples possèdent aujourd'hui des Prius, souvent choisie par Monsieur, technophile éclairé tendance écolo, et adoptée également par Madame, pas nécessairement passionnée par la technique¹², mais appréciant sa facilité d'utilisation au quotidien. Alors que Monsieur a longuement mûri les stratégies de conduite qui lui permettront de parler fièrement de ses records de consommation avec ses collègues de travail, c'est souvent Madame, totalement indifférente à ce genre de compétition, qui réalise les records. Les hommes doivent encore avoir du mal à se débarrasser de leur agressivité automobile, fût-elle sublimée par la volonté d'être le premier à consommer moins plutôt que le premier à arriver.

Même si la voiture qui m'a servi à faire ces mesures n'est aujourd'hui plus fabriquée, remplacée par un modèle plus performant et plus économe, il est intéressant d'observer ses consommations (calculées d'après les volumes pris à la pompe et l'indication du compteur kilométrique) sur presque cinq ans. La figure 29 en montre le relevé ; la valeur moyenne obtenue au bout de 78 000 km est égale à 5,2 litres

12. Entendons-nous bien : les femmes sont tout autant capables que les hommes de comprendre la technique ! Il s'agit là seulement d'un clin d'oeil, basé néanmoins sur l'observation d'une moins grande importance accordée à l'automobile et à ses symboles par la population féminine.

aux cent kilomètres, pour une consommation annoncée selon le cycle mixte européen de 5,1 litres.

Les trajets effectués comprenaient peu d'autoroute, et de la circulation urbaine ou routière en proportion variables suivant les périodes de l'année. Les points du graphique, correspondant chacun à un plein, varient entre des extrêmes de 4,3 litres et 7,0 litres aux cent kilomètres. La première valeur a été obtenue en conduite exclusivement routière, par temps doux, sans chauffage ni climatisation ; elle est difficilement améliorable à moins de rouler toujours en descente ou avec le vent dans le dos. La seconde, réalisée intentionnellement au cours de l'hiver 2005–2006 dans une période très froide, avec presque exclusivement de courts trajets à froid et une utilisation fréquente de la climatisation pour le désembuage, doit être considérée comme le maximum absolu de ce qu'il est possible de consommer sur un plein.



29 | Relevés de consommation d'une Prius d'ancienne génération (NHW11).

Au-delà, c'est soit que l'utilisation faite de la voiture est absurde (de simples chaussures suffissent amplement pour parcourir un ou deux kilomètres), soit que les pneus sont dégonflés, soit que le frein de stationnement est resté serré ! Il est bien sûr possible de faire pire ponctuellement : ainsi l'ascension du mont Ventoux à bonne allure

depuis Malaucène se fait à raison de 12 litres aux cent kilomètres ; mais en ne brûlant strictement rien à la descente, on obtient une moyenne de 6 litres, dans une situation peu favorable (dénivelée de 1 600 m) où les variations d'énergie potentielle dépassent de beaucoup les possibilités de stockage de la batterie. Les 6 à 7 litres aux cent kilomètres en conditions routières normales, annoncés par certaines revues automobiles à l'issue d'essais de Prius¹³, traduisent indubitablement une conduite pathologique nécessitant traitement.

On peut constater également une variation de consommation entre l'été et l'hiver, la voiture étant plus économe lorsqu'il fait chaud. Même avec la climatisation : lors de la canicule de 2003, alors que notre ministre de l'Environnement nous conseillait de garer nos voitures à l'ombre et de faire des courants d'air plutôt que d'utiliser la « clim », je traversais au plus chaud de la journée les régions accablées de Soleil du Sud-Est de la France, vitres fermées, climatisation réglée sur 28 °C, pour une consommation n'excédant pas les 5,5 litres aux cent kilomètres. L'influence de la température externe n'est pas propre aux hybrides, le temps de chauffage du moteur thermique étant plus long en hiver sur toute automobile ; mais le phénomène est accentué dans leur cas pour deux raisons. Tout d'abord, les performances de la batterie (sa puissance, précisément) sont nettement moins bonnes à basse température ; et même si celle-ci est ventilée par l'air de l'habitacle qui bénéficie du chauffage, son inertie thermique est grande. Il faut donc de nombreux kilomètres avant que la batterie n'atteigne une température « confortable ». Ensuite, le moteur thermique étant la seule source de chaleur, en hiver il se met parfois en route pour le seul confort thermique des passagers. C'est d'ailleurs l'objet d'un de mes gags favoris : si je conduis quelqu'un en hiver, moteur thermique tournant au feu rouge pour cause de chauffage, j'explique parfois que le petit bruit qu'on entend n'est que celui du chauffage ; comme

13. Le lecteur pourra penser à juste titre que le nom *Prius* est cité trop souvent, ce qui pourrait s'apparenter à de la publicité. Je le déplore comme lui, et attends avec impatience de pouvoir citer d'autres exemples de voitures hybrides comparables afin de rétablir l'équilibre.

généralement on me répond « mais bien sûr... » avec un sourire en coin je tourne alors la manette de température sur 16 °C et le moteur s'arrête net. Effet garanti... et redoublé quand, une fois la manette remise dans sa position initiale, il redémarre.

15

Quelles pollutions ?

NORMES ANTIPOLLUTION

Si chaque automobiliste peut facilement connaître la consommation de sa voiture (bien qu'il la mesure en litres, qui n'est pas une unité d'énergie !), il n'en est pas de même de la pollution qu'elle génère : contrairement à une opinion largement répandue et propagée par les constructeurs qui y ont intérêt, la pollution n'est en aucun cas proportionnelle à la consommation. La seule chose qui le soit (mais avec un facteur de proportionnalité dépendant du carburant), c'est l'émission de dioxyde de carbone, le fameux CO₂, un des principaux gaz à effet de serre dont il convient donc de limiter l'émission *lorsqu'il est d'origine fossile*, car il contribue alors au réchauffement climatique. En revanche, relâcher dans l'atmosphère le dioxyde de carbone absorbé au cours de sa croissance par une plante ne présente aucun inconvénient, le bilan étant alors neutre et ce gaz n'étant pas toxique : heureusement, car nous aussi en émettons en respirant !

L'automobiliste peut donc seulement pour estimer sa pollution lire des normes, ou dans le meilleur des cas demander les quantités précises

de polluants émis par son véhicule pour les comparer à d'autres, valeurs assez difficiles à trouver en France en 2006 car ni les constructeurs ni l'Ademe ne les rendent accessibles au public¹. Les normes anti-pollution (qui ne concernent donc pas le CO₂) visent à limiter l'émission dans l'air de substances jugées indésirables car présentant des dangers pour la santé humaine ou pour l'environnement. Ces substances sont très nombreuses et les contrôler toutes constitue une tâche quasi-impossible ; aussi la législation européenne a-t-elle décidé de réglementer celles jugées les plus importantes, à savoir :

- Le monoxyde de carbone (CO), gaz toxique car il vient se fixer sur l'hémoglobine du sang et l'empêche de transporter l'oxygène ; c'est lui qui est responsable des décès par asphyxie dans certains logements insalubres équipés de chauffages défectueux. Autrefois point faible des moteurs à essence, il ne pose aujourd'hui plus de vrai problème grâce à l'emploi des catalyseurs d'oxydation à l'échappement ; les moteurs Diesel en rejettent cependant souvent encore moins que les moteurs à essence en raison de la combustion en excès d'air qui s'y produit. La norme Euro 4 applicable en 2006 limite les rejets de CO à 1 g/km pour les moteurs à essence et 0,5 g/km pour les moteurs Diesel. À l'air libre, le monoxyde de carbone finit par s'oxyder en dioxyde de carbone, 1 g de CO produisant 1,57 g de CO₂.
- Les hydrocarbures imbrûlés (notés HC), qui comme leur nom l'indique résultent de la combustion incomplète du carburant ; parmi eux les hydrocarbures aromatiques², éventuellement polycycliques (HAP), sont particulièrement nocifs en raison de leur effet cancérigène. L'essence contient en 2006 jusqu'à 1 % de benzène, mais les moteurs Diesel émettent à l'échappement beaucoup plus d'hydrocarbures aromatiques polycycliques que les moteurs à essence.

1. Les valeurs citées par la suite sont tirées de la base de données de ce site anglais : <http://www.vcacarfueldata.org.uk>

2. De la famille du benzène, c'est-à-dire contenant un « cycle aromatique », structure chimique en anneau symétrique formée de 6 atomes de carbone.

- Les oxydes d'azote (symbolisés par NO_x) comprennent le monoxyde (NO) et le dioxyde (NO_2) d'azote ; le premier n'est pas stable très longtemps dans l'air et s'oxyde assez rapidement en dioxyde d'azote. C'est hélas ce dernier qui est le plus irritant, principalement pour les yeux et les voies respiratoires, et qui gêne particulièrement les personnes asthmatiques et les enfants. Il induit également une plus grande sensibilité des bronches aux infections microbiennes. La formation des oxydes d'azote est liée aux températures élevées des réactions de combustion ; les moteurs Diesel actuels en produisent beaucoup plus que les moteurs à essence, car ils ne disposent pas encore d'une technologie permettant de les réduire efficacement. Les oxydes d'azote sont également, par des réactions chimiques complexes où interviennent aussi les hydrocarbures, des responsables de la formation d'ozone à basse altitude, autre polluant dont nous entendons régulièrement parler chaque été dans les grandes villes.
- Les particules solides (notées PM) sont principalement émises par les moteurs Diesel dont elles constituent les caractéristiques fumées noires visibles à l'accélération ; la future norme Euro 5 imposera également une limite aux moteurs à essence à injection directe, en raison de leur tendance à émettre davantage de particules que les moteurs à injection indirecte qui constituent aujourd'hui la très grande majorité des moteurs à essence. Pénétrant profondément dans les poumons, les particules sont responsables d'effets négatifs sur la santé aussi bien à court terme (maladies respiratoires, allergies) qu'à long terme (cancers, maladies cardio-vasculaires) selon les études les plus récentes³. La composition chimique de ces particules en est notamment responsable, les hydrocarbures aromatiques polycycliques pouvant par exemple trouver le moyen de séjourner durablement dans l'organisme en étant véhiculés par elles.

3. http://www.afsse.fr/documents/impact_sanitaire_particules_diesel.pdf

Il est intéressant de représenter graphiquement l'évolution des normes antipollution européennes afin de mesurer le chemin parcouru depuis leur première mouture, appelée Euro 1, apparue en 1992 avec l'obligation d'équiper les voitures à essence d'un catalyseur. En toute rigueur, il est toutefois difficile de les comparer d'une année sur l'autre car les procédures de test ont évolué dans le temps. De plus, la définition des limites pour essence et Diesel est parfois différente : ainsi actuellement, il n'y a pas de limite pour les HC concernant le Diesel, mais des limites pour la somme (HC + NO_x) d'une part, et pour les NO_x d'autre part. Inversement, il existe pour l'essence des limites pour les HC et pour les NO_x mais pas pour leur somme ; on peut certes la calculer à partir des limites individuelles mais ce n'est pas équivalent à une limite imposée sur la somme : en effet 0,1 g/km de HC plus 0,08 g/km de NO_x (norme Euro 4 actuelle) font 0,18 g/km de (HC + NO_x) au maximum... mais n'autorisent pas, par exemple, 0,13 g/km de HC et 0,05 g/km de NO_x !

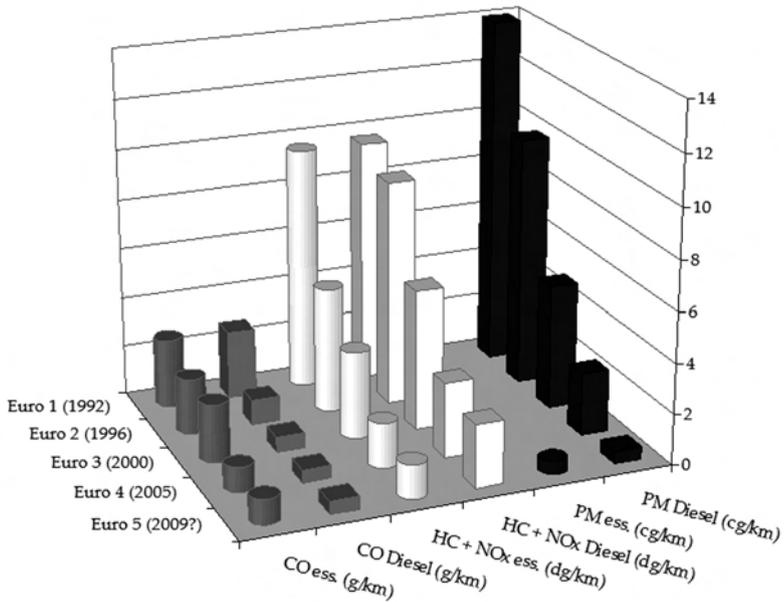
Nous avons toutefois choisi de procéder de cette façon sur les graphiques afin de rendre plus facilement comparables les deux carburants les plus répandus, mais il faut garder à l'esprit que cette manipulation de chiffres fait apparaître les normes pour les moteurs à essence moins strictes qu'elles ne sont. En revanche, *pour un véhicule particulier dont on connaît les émissions*, ce calcul est valide et permet de comparer essence et Diesel polluant par polluant.

Voici tout de même les données « officielles » pour l'ensemble des normes Euro, en milligrammes par kilomètre et avec une incertitude sur les chiffres de la dernière ligne, la norme n'étant pas encore adoptée.

	HC		NO _x		HC + NO _x		CO		PM	
	Diesel	essence	Diesel	essence	Diesel	essence	Diesel	essence	Diesel	essence
Euro 1 (1992)					970	970	2720	2720	140	
Euro 2 (1996)					900	500	1000	2200	100	
Euro 3 (2000)		200	500	150	560		640	2300	50	
Euro 4 (2005)		100	250	80	300		500	1000	25	
Euro 5 (2009 ?)		75	200	60	250		500	1000	5	5

Valeurs limites des différents polluants pour les normes Euro successives.

La figure 30 représente graphiquement ces différentes valeurs. Afin de rendre le graphique lisible, les unités ne sont pas les mêmes pour tous les polluants : il s'agit soit de grammes, soit de décigrammes, soit de centigrammes par kilomètre. On remarquera l'absence de norme pour les rejets de particules concernant les véhicules à essence jusqu'à Euro 4, en raison de leurs émissions négligeables en ce domaine ; la valeur qui apparaît pour Euro 5 ne concerne que les moteurs à injection directe.



30 | Représentation graphique des différentes normes Euro.

La figure 31 montre les valeurs d'émissions *mesurées* des différents polluants⁴ pour les deux générations connues en France de Prius, ainsi que pour quelques concurrentes (en termes d'habitabilité et de performances) de la version actuelle, fonctionnant à l'essence ou au gazole. Toutes répondent aux normes Euro 4 et sont équipées, pour les versions

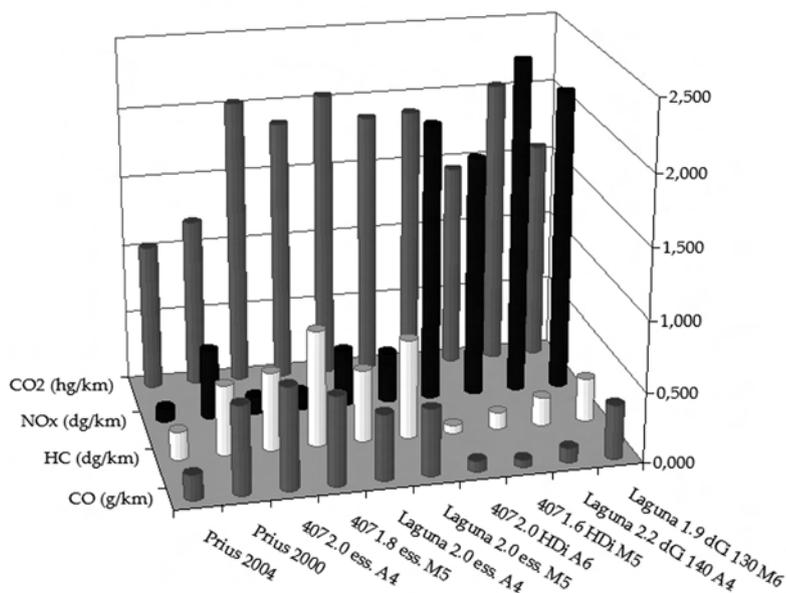
4. <http://www.vccarfueldata.org.uk>

Diesel, de filtres à particules ; les émissions correspondantes n'ont pas été reportées sur le graphique. On a par contre rajouté la quantité de dioxyde de carbone émise (en hectogrammes au kilomètre), qui provenant de combustibles fossiles contribue au réchauffement climatique, même s'il n'est pas toxique. La transmission des Prius ou d'hybrides de même architecture étant par nature automatique, la logique voudrait de la comparer uniquement à des automobiles équipées de boîtes de vitesses automatiques ; néanmoins celles-ci sont généralement un peu plus énergivores que les boîtes manuelles et dégradent quelque peu les capacités d'accélération. Les deux types de transmission ont donc été retenus pour les concurrentes, avec généralement un moteur un peu plus puissant pour les automatiques, afin de garder le même niveau de performances : ainsi une Peugeot 407 à boîte 5 vitesses manuelle (en abrégé M5) et moteur à essence de 1,8 litre de cylindrée accélère de 0 à 100 km/h en 10,3 secondes, contre 10,5 secondes pour la même voiture équipée d'une boîte automatique à 4 rapports (en abrégé A4)... mais également munie d'un moteur de 2 litres plus puissant. Une Prius actuelle réalise la même accélération en 10,9 secondes.

Il apparaît clairement sur cette figure qu'une architecture hybride essence/électricité permet actuellement de limiter très nettement à la fois les polluants et l'émission de dioxyde de carbone ; on notera aussi le gros handicap des Diesel en matière d'oxydes d'azote, les concurrentes retenues en rejetant entre 17 et 24 fois plus qu'une Prius vendue en 2006. Toutefois la version précédente était moins bien dépolluée sur ce plan que des voitures à essence classiques ; il s'agit d'un problème lié aux arrêts et démarrages fréquents du moteur thermique, résolu depuis.

EFFETS SECONDAIRES

Il est encore rare en 2006 de rencontrer un conducteur ou une conductrice de voiture hybride en France, même si maintenant il ou elle peut enfin faire son *coming out* sans craindre pour sa réputation.



31 | Émissions de quelques automobiles comparées à celles de la voiture hybride Toyota Prius.

Cette marginalité est beaucoup moins prononcée aux États-Unis, et bien sûr également au Japon. Bien qu'il y ait probablement des profils d'automobilistes « hybrides » aussi divers que ceux des automobilistes tout court, il semble que tous s'accordent, à travers leurs remarques échangées en vrai ou sur des forums de discussion, sur un point : la conduite d'une voiture hybride tend à pacifier l'automobiliste. Une partie de ce miracle tient sans doute à la transmission automatique, elle aussi encore peu répandue en France, mais ce n'est pas le seul facteur : le freinage si particulier de ces voitures incite naturellement à l'anticipation⁵, et le calme absolu qui règne à bord à très faible vitesse ou aux arrêts, en particulier en ville, est profondément reposant. La voiture qui attend sur la file d'attente au feu rouge, moteur tournant,

5. Non parce qu'elles freinent mal (à freinage hydraulique égal, le freinage électrique vient au contraire renforcer la puissance et l'endurance), mais parce que récupérer le maximum d'énergie devient un jeu, et que le freinage électrique est d'une extrême douceur. Certains apprécient également le très léger « chant » de l'électronique de puissance qu'il provoque.

paraît d'un coup complètement archaïque et incongrue, à plus forte raison s'il s'agit d'un Diesel dont le ralenti est nécessairement plus sonore et vibrant.

Par ailleurs, les lois de la physique étant incontournables, une voiture dont le rendement énergétique a été optimisé verra nécessairement sa consommation varier davantage avec la vitesse que celle qui, à faible allure, n'a qu'un rendement minable. Certains en tirent des arguments contre la motorisation hybride, en prétendant qu'elle fait consommer beaucoup sur autoroute ; c'est faux, par exemple une Prius actuelle consomme moins de 6,5 litres d'essence aux cent kilomètres à une vitesse réelle de 130 km/h⁶. Mais il est vrai que la même voiture consomme nettement moins sur route ou en ville (descendre sous les 5 litres est commun), ce qui du coup fait paraître la valeur autoroutière excessive ! En conséquence, l'automobiliste qui se préoccupe de sa consommation tendra naturellement à préférer des vitesses modérées, ce qui est tout bénéfique pour les économies d'énergie et la sécurité routière.

Enfin, la quiétude incomparable que procure le mode électrique, utilisable seulement à faible puissance, invite naturellement à respecter les limitations de vitesse urbaines et à éviter la conduite brusque (une accélération vive déclenchant la mise en route du moteur thermique). Là encore, l'intérêt énergétique rejoint la sécurité, sans parler de la paix apportée aux riverains. Et on peut encore ajouter que l'extrême douceur des manœuvres en mode électrique fait de l'automobiliste hybride un amoureux des créneaux bien faits.

6. Il est bien sûr toujours possible de consommer plus *ponctuellement* (montée, vent de face ou de travers, déménagement d'armoire normande...) mais ce n'est plus vraiment du jeu !

PARTIE 5

PROSPECTIVE

16

Les progrès asymptotiques des moteurs thermiques

Avec aujourd'hui près de 800 millions de voitures à la surface de la planète, et surtout très inégalement réparties, inutile de se voiler la face : il est impensable d'envisager le futur de l'automobile comme une simple prolongation de son passé. Il y a vingt ans, moitié moins d'entre elles circulaient¹, et tout le monde ou presque faisait comme si la fin du pétrole n'était qu'un scénario pour roman catastrophe. Il y a aujourd'hui une voiture pour 2 habitants en France, et malgré l'explosion récente de leur nombre, seulement une pour 42 en Chine... où l'on en prévoit une pour 25 en 2010². Or il y a vingt fois plus de Chinois que de Français, et presque autant d'Indiens, qui pour une large part aspirent à un mode de vie semblable au nôtre.

On peut toujours leur dire que la voiture c'est mauvais pour la santé, que cela tue des innocents aussi bien de façon violente par

1. *Définition et implications du concept de voiture propre*, rapport de Christian Cabal et Claude Gatignol, consultable sur : <http://www.senat.fr/rap/r05-125/r05-1253.html>

2. *Chinanews*, 24 mai 2006 (<http://www.chinanews.cn>).

accident, qu'à petit feu par la pollution subie par tout le monde, ou le manque d'exercice physique que son usage entraîne chez certains. Mais il est peu probable que notre voix soit entendue, surtout avec « l'exemple » que nous leur montrons. Le désir de mobilité individuelle est universellement partagé, et fait partie de la soif de liberté qui pousse tout être humain à élargir son horizon, qu'il soit géographique ou intellectuel. Les militants écologistes de pays déjà (sur)motorisés ont beau dénoncer, avec raison, l'absurdité du tout-automobile dans de grandes agglomérations où l'art d'éviter les bouchons fait partie des règles de base de la survie, ce sont des problèmes de riches pour ceux qui n'ont connu, au mieux, que le vélo.

La population automobile augmentera donc forcément au niveau mondial, au moment où la ressource énergétique qui conditionne sa survie s'amenuise, et cela sans même parler des problèmes environnementaux. Autrement dit, plus le mur se rapproche, plus vite on fonce dedans. L'essence à 1,50 € le litre ? Profitez-en, ça ne va pas durer. Si elle veut encore vendre ses produits, l'industrie automobile doit s'adapter, et pas à l'échelle de la nuance : c'est la notion même d'automobile qui va se trouver transformée. Ce ne sont pas la « clim' », le GPS, le lecteur DVD ou le pare-buffles à un euro qui décideront l'acheteur dans un futur proche, mais des améliorations décisives en matière de consommation et de pollution. À défaut d'autre solution économiquement viable dans un futur proche, le moteur thermique va subir encore d'ultimes perfectionnements pour augmenter son efficacité ; mais ce n'est que le sommet de l'iceberg.

Faisons comme si rien ne pressait. Examinons calmement comment on peut encore augmenter de quelques pour cent le rendement énergétique de moteurs à combustion interne qui, quoi qu'on en dise, n'est pas si catastrophique que cela : plus de 35 % pour certains moteurs à essence et même plus de 40 % pour les meilleurs qui s'abreuvent au gazole, il n'y a pas de quoi rougir, surtout quand la chaleur « perdue » ne l'est pas vraiment, en hiver pour ceux qui

ne conduisent pas avec des mouffles³. C'est la *mauvaise utilisation* du moteur dans des zones de fonctionnement où il est inefficace qui pose surtout problème, mais on sait désormais que l'hybridation y remédie en grande partie.

La population automobile comporte aujourd'hui essentiellement deux tribus : celles des voitures « à essence » et celles des voitures « Diesel ». Pour être précis dans les termes, règle de base du travail scientifique, nous n'appellerons pas « moteurs à essence » des moteurs qui fonctionnent également à l'alcool (ou au GPL⁴), et garderons la dénomination historique de « moteurs à cycle Otto », ou plus simplement « moteurs Otto ». On parle aussi pour eux de moteurs « à allumage commandé », à cause de la nécessité d'enflammer le mélange de façon contrôlée par le biais de l'étincelle d'une bougie. Pour les moteurs Diesel en revanche, c'est bien le nom de l'inventeur qu'on a gardé dans le langage courant ; on les appellera donc comme tout le monde.

Il est aujourd'hui communément admis que les moteurs Diesel ont un rendement supérieur à celui des moteurs Otto ; si cette affirmation comporte une large part de vérité, elle mérite d'être détaillée et nous allons commencer par essayer de comprendre pourquoi, en remontant aux définitions mêmes des cycles d'Otto et de Diesel.

OTTO ET DIESEL, CANAL HISTORIQUE

La notion de *cycle* pour un moteur thermique vient du fait que celui-ci répète sans arrêt les mêmes opérations dans le même ordre : pour un moteur à quatre temps, elles sont successivement l'admission, la compression, la détente après inflammation et l'échappement. Diesel ou Otto, rien ne change de ce point de vue⁵ ; il faut donc raffiner la description pour savoir ce qui distingue les deux types de moteur. Pour cela, les thermodynamiciens ont l'habitude d'utiliser

3. Merci à mon collègue chimiste Clovis Darrigan pour cette pertinente observation qui m'avait échappé. Il faut croire que plus une science est « dure », plus le scientifique est inhumain.

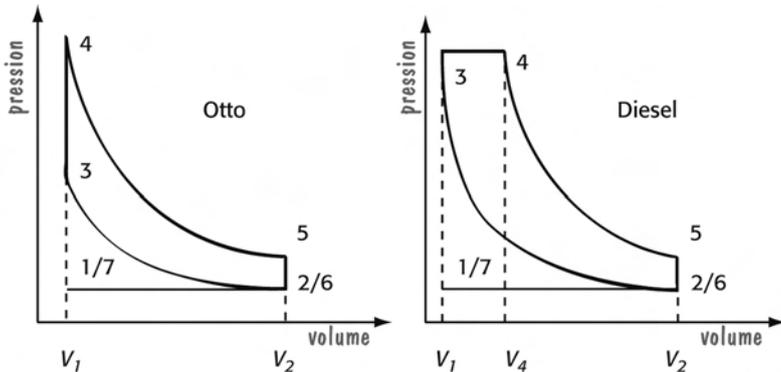
4. Gaz de pétrole liquéfié, mélange de propane et de butane comme dans les briquets.

5. Il existe également des moteurs à 2 temps, Otto ou Diesel ; on se limite aux cycles à 4 temps.

une représentation graphique du cycle où sont portés sur deux axes le volume de gaz emprisonné (qui varie entre un minimum et un maximum suivant la position du piston) ainsi que sa pression (qui varie en fonction du mouvement du piston et aussi, bien sûr, de la chaleur dégagée par la combustion). Grâce à cette représentation, on peut différencier clairement le cycle Otto et le cycle Diesel, au moins dans leur version idéalisée et « historique ».

Définitions de principe

La combustion du carburant dans un moteur Otto est censée se produire très rapidement, ou même, de façon idéalisée, instantanément. Autrement dit, l'augmentation de pression due à la combustion se fait à une position bien particulière du piston, qu'on appelle point mort haut, et qui correspond à l'instant où le piston a terminé la compression et s'apprête à rebrousser chemin pour accomplir la phase de détente. Inversement, dans un moteur Diesel orthodoxe, la combustion est lente et progressive, commençant à partir du point mort haut mais se poursuivant sur une bonne part de la phase de retour du piston. Dans un modèle idéalisé, cette phase du cycle se déroule à pression constante dans le cylindre. Ceci nous conduit à deux « portraits » très différents pour le cycle Otto et le cycle Diesel (voir la figure 32).



32 | Comparaison schématique des cycles Otto et Diesel idéalisés.

Sur ces schémas, des points particuliers du cycle sont numérotés de 1 à 7, les points 1 et 7 étant confondus, ainsi que les points 2 et 6 ; les portions horizontales du bas sont en effet parcourues dans les deux sens ($1 \rightarrow 2$ et $6 \rightarrow 7$). Les points sont atteints successivement dans l'ordre au cours des quatre temps du cycle, de la façon décrite ci-dessous.

Cycle Otto

- De 1 à 2, le volume de gaz contenu dans le cylindre augmente, la pression restant constante et égale à la pression ambiante : c'est la phase d'*admission* (premier temps), où le mélange air-carburant est aspiré par le mouvement du piston.
- De 2 à 3, les soupapes sont fermées et le mélange est comprimé par le retour du piston : c'est la phase de *compression* ou deuxième temps, qui augmente également la température du gaz et qui dans l'idéal devrait se produire sans que de la chaleur ne s'échappe à travers les parois du cylindre (en langage technique on parle de compression *adiabatique*).
- De 3 à 4, la combustion supposée instantanée du carburant, déclenchée en 3 par l'étincelle de la bougie, provoque une brusque augmentation de pression : ce n'est pas un temps du cycle puisque cela se produit (selon ce modèle simplifié) instantanément.
- De 4 à 5, la pression élevée régnant dans le cylindre repousse celui-ci violemment jusqu'à sa position extrême : c'est la phase de *détente* ou troisième temps du cycle, et c'est elle qui produit du travail. On suppose également qu'aucun transfert de chaleur n'a lieu avec l'extérieur, et les soupapes sont toujours fermées depuis le point 3.
- De 5 à 6, l'ouverture des soupapes d'échappement provoque une brusque diminution de pression (idéalement, instantanée) et l'évacuation d'une bonne partie des gaz d'échappement.
- Finalement de 6 à 7, le mouvement du piston finit d'expulser les gaz brûlés restants à la pression ambiante : c'est la phase d'*échappement*, et le cycle peut recommencer.

Cycle Diesel

- De 1 à 2, c'est presque pareil : il s'agit toujours du premier temps ou *admission*, mais on aspire de l'air au lieu d'un mélange air-carburant.
- De 2 à 3, c'est aussi le deuxième temps ou phase de *compression*, supposée adiabatique comme dans le cycle Otto, mais arrivé à 3 on introduit le carburant qui s'enflamme spontanément grâce à la température atteinte en fin de compression, celle-ci étant plus élevée que pour le cycle Otto en raison de la compression plus forte⁶.
- De 3 à 4, la combustion progressive du carburant maintient une pression constante pendant le début de la phase de *détente*.
- De 4 à 5, après combustion la détente se poursuit, en conditions supposées adiabatiques, jusqu'à l'ouverture des soupapes d'échappement en 5.
- De 5 à 6, l'ouverture des soupapes d'échappement produit une baisse brutale de pression comme dans le cycle Otto.
- Et enfin de 6 à 7, le reste des gaz brûlés est expulsé de la même manière, pendant la phase d'*échappement* ; le cycle peut alors recommencer.

Si l'on s'en tient à ces cycles très académiques, il est facile (pour qui a quelques notions de thermodynamique) de déterminer le rendement des moteurs en fonction des caractéristiques géométriques très simples qui apparaissent sur les graphes : les volumes V_1 et V_2 pour le moteur Otto, auquel se rajoute le volume V_3 pour le moteur Diesel. Les deux premiers sont déterminés strictement par la construction mécanique du moteur, puisqu'ils correspondent aux volumes de gaz emprisonnés quand le piston est respectivement en bout de compression et en bout de détente. Le volume V_3 n'est pas une caractéristique géométrique du moteur, mais dépend de la quantité de carburant injectée par cycle, qui détermine le temps de combustion donc le déplacement du piston correspondant.

6. Le rapport des volumes V_2/V_1 , ou taux de compression, est plus élevé.

On obtient ainsi des résultats, certes aussi discutables en valeur absolue que les hypothèses de départ, mais néanmoins utiles pour comprendre quels sont les paramètres essentiels agissant sur le rendement d'un moteur. Ceux-ci dépendent uniquement du rapport V_1/V_2 , qu'on a déjà rencontré et qui s'appelle le taux de compression (on le notera τ), et du rapport V_4/V_3 (ou V_4/V_1 , puisque $V_3 = V_1$!) propre au moteur Diesel, qu'on notera C . On l'a déjà vu en abordant le cas du cycle Miller utilisé par la Prius, le rendement théorique du cycle Otto s'exprime très simplement par la recette :

$$\eta_{\text{Otto}} = 1 - \tau^{1-\gamma}$$

où le coefficient γ , qui serait égal à 1,4 s'il n'y avait d'importantes variations de température au cours du cycle, est dans la réalité un peu inférieur à cette valeur, entre 1,2 et 1,3. Rappelons-nous : comme le taux de compression est le seul paramètre susceptible de faire varier ce rendement, et qu'il est affublé d'un exposant négatif, tout ce que nous pouvons faire pour améliorer le rendement est d'augmenter le taux de compression (puisque ici il est égal au taux de détente, contrairement au cas du cycle Miller). Pour le cycle Diesel cela se complique un peu cependant, puisqu'on aboutit à une expression au graphisme mathématique déjà intéressant :

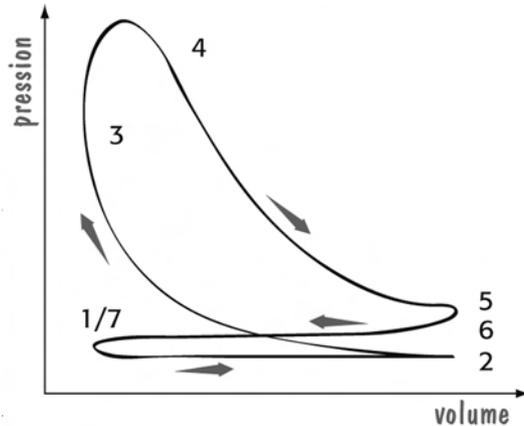
$$\eta_{\text{Diesel}} = 1 - \tau^{1-\gamma} [(C-1)/\gamma(C-1)].$$

Tout ceci paraît fort complexe ! Mais à y regarder de plus près, on observe que les deux formules se ressemblent, la deuxième ayant gagné un terme entre crochets supplémentaire, qui est toujours supérieur à 1. Autrement dit, à *taux de compression égal*, le rendement du moteur Diesel est *inférieur* à celui du moteur Otto. Mais le taux de compression est limité par l'auto-inflammation du carburant sur un moteur Otto, et vaut en pratique entre 9 et 11 alors qu'il se trouve plutôt entre 15 et 20 sur un moteur Diesel (avec des valeurs tendant à diminuer sur les moteurs Diesel récents). De ce fait, la hiérarchie est inversée : en tenant compte des différences de taux de compression, c'est bien le moteur Diesel qui est le plus efficace énergétiquement.

N'oublions pas tout de même, à côté de ces célébrités historiques, notre maintenant fameux cycle Miller qui, s'il s'apparente au cycle Otto pour bien des points (notamment en utilisant le même type de carburant), propose un rendement bien plus intéressant⁷ et proche de celui du cycle Diesel.

Un peu plus près de la réalité

Ces diagrammes idéalisés sont tout de même assez éloignés de la réalité : en pratique, l'augmentation de pression n'est pas instantanée de 3 à 4 dans le cycle Otto, et la combustion ne s'effectue pas à pression constante dans le cycle Diesel, surtout dans les moteurs récents d'automobiles qui ont beaucoup évolué par rapport aux Diesels de la première heure, lents et exclusivement destinés à un usage utilitaire. De plus, lors de l'admission le gaz est aspiré à une pression forcément légèrement inférieure à la pression ambiante, et lors de l'échappement il est refoulé à une pression légèrement supérieure, ceci pour les deux cycles. En pratique, les diagrammes réels s'apparentent à des figures en forme de 8 relativement semblables pour les cycles Otto et Diesel, et qui ressemblent grossièrement à la figure 33 à quelques déformations près.



33 | Allure schématique des cycles réels.

7. Dans des applications stationnaires pour la cogénération, Mitsubishi a réalisé un moteur à essence à cycle Miller dont le rendement thermodynamique est de 42 %.

La position des points 3, 4, 5 et 6 est volontairement floue, et varie d'un cycle à l'autre ou même d'un moteur à l'autre utilisant le même cycle. Pourtant, il doit quand même y avoir quelques différences entre moteurs Otto et Diesel, puisque les deux n'utilisent pas le même type de carburant ! Il y a bien sûr le taux de compression, très supérieur pour le Diesel et qui explique son meilleur rendement théorique ; mais ce n'est pas tout : la façon dont la combustion s'opère est très différente, et explique bien des avantages et inconvénients des solutions actuellement retenues.

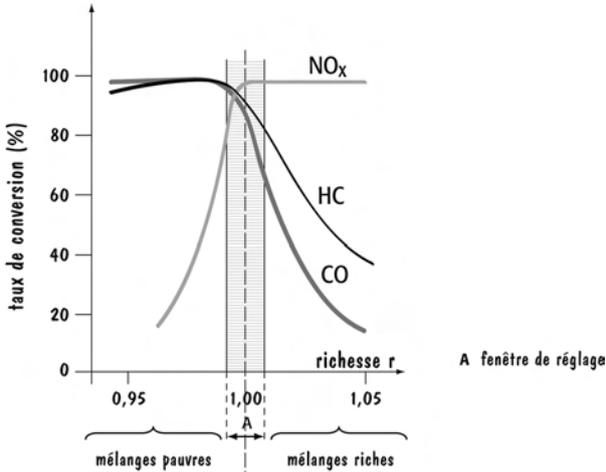
Otto

Dans le moteur Otto (ou même Miller), c'est un mélange air-carburant qui est admis dans le cylindre⁸, dans des proportions bien définies afin que la combustion se fasse dans des conditions *stœchiométriques*. Cet adjectif barbare issu de la chimie signifie qu'il y a exactement assez de dioxygène (donc d'air, qui contient 21 % de dioxygène) pour brûler le carburant, ni plus, ni moins⁹. De légers écarts par rapport à cette proportion idéale air/carburant sont néanmoins tolérés (et nécessaires) suivant les conditions de fonctionnement du moteur, qu'on mesure en termes de « richesse » du mélange. Une richesse égale à 1 désigne la stœchiométrie exacte, un *mélange pauvre* (en carburant) aura une richesse inférieure à 1 et un *mélange riche* (en carburant) une richesse supérieure à 1. Les méthodes de dépollution actuelles des moteurs Otto, basées sur l'utilisation d'un catalyseur « 3 voies » (nommé ainsi car traitant 3 polluants¹⁰) placé dans le conduit d'échappement, ne permettent pas de s'écarter beaucoup de la richesse 1 : en effet, c'est seulement pour cette valeur que les trois polluants sont éliminés de façon satisfaisante.

8. Sauf dans certains cas, dont nous parlerons plus loin.

9. Pour les moteurs à essence, cela correspond à 14,7 g d'air par gramme d'essence.

10. À savoir les hydrocarbures non brûlés (notés HC), le monoxyde de carbone (CO) et les oxydes d'azote (NO_x, principalement composés de monoxyde d'azote NO et de dioxyde d'azote NO₂).



34 | Efficacité du traitement des polluants en fonction de la richesse dans un catalyseur trois voies (source : Techniques de l'Ingénieur – B2711).

Le mélange d'air et de carburant, qu'on espère le plus *homogène*¹¹ possible, est alors enflammé par une élévation locale de température, produite en un point bien précis et à un instant bien déterminé, et obtenue par une décharge électrique entre les deux électrodes d'une *bougie*. Dispositif et terme inventés, on s'en souvient, par Étienne Lenoir en 1860 ! La combustion se propage alors, depuis ce point d'inflammation, à l'ensemble du mélange gazeux en un temps très court à notre échelle (d'où le terme « moteur à explosion »), mais qui ne l'est pas à l'échelle des mouvements du piston, surtout dans les moteurs modernes tournant à des régimes élevés. Ce qui signifie par exemple que l'hypothèse de combustion instantanée entre les points 3 et 4 du cycle d'Otto est très abusive, et que l'augmentation de pression liée à la chaleur de la combustion ne se fait pas au moment idéal du cycle, conduisant ainsi à une perte de rendement. La flamme qui se propage dans ce mélange homogène atteint des températures très élevées (de l'ordre de 2000 °C), ce qui a principalement deux

11. Homogène : qui a les mêmes propriétés en tout point de l'espace. Exemple : l'intérieur d'une crème anglaise... au moins à notre échelle.

conséquences : d'une part la production importante d'oxydes d'azote, puissants irritants respiratoires, mais aujourd'hui pratiquement éliminés dans ce type de moteur par les catalyseurs à 3 voies, et d'autre part la perte d'énergie sous forme de chaleur non transformée en travail, à travers les parois de la chambre de combustion. Lorsque l'entropie peut nous embêter, n'oublions pas, elle le fait.

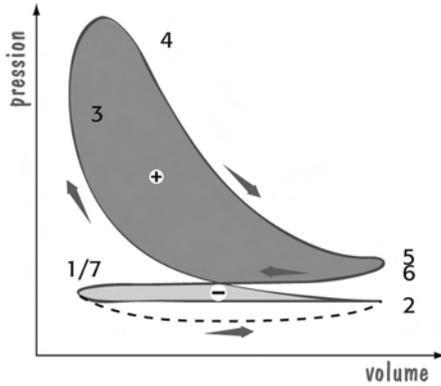
Afin qu'un moteur Otto fonctionne correctement, il est nécessaire que l'inflammation du mélange se produise quand l'étincelle jaillit *et pas avant* : sinon, l'explosion repousse violemment le piston avant même qu'il ne termine la compression, ce qui va à l'encontre du but recherché (produire du travail) et en plus peut causer de graves dommages au moteur, voire sa destruction. Ce phénomène, appelé *cliquetis* à cause du bruit métallique qu'il engendre, doit absolument être évité et impose de contrôler l'aptitude du carburant à *ne pas* s'enflammer avant qu'on le lui dise ; cette propriété est mesurée par ce qu'on appelle *l'indice d'octane*. Plus il est élevé, moins le risque de cliquetis est grand ; l'éthanol, par exemple, possède un indice très élevé de 107 qui est un avantage tant en rendement qu'en puissance pour les moteurs Otto qui l'acceptent.

Diesel

Dans un moteur Diesel en revanche, le piston n'aspire que de l'air, le carburant étant introduit plus tard. Ce qui constitue un gros avantage : aucun risque d'inflammation incontrôlée avant la fin de la compression, puisque l'air ne s'enflamme pas tout seul ! Mais il y a un autre bénéfice, en termes de rendement. En effet, cette admission peut se faire à travers un conduit grand ouvert, sans aucun obstacle qui s'oppose au mouvement du gaz, excepté le diamètre du conduit lui-même et la largeur du passage laissé par les soupapes d'admission. C'est bien mieux que sur le moteur Otto où, pour moduler la puissance demandée par le conducteur à un régime donné, on fait varier la quantité de carburant injecté *ainsi que la quantité d'air, afin de respecter la stœchiométrie*, et ceci au moyen d'un « papillon des gaz » qui vient

obstruer en partie le conduit d'admission. Cette obstruction crée, sur le moteur Otto, une perte de rendement particulièrement sensible à faible puissance, et qui n'existe pas (ou de façon bien moindre, et pour d'autres raisons) sur le moteur Diesel.

35 | Travail moteur et travail de pompage dans un moteur à combustion interne.



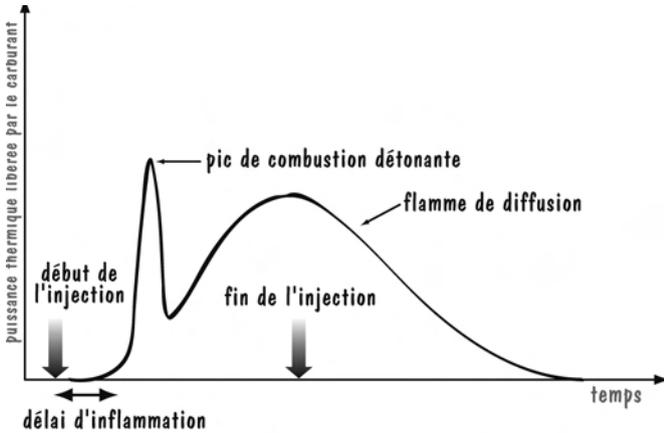
Cette différence entre les deux cycles peut se visualiser graphiquement sur les diagrammes pression-volume tels que celui de la figure 33. Nous avons déjà vu qu'une énergie était le produit d'une puissance par un intervalle de temps ; sachons également qu'elle est le produit d'une pression par un volume ! Ainsi les surfaces mesurées entre les lignes du cycle et l'axe du volume représentent des énergies, et même des travaux pour être précis, qui peuvent être positifs ou négatifs (donc, correspondre à la phase motrice recherchée ou à une phase consommatrice de travail, qu'on cherche à éviter) suivant le sens de parcours. Sans rentrer dans les détails de la démonstration, donnons la règle graphique qui en découle (voir la figure 35) : les travaux produits peuvent être mesurés très simplement par l'aire des surfaces emprisonnées dans le tracé en 8 (il y en a donc deux), *mais* le travail est positif seulement pour la partie parcourue dans le sens des aiguilles d'une montre. Autrement dit, la surface de la boucle inférieure du 8, parcourue en sens inverse, représente une *consommation* de travail : heureusement, la partie supérieure est nettement plus grande, ce qui justifie l'appellation *moteur* !

Avec le cycle Otto, la fermeture du papillon des gaz augmente le travail que le moteur doit *fournir* pour vaincre la dépression (ligne en tirets), en agissant comme une pompe, et qui se retranche du travail moteur ; comme il s'agit d'énergie perdue pour la propulsion on parle de *pertes par pompe*. Le cycle Diesel est donc clairement plus efficace de ce point de vue également, en plus du fort taux de compression.

La combustion du carburant pose en revanche d'autres problèmes dans le moteur Diesel. Il est introduit, soit en amont de la chambre de combustion soit directement¹² dans celle-ci, à l'instant où la pression et la température de l'air sont suffisantes pour provoquer son inflammation. La combustion est donc, par nature, *hétérogène*¹³ : le jet de carburant issu de l'injecteur se répand dans de l'air très chaud, ce qui provoque en bordure du jet une vaporisation puis la combustion du carburant. Celle-ci se déroule en deux temps : la partie vaporisée, après un très court délai d'inflammation, brûle très brutalement (on parle de *combustion détonante*), ce qui donne au Diesel sa sonorité typique ; ensuite, la combustion se poursuit plus lentement à l'interface carburant-air (on parle de *fiamme de diffusion*), jusqu'à ce que tout (ou presque) le carburant injecté soit brûlé. Cette combustion hétérogène est responsable de la production abondante de *suies*, qui sont de petites particules composées essentiellement de carbone et se formant, paradoxalement, lorsque le mélange est riche : alors que le moteur fonctionne avec un excès d'air, donc en mélange globalement pauvre, les bords du jet où se produit la combustion sont forcément riches, puisque le carburant n'a pas encore eu le temps de se mélanger avec l'air ! Une grande partie de ces suies est heureusement oxydée (le carbone ressortant sous forme de CO₂) avant même de sortir de la chambre de combustion, grâce à l'oxygène en excès ; cependant il en reste toujours à l'échappement, particulièrement lors des phases d'accélération brutales auxquelles incitent, hélas, les performances des moteurs Diesel modernes.

12. On parle alors d'*injection directe*, technique quasiment généralisée aujourd'hui sur les moteurs Diesel pour automobiles.

13. Hétérogène : qui n'a pas les mêmes propriétés en tout point de l'espace. Exemple : l'intérieur d'un cake aux raisins.



36 | Pourquoi votre Diesel fait clac-clac.

Les Diesel récents permettent toutefois, en effectuant plusieurs injections par cycle au lieu d'une seule, d'atténuer fortement cet inconvénient. En revanche, les oxydes d'azote sont là aussi produits en grande quantité et les motoristes n'ont, à ce jour, trouvé aucune parade satisfaisante permettant de les éliminer¹⁴. En effet, les gaz d'échappement du moteur Diesel sont riches en dioxygène, ce qui rend très difficile la réduction des oxydes d'azote qui est réalisée en milieu pauvre en dioxygène et par voie catalytique sur les moteurs Otto. Des solutions techniques nécessitant l'ajout de produits à base d'urée sont actuellement testées, mais elles compliquent et renchérissent le moteur, au même titre que les filtres à particules destinées à réduire la production de suies.

TENDANCES ACTUELLES

Otto comme Diesel, les moteurs à combustion interne pour automobiles ont considérablement amélioré leur rendement depuis leur invention. Les moteurs Otto de 1900 se hissaient à 15 % environ,

14. Même le « Diesel le plus propre du monde » dont Toyota fait une grande publicité pour son *Avenis Clean Power* émet, par exemple, environ 5 fois plus d'oxydes d'azote que la version essence équivalente ; et la version Diesel « moins propre », 10 fois plus.

contre nettement plus de 30 % aujourd'hui, et les moteurs Diesel, partis de 23 % en 1930, dépassent parfois 40 % maintenant. Tout ceci sans véritable révolution, mais en cherchant systématiquement à lutter contre les pertes d'énergie sous toutes leurs formes. Peut-on encore espérer progresser et en quel domaine ?

Les différentes façons de gaspiller le carburant

Quand on analyse le fonctionnement d'un moteur à combustion interne, on classe généralement les « pertes » (c'est-à-dire la puissance correspondant au carburant consommé, mais non transformée en travail utile) en trois grandes catégories :

- les pertes à l'échappement : le moteur évacuant en permanence des gaz chauds, il y a indiscutablement de l'énergie¹⁵ qui s'échappe par là ;
- les pertes par transfert de chaleur à travers les parois : un moteur thermique chauffe, c'est certain, il est très peu conseillé de poser sa main dessus. Donc encore de l'énergie qui se perd dans l'environnement... mais qui est parfois en partie récupérée pour le chauffage de l'habitable ;
- les pertes par frottement : le mouvement du moteur lui-même réclame sa part d'énergie, car les pièces frottent les unes contre les autres (pistons dans les cylindres surtout) ; c'est autant d'énergie qui ne sert pas à mouvoir le véhicule. On englobe aussi dans cette catégorie les pertes par pompage à l'admission, qu'on peut assimiler à un « frottement gazeux ».

Remarquons avant toute chose que si le *rendement de la combustion elle-même* n'est pas de 100 % (autrement dit, une partie du carburant arrive à ressortir sans brûler), il s'en approche beaucoup dans les moteurs modernes : la quasi-totalité du pouvoir calorifique du carburant est libérée à la combustion. On ne peut donc pas espérer gagner de façon significative sur le rendement thermodynamique du

15. Par unité de temps, c'est donc une puissance.

moteur, défini comme le rapport entre le travail fourni et cette chaleur libérée, en brûlant le peu de carburant qui parvient encore à se dérober. Les progrès en ce domaine concerneront les rejets polluants, pas (ou de façon marginale) l'efficacité. Le raisonnement qu'on entend parfois selon lequel « moins on consomme, moins on pollue », et qui sous-entend qu'une partie non négligeable du carburant ressort sous forme de polluants en étant mal brûlée, est en général faux. La consommation est seulement proportionnelle aux constituants très majoritaires des gaz d'échappement, le dioxyde de carbone et l'eau, qui ne sont pas des polluants¹⁶.

La part relative de ces différentes pertes varie beaucoup suivant les conditions d'utilisation du moteur, qui se définissent par son *régime* (vitesse de rotation) et sa *charge*. Celle-ci est définie comme le rapport entre la puissance mécanique développée réellement (dictée par le conducteur) et la puissance dont est capable le moteur au régime de rotation considéré. La puissance perdue par frottement augmente logiquement avec le régime, puisque la même énergie (par exemple nécessaire pour faire coulisser le piston dans le cylindre) est dépensée plus rapidement ; en revanche elle est peu sensible à la charge. La puissance de frottement est également très sensible à la viscosité du lubrifiant, qui elle-même croît lorsque la température baisse, ce qui justifie l'utilisation d'huiles différentes selon les conditions climatiques afin de faciliter les démarrages à froid. Mais même si les frottements sont faibles aux bas régimes, il existe un seuil en dessous duquel le moteur ne peut plus se maintenir lui-même en mouvement, le *régime de ralenti*. En effet, les pertes thermiques et à l'échappement deviennent tellement importantes qu'elles compensent exactement, additionnées au frottement, le travail produit par les gaz au cours du cycle moteur : son rendement est alors quasi-nul.

16. Le dioxyde de carbone en lui-même n'est pas dangereux (nous en émettons en respirant) ; il ne pose problème que lorsque le carbone qu'il contient est d'origine fossile (accumulé pendant des millions d'années lors de la formation du charbon, du pétrole et du gaz naturel), perturbant ainsi le fragile équilibre du cycle du carbone entre l'atmosphère et la Terre. Hélas, l'utilisation quasi-exclusive de combustibles fossiles rend les quantités rejetées préoccupantes.

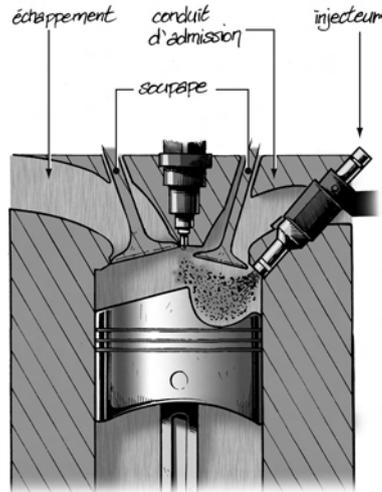
Pour un moteur à allumage par bougies, on fait varier la charge en « étranglant » le conduit d'admission par le papillon des gaz en même temps qu'on réduit la quantité de carburant ; il en résulte des pertes par pompage importantes à faible charge, qui sont comptabilisées dans les pertes par frottement même s'il ne s'agit pas de pièces solides frottant entre elles. Inversement, à forte charge, la proportion des pertes à l'échappement augmente, mais celle des pertes thermiques diminue davantage, pour Otto comme pour Diesel ; bref, même s'il existe des différences entre les deux, on a en général intérêt à faire fonctionner ces moteurs à mi-régime et à charge élevée. Sans rentrer dans les détails, on peut retenir que dans des conditions de fonctionnement moyennes, à mi-régime et proche de la pleine charge, un moteur perd de l'ordre de 40 % de la puissance du carburant à l'échappement, et 20 % par transfert thermique. Le reste (soit 40 % environ) n'étant pas entièrement utilisable puisqu'amputé des pertes par frottement, de l'ordre de 5 % de la puissance du carburant. Ces chiffres sont naturellement des ordres de grandeur devant être affinés suivant les moteurs. Mais peut-on amoindrir ce gâchis ?

Arrêter de pomper dans le vide

Un gros problème du moteur à allumage commandé, c'est donc l'énergie qu'il gaspille lorsque le piston cherche désespérément à pomper de l'air alors que le papillon des gaz s'y oppose, dans le fonctionnement à faible charge. Or celui-ci est loin d'être rare, étant donné le peu de temps passé à exploiter les pleines capacités du moteur : c'est d'ailleurs une des raisons de la supériorité des motorisations hybrides essence-électricité. Il serait donc judicieux de laisser à l'air la porte grande ouverte, comme sur un moteur Diesel, mais c'est justement contraire au principe même de fonctionnement du moteur, qui impose un mélange stœchiométrique ! En effet, lorsqu'on injecte moins de carburant, si la même quantité d'air est admise (difficile de rétrécir le volume du cylindre !) le mélange va automatiquement se trouver « dilué », ou *pauvre* dans le langage des motoristes. De

plus, dans ces conditions il risque tout bonnement de ne pas vouloir s'enflammer sous l'étincelle de la bougie.

Sauf... si on *injecte directement* le carburant dans la chambre de combustion, et qu'on s'arrange pour que le mélange passe dans les parages de la bougie avec la bonne richesse. Dans ce cas, le mélange n'est plus homogène¹⁷, un peu comme dans le moteur Diesel ; mais il faut, contrairement au moteur Diesel qui fonctionne par auto-allumage, étudier finement l'aérodynamique interne au moteur pour savoir où passe le jet de carburant au moment de l'injection. En étant adroit, on peut s'arranger pour que les environs de la bougie soient à la bonne richesse, ce qui permet l'inflammation ; et une fois la flamme amorcée elle peut se propager dans des zones de richesse beaucoup plus faible. L'affaire est subtile, et nécessite le plus souvent de donner à la tête du piston une forme incurvée pour qu'il renvoie le jet (juste ce qu'il faut) vers les électrodes par où tout commence.



37 | Une injection directe d'essence utilisant le piston pour guider le jet.

De cette façon, il est possible de réduire de façon significative la consommation à charge partielle, quand le conducteur exige peu de puissance du moteur. Cette technique nommée *injection directe d'essence* a été introduite pour la première fois en série par Mitsubishi en 1996 sous le sigle GDI, puis par la plupart des constructeurs depuis, mais a encore du mal à s'imposer ; à vrai dire, elle n'a pas que des avantages.

17. On parle aussi de *mode stratifié*.

La combustion en mélange hétérogène produit en effet, parce que le mélange est globalement pauvre, une quantité importante d'oxydes d'azote, ces fâcheux gaz irritants bien connus du Diesel ; de plus, les zones riches du jet ont tendance, comme dans le Diesel encore, à produire des particules de suie ! Bref, à vouloir piquer au Diesel ses avantages, on récolte également une bonne partie de ses inconvénients. Face aux problèmes rencontrés, de nombreux constructeurs proposent d'ailleurs aujourd'hui des moteurs à injection directe mais fonctionnant généralement en mode stœchiométrique, dont l'intérêt en consommation est moindre. Mais depuis 2006, Lexus propose une double injection (directe *et* indirecte, soit deux injecteurs par cylindre, agissant de concert ou séparément suivant les conditions) sur sa berline de luxe GS 450 h, qui en outre est hybride !

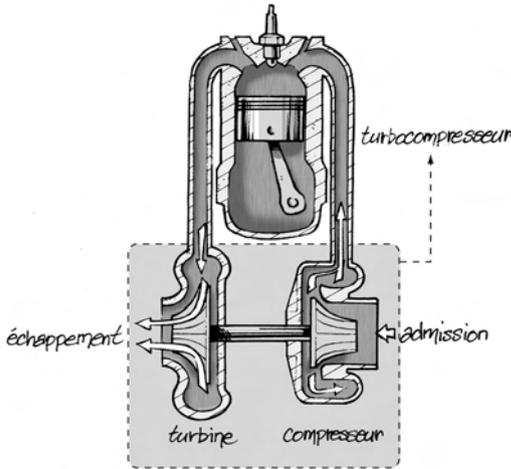
Petit mais costaud

Rêvons un peu : il serait tellement pratique que le moteur change de taille (de *cylindrée*, pour parler du volume de gaz emprisonné par les pistons dans les cylindres) au gré de la puissance qu'on lui demande ! Ainsi, son rendement pourrait toujours être optimal. Un tel vœu risque malheureusement fort peu d'être exaucé, un bloc-moteur étant par nature un objet de taille bien définie et à géométrie difficilement variable¹⁸. Mais si l'on réfléchit bien, ce n'est pas tellement la taille du moteur qui compte, mais la quantité d'air qu'on y introduit, et qui détermine la quantité de carburant brûlée¹⁹ donc la puissance. Or, il n'y a pas plus compressible que l'air, la preuve, on gonfle les pneus avec. Il suffit donc, en partant d'un petit moteur, de le gaver d'air en forçant un peu (comme les oies, en moins cruel) pour obtenir un moteur de puissance supérieure, comme un gros. Plusieurs techniques sont possibles. On peut prélever un peu de la puissance mécanique du moteur pour faire tourner un *compresseur* qui pousse en

18. Des études ont néanmoins été entreprises dans la voie d'une hybridation *bi-thermique*, notamment chez Renault : deux petits moteurs thermiques au lieu d'un gros, dont l'un ne se met en route qu'en cas de nécessité...

19. Pour le moteur à allumage commandé fonctionnant en mode stœchiométrique.

permanence l'air à l'admission ; on gagne ainsi plus de puissance qu'on n'en consomme, heureusement, mais le moteur consomme aussi plus de carburant, évidemment. On peut également utiliser une énergie presque « gratuite », comme l'énergie cinétique des gaz d'échappement, pour faire tourner une petite turbine qui, sur le même axe, en comporte une autre jouant le rôle de pompe : c'est le *turbocompresseur*, ou familièrement *turbo*, organe maintenant d'une banalité absolue sous le capot de quasiment toutes les voitures Diesel.



38 | Schéma d'un turbocompresseur.

Mais n'est-on pas ainsi revenu à une situation équivalente à celle d'un gros moteur, tout simplement ? Non, pour plusieurs raisons. D'abord, ce moteur « dopé » étant plus petit à puissance équivalente, il est aussi moins lourd, même décoré de quelques accessoires supplémentaires ; le poids étant l'ennemi de l'automobile, c'est déjà un avantage pour la consommation du véhicule. Ensuite, un organe comme le turbo-compresseur ne renforce la puissance qu'à partir d'un certain régime, et permet donc réellement d'avoir un moteur « à géométrie variable », qui ne se gave d'air que lorsqu'on le désire. Enfin, les frottements, qui sont essentiellement dus aux segments d'étanchéité des pistons raclant

dans les cylindres, sont moins importants si ceux-ci sont plus petits : on a ainsi diminué une cause de pertes.

Le turbocompresseur étant quasi inopérant à très bas régime, certains constructeurs entreprennent de cumuler plusieurs techniques pour donner vraiment l'impression d'un gros moteur dans tout le domaine d'utilisation, avec néanmoins des résultats plus intéressants en consommation que le « vrai » gros moteur. C'est le cas de Volkswagen, qui a commercialisé en 2006 sur une Golf un moteur à essence dénommé « 1.4 TSI », d'une cylindrée de 1,4 litre seulement, mais doté d'un turbocompresseur *et* d'un compresseur, le dernier comblant aux bas régimes les insuffisances du premier ; de plus ce moteur est doté de l'injection directe, mais fonctionnant en mode stœchiométrique. Il est capable d'une puissance de 125 kW²⁰, chiffre tout à fait exceptionnel pour une telle cylindrée ; mais son rendement l'est également. Il suffit de le comparer au moteur Diesel (le fameux TDI), de 125 kW également, pouvant équiper la même voiture : les deux modèles, essence et Diesel, rejettent *exactement* la même quantité de CO₂ par kilomètre (173 g), selon la norme mixte européenne. Sachant que ces émissions sont très sensiblement proportionnelles à l'énergie consommée sous forme de carburant, on en déduit que le rendement de ce moteur à essence n'est pas loin de celui du TDI, qui souffre, lui, d'une surcharge pondérale importante par rapport au petit moteur à essence survitaminé : plus de 200 kg d'écart.

Au prix d'une sophistication croissante, la tendance à la miniaturisation des moteurs, quel que soit leur carburant, va donc s'accroître pour augmenter leur rendement. Mais comme il n'est pas très vendeur de proposer au client le nouveau modèle équipé d'un moteur miniature, sur un marché où beaucoup préfèrent encore avoir un long capot pour bien montrer qu'ils en ont un gros, les ingénieurs et les responsables *marketing* parlent de *downsizing*, ce qui veut dire la même chose mais en anglais. Comme dans les années 60, où on ne

20. 170 chevaux, pour les anciens.

pouvait pas faire une carrière de chanteur en s'appelant Jean-Philippe Smet, ou même les années 40, quand la modernité avait forcément un parfum d'Amérique si l'on en croit *Jour de fête* de Jacques Tati.

Le retour de la machine à vapeur ?

Les gaz d'échappement sont très chauds et évacuent en permanence une fraction très importante de l'énergie dégagée par la combustion. Il est donc tentant de chercher à utiliser cette chaleur perdue. La thermodynamique est formelle : en présence d'une source chaude (les gaz brûlés) et d'une source froide (l'air ambiant), il est toujours possible de produire du travail d'une façon ou d'une autre... il s'agit donc d'inventer un dispositif secondaire au moteur thermique lui-même, selon la même logique que celle des centrales thermiques à cycle combiné²¹. De grands constructeurs y travaillent sérieusement, même si rien n'a pour l'instant atteint le stade de la commercialisation : BMW a ainsi présenté fin 2005 une réalisation appelée *Turbo-steamer* qui parvient, en utilisant la chaleur des gaz d'échappement et le principe de fonctionnement de la machine à vapeur, à augmenter « gratuitement » la puissance du moteur. Qui a dit que la traction à vapeur était dépassée ?

VERS LA CONVERGENCE

Toutes ces finesses contribuent petit à petit à grappiller quelques pour cent de rendement, mais il reste encore une ligne de démarcation au sein du territoire des moteurs à combustion interne : celle qui sépare ceux fonctionnant à l'essence (ou à l'alcool, ou à d'autres carburants de propriétés similaires) de ceux fonctionnant au gazole (ou à l'huile végétale et ses dérivés). Existera-t-elle toujours ? Rien n'est moins sûr.

21. Ces centrales, comportant deux types de turbines fonctionnant à des températures différentes, permettent de produire de l'électricité avec un rendement nettement supérieur à celui des centrales classiques en utilisant le flux thermique « en cascade ».

Utiliser l'indésirable

Les moteurs à allumage commandé classiques souffrent de pertes par pompage à faible charge, qu'on peut diminuer en recourant à l'injection directe de carburant en mode stratifié, mais en retombant sur les travers (suies et oxydes d'azote notamment) des moteurs Diesel. L'idéal serait de parvenir à enflammer un mélange homogène, mais sans étrangler l'admission par un papillon des gaz et sans bougie : ainsi, on cumulerait les avantages du moteur Otto et du moteur Diesel. Or c'est déjà ce qui se passe lorsqu'apparaît le phénomène de *cliquetis* dont nous avons déjà parlé, à la différence près (essentielle !) qu'il se produit à un très mauvais moment, au point d'être totalement contre-productif (la combustion se produit quand le piston va dans le mauvais sens) et surtout destructeur pour le moteur. Les ingénieurs motoristes cherchent donc depuis de nombreuses années à obtenir sur les moteurs « à essence » un « cliquetis contrôlé », c'est-à-dire une auto-inflammation d'un mélange homogène de carburant se produisant au bon moment du cycle pour produire le travail recherché, et bien sûr préserver le moteur.

Inversement, on peut partir d'un moteur Diesel, où l'inflammation se fait déjà spontanément, et chercher à rendre le mélange homogène ce qui impose de repenser complètement la façon dont le carburant est introduit dans la chambre de combustion, puisqu'il s'y enflamme actuellement de façon violente juste après son introduction. De très nombreux sigles (la plupart anglais comme il se doit) désignent ce mode de combustion si particulier, véritable défi aux compétences des motoristes ; il semble que le plus couramment retenu soit *HCCI* pour *Homogeneous Charge Compression Ignition*, qu'on peut traduire par Mélange Homogène Allumé par Compression. Certains (en France surtout) parlent de *Diesel HCCI* pour ce concept appliqué aux moteurs « à gazole » et utilisent un autre nom²² pour les moteurs « à essence » ainsi modifiés ; il faut bien voir de toute façon que ce

22. *CAI* pour *Combustion par Auto-Inflammation* ou *Controlled Auto-Ignition*. Pour une fois, le sigle peut servir en anglais et en français.

mode de combustion n'est ni conforme aux idées de Nikolaus Otto ni à celles de Rudolf Diesel ! Il vaudrait donc mieux utiliser un nom différent, car « Diesel HCCI » sonne un peu comme « fil de fer en cuivre ». D'autant que le carburant lui-même risque de ne pas rester un simple gazole...

Les gains attendus d'une telle motorisation sont importants en rendement (plus de 20 % par rapport au moteur Otto) ainsi qu'en émission de polluants. Pourquoi ? En déclenchant l'inflammation simultanément dans toute la chambre de combustion, ou plus exactement en de très nombreux points de cette chambre (l'homogénéité parfaite est une vue de l'esprit non réalisable en pratique), on libère l'énergie du carburant très rapidement, et on peut donc le faire au moment du cycle où l'augmentation de pression résultante produira le plus de travail. Rappelons-nous qu'avec le moteur Otto, la rapidité du dégagement de chaleur est limitée par la vitesse de propagation du front de flamme à partir des électrodes de la bougie, et qu'en Diesel, c'est la rapidité de la réaction à l'interface air-carburant. Quand tout le volume est prêt à s'enflammer, cette limite n'existe plus.

En réalité, il en existera une autre liée aux propriétés des matériaux employés, incapables de supporter la libération quasi instantanée de l'énergie d'un mélange stœchiométrique, et il faudra donc limiter ce dégagement de chaleur en utilisant un mélange pauvre, mais homogène. Ceci peut s'obtenir en réintroduisant une grande partie des gaz d'échappement (très pauvres en oxygène) dans la chambre de combustion, comme c'est déjà le cas pour les Diesel actuels²³ dans le but de réduire les émissions d'oxyde d'azote. La température de la flamme sera alors bien inférieure à ce qu'elle est actuellement dans les moteurs Otto comme Diesel, réduisant les pertes thermiques et augmentant d'autant le rendement, tout en limitant les émissions d'oxydes d'azote à trois fois rien, sans nécessité de catalyseur. Les suies, résultat de

23. C'est le rôle de la fameuse « vanne EGR » pour *Exhaust Gas Recirculation*, qui malheureusement dysfonctionne souvent à force d'être encrassée par les suies.

la combustion dans les zones riches du mélange, seront également considérablement réduites par rapport au moteur Diesel. Mais qu'attend-on ?

Un nouveau carburant ?

Tout ceci est bien beau sur le papier, mais la réalisation concrète se heurte à de très nombreuses difficultés techniques. Quelques moteurs ont cependant déjà vu le jour chez Honda, mais de petite cylindrée et sur la base d'un cycle à deux temps. Ce type de moteur, d'ordinaire très polluant et abandonné en automobile, pourrait être sauvé de l'extinction par une telle technique, bénéficiant d'une meilleure stabilité intrinsèque à ce type de combustion que le moteur à quatre temps. Pour les autres, les bons vieux moteurs à quatre temps (ou même cinq), la partie est loin d'être gagnée. La maîtrise de cette combustion très chatouilleuse impose en effet de relever deux redoutables défis. Le premier consiste à savoir préparer un mélange homogène très contrôlé d'air, de carburant et de gaz d'échappement dans des conditions de fonctionnement du moteur très diverses ; le deuxième consiste à prévoir très précisément l'instant où ce mélange va s'enflammer. La situation est plus délicate de ce point de vue avec un carburant de type « essence », dont le délai d'inflammation est plus grand que celui du gazole ; d'un autre côté, la préparation rapide d'un mélange homogène à partir d'un carburant plus visqueux et moins volatil comme le gazole laisse encore beaucoup de pain sur la planche aux ingénieurs motoristes.

Bref, si on y arrive un jour, et pas seulement dans les laboratoires, ce sera bien sûr avec des voitures bardées de capteurs au niveau du moteur, aptes à changer « en direct » les réglages dans les chambres de combustion, d'un cycle à l'autre, pour que la combustion soit stable. Et sans doute aussi grâce à un carburant aux propriétés physico-chimiques strictement contrôlées (puisque ce sont elles qui conditionnent le fonctionnement correct du moteur) et qui ne s'appellera ni essence, ni gazole. Probablement un carburant de synthèse, dont la

fabrication s'apparentera davantage à de la chimie de synthèse qu'au raffinage traditionnel. De quoi simplifier la lecture des tarifs pour l'automobiliste hésitant entre deux stations de chaque côté de la route.

RAISONS ET DÉRAISONS

La fiscalité n'est pas la physique

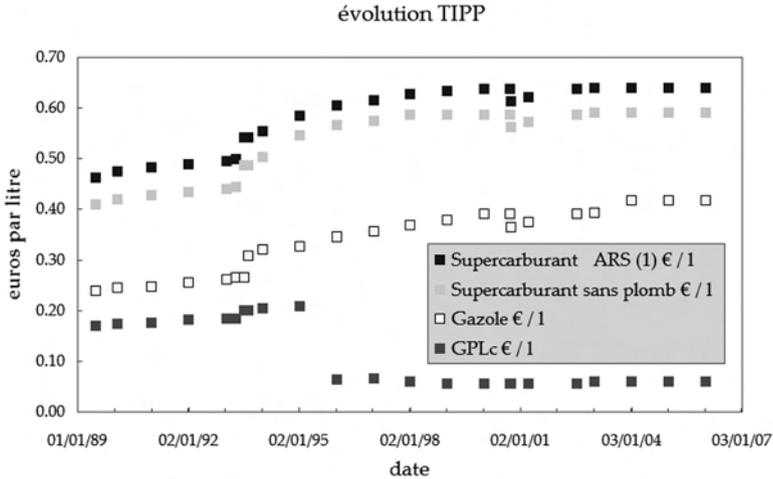
Parlons prix, justement, même si un scientifique répugne naturellement à le faire. La « supériorité incontestable du Diesel » qui semble couler de source pour beaucoup d'automobilistes français, est de nature fiscale bien plus que thermodynamique. En effet, le montant de la taxe intérieure sur les produits pétroliers, la fameuse TIPP, perçue en France comme une taxe fixe proportionnelle au volume vendu (et non pas au prix comme la TVA), est différent suivant les carburants. En 2006, elle se monte par litre à 60,69 centimes d'euro pour le supercarburant sans plomb, à 42,84 centimes d'euro pour le gazole... et à 5,99 centimes d'euro pour le GPL, dont tout le monde connaît le tarif particulièrement avantageux. Tout compte fait, la part des taxes (TIPP et TVA) dans le prix de vente du carburant s'élève actuellement à environ 67 % pour l'eurosuper et 57 % pour le gazole²⁴. En réalité, un litre de gazole coûte très légèrement *plus cher* hors taxes qu'un litre de sans-plomb 95, ce dont l'automobiliste ne se rend pas compte à cause de cette fiscalité biaisée.

Mais il y a pire : on achète le carburant au volume, alors que de toute évidence c'est l'énergie qu'il contient qui nous intéresse. Or à volume égal, le contenu énergétique n'est pas le même, et là encore le gazole nous en donnerait plus à prix égal, même s'il était vendu au même prix que l'essence : les valeurs fluctuent suivant les sources²⁵ (et les pays, voire les saisons !), mais selon l'Institut français du pétrole²⁶ un litre d'essence sans plomb libère 32,39 MJ (ou 9,0 kWh) contre 35,95 MJ (ou 10,0 kWh) pour le gazole soit 11 % de plus. Quant à l'éthanol, il

24. http://www.industrie.gouv.fr/energie/petrole/textes/se_fiscalite.htm

25. Un dossier des Techniques de l'Ingénieur donne 32,2 MJ et 35,8 MJ par litre, respectivement pour l'essence et le gazole.

26. Communication privée.



39 | Évolution de la TIPP sur différents carburants, en euros par litre.

(1) ARS : carburant Anti-Récession de Soupapes, remplaçant le super plombé depuis 2000.

ne contient que 21,28 MJ par litre, ce qui alimente la rumeur fautive selon laquelle les moteurs fonctionnant à l'alcool auraient un moins bon rendement : à rendement égal, ils *doivent* consommer 50 % de plus en litres aux cent kilomètres, puisque ce volume supérieur de carburant contient la même énergie ! Inutile donc d'espérer vendre de l'éthanol carburant si son prix n'est pas inférieur d'un tiers à celui de l'essence...

Vers une taxation rationnelle des carburants

L'avantage fiscal du gazole, combiné aux progrès récents et bien réels du moteur Diesel en agrément d'utilisation comme en rendement, ainsi qu'à des normes de pollution suffisamment tolérantes pour lui, a conduit à une *diésélisation* massive du parc automobile français et même européen. Ce n'est pas sans poser de problèmes à l'État qui perçoit les taxes, ni aux compagnies pétrolières qui doivent approvisionner les stations-service. Le premier se voit contraint de faire un cadeau fiscal supplémentaire à tout nouvel adepte du Diesel, et les

secondes sont bien obligées d'importer massivement du gazole (30 % de la consommation en 2005, en provenance de Russie notamment) tout en exportant des flots de supercarburant, pour parvenir à satisfaire la demande. Car les raffineries ne peuvent pas produire l'un ou l'autre des carburants, mais au mieux adapter un peu la proportion de chaque produit de raffinage dans des fourchettes assez étroites. Une certaine souplesse est possible, en « craquant » les molécules longues pour en faire de petites, augmentant ainsi la proportion de produits « légers » dont l'essence fait partie ; ou au contraire, en raccrochant les petites molécules par des réactions chimiques pour en faire de grosses, augmentant ainsi les fractions « lourdes » des produits de raffinage. Mais bien sûr, tout cela se paye, énergétiquement comme financièrement, et il n'est pas sûr que l'industrie pétrolière accepte indéfiniment sans rechigner de se retrouver petit à petit dans la situation d'un éleveur de poulets qui ne trouverait à vendre que les cuisses.

De plus, nous savons maintenant que l'émission de dioxyde de carbone d'origine fossile fait peser de graves menaces sur l'avenir de notre planète, en accroissant de façon dangereuse et très rapide (à l'échelle de l'humanité) son effet de serre naturel. Il serait donc logique, efficace et juste, de taxer plus fortement les émissions de carbone à la source, de façon directe et transparente. Or rien n'est plus facile pour les carburants : on connaît précisément la quantité de dioxyde de carbone émise par leur combustion, puisque ce sont les atomes de carbone des hydrocarbures qui se retrouvent dans les molécules de CO₂. Cette quantité dépend directement de la teneur en carbone du carburant, et bien sûr de la quantité brûlée. Plus les hydrocarbures sont constitués de petites molécules, plus ils sont volatils et plus leur teneur en carbone est faible. Les premiers de la liste sont même gazeux dans les conditions habituelles de température et de pression : méthane, éthane, propane, butane (les deux derniers constituant le GPL). À partir de 5 atomes de carbone par molécule (pentane), on trouve des liquides dont un mélange plus ou moins complexe constitue l'essentiel de la formulation des essences et du gazole. Ce dernier étant constitué

de molécules plus riches en carbone, il émet logiquement davantage de CO₂ par litre brûlé, et devrait à ce titre être taxé davantage. Là aussi les chiffres sont quelque peu imprécis et variables selon les sources, les carburants n'étant pas (et de loin !) des espèces chimiques pures et bien identifiées ; un document de Toyota Allemagne cite 2,356 kg de dioxyde de carbone émis par litre pour l'essence sans plomb, et 2,642 kg par litre de gazole, soit 12 % de plus. Ce qui coïncide à peu près avec le surplus d'énergie, ou même le surplus de masse par litre puisque le gazole a une masse volumique supérieure à celle de l'essence, d'environ 11 % également. Bref, vendons les carburants au kilo avec les mêmes taxes pour tous et qu'on n'en parle plus !

Au lieu de cela, on monte des usines à gaz fiscales, on dresse un palmarès des voitures « propres » ne retenant que l'émission de CO₂, dont on ne sait même pas s'il est fossile puisque la voiture peut éventuellement accepter plusieurs carburants²⁷, et on ne prend surtout pas en compte la moindre émission toxique ! On appose des « étiquettes énergie » comme sur les réfrigérateurs, mais en classant dans une seule et unique catégorie, la mini-voiture urbaine à deux places et le gros véhicule familial à sept places : ne serait-ce pas au passager transporté qu'il faut juger les nuisances environnementales ? Et si hélas le taux d'occupation des véhicules est toujours à peine supérieur à une personne, c'est une raison de plus pour réguler l'usage de l'énergie fossile par la taxe sur le carburant, et lui seul ! Histoire de faire réfléchir à l'utilisation irrationnelle de la voiture, de promouvoir le covoiturage et d'inciter également les automobilistes à une conduite plus économe, toutes choses pour lesquelles des mesures touchant le véhicule lui-même s'avèrent impuissantes. Mais pourquoi faire simple quand on peut faire compliqué ?

27. Ces cas sont certes très rares en France, mais on peut espérer qu'ils le seront moins avec le développement des biocarburants.

17

L'hybridation à géométrie variable

Tout cela est très bien mais, si des progrès importants sont encore possibles en matière de dépollution, avec des moteurs futurs dépassant les performances actuelles des versions Otto tout en offrant un rendement meilleur que celui des Diesel, il ne faut pas rêver à une recette miracle qui puisse résoudre la crise énergétique majeure à laquelle l'automobile, comme le monde en général, va se trouver confrontée. Pour deux raisons essentielles : la baisse des ressources pétrolières, et l'augmentation croissante et concomitante des besoins, liée au développement des pays émergents. Les règles de trois sont souvent cruelles en matière énergétique, c'est sans doute pour cela que certains oublient de les faire quand ils proposent de remplacer sur-le-champ les centrales nucléaires par des éoliennes¹.

1. Une tranche de centrale nucléaire de 1 GW produit *en moyenne*, et de façon régulière, autant d'électricité que 4 000 grandes éoliennes de 1 MW (rotor de 60 m de diamètre), qui ont l'inconvénient d'être inutiles quand il n'y a pas de vent... ou qu'il y en a trop, leurs rotors étant alors arrêtés par sécurité. En revanche, le vent est éternel, les ressources d'uranium non, loin de là.

Soyons cruels. La consommation de pétrole dans le secteur des transports, en France, a été de presque 50 millions de tonnes² en 2005, dont l'essentiel pour la route, soit 43 millions de tonnes environ, et 30 millions de tonnes pour les véhicules légers. Rapporté à la population, et exprimé en unité de volume, cela fait pratiquement un mètre cube de pétrole par habitant *uniquement pour le transport routier* (poids lourds compris). Si l'ensemble de la planète (qui représente environ cent fois la population française) devait avoir ce niveau de consommation, on aurait donc une demande mondiale de pétrole d'environ 6 milliards de mètres cubes par an uniquement pour la route. La production *totale* de pétrole est actuellement de 80 millions de barils³ par jour⁴, ce qui fait, ramené à l'année et dans des unités moins archaïques, 4,6 milliards de mètres cubes. Sachant que le pétrole sert aussi à autre chose (en France, la consommation totale de produits pétroliers représente presque deux fois celle liée aux transports), on mesure l'ampleur du problème, surtout quand on sait que la production de pétrole va nécessairement diminuer. D'une manière ou d'une autre, ça ne peut que coïncider, même avec l'hypothèse totalement déraisonnable thermodynamiquement de moteurs thermiques au rendement égal à 100 %. Et même en oubliant le problème, pas mince pourtant, du réchauffement climatique lié à l'abus de combustibles fossiles. De plus, comme les biocarburants ne sauraient en aucun cas remplacer le pétrole au niveau de sa consommation actuelle, faute de quelques planètes supplémentaires spécifiquement dédiées à cela, le futur de la mobilité individuelle passe nécessairement par l'utilisation d'autres ressources énergétiques.

HYBRIDE, REVUE ET AUGMENTÉE

Les automobiles hybrides actuellement présentes sur le marché sont toutes, hormis les très rares voitures électriques équipées d'un groupe

2. <http://www.industrie.gouv.fr/energie/statisti/pdf/bilan2005.pdf>

3. Un baril fait pratiquement 159 litres.

4. Ou environ 150 mètres cubes par seconde, pour employer des unités plus parlantes.

électrogène de secours comme le *Kangoo Elect'Road* de Renault, des véhicules tirant exclusivement leur énergie du carburant qui alimente leur moteur thermique. L'usage de l'électricité n'est qu'interne, dans un but de meilleur rendement énergétique, et on pourrait d'ailleurs envisager des modes d'hybridation purement mécaniques, en remplaçant les batteries par des réservoirs de fluide sous pression qui accumulent ou restituent leur énergie comme le fait un ressort pneumatique⁵. La raison essentielle de ce choix tient, encore et toujours, à la difficulté de stocker une grande quantité d'énergie électrique sans surcharge pondérale déraisonnable. Les batteries progressent, mais plus en puissance qu'en énergie restituée pour une masse donnée, et restent encore chères. Pourtant, il est clair que l'autonomie considérée aujourd'hui comme « normale » pour une automobile (plus de 500 km) n'est que rarement utilisée : beaucoup de trajets effectués sont courts ou très courts, essentiellement pour des liaisons domicile-travail. Même l'utilisation récréative de la voiture, pour aller chercher les champignons le week-end ou se couvrir de boue sur le dernier circuit VTT du coin, se mesure bien souvent en quelques dizaines de kilomètres.

Cette constatation amène logiquement à envisager une évolution naturelle des automobiles hybrides, sous la forme de véhicules possédant une plus grande capacité de stockage électrique, mais qui resterait cependant nettement inférieure à celle des voitures purement électriques (pourtant pas énorme !). Pouvoir effectuer ne serait-ce qu'une trentaine de kilomètres en mode électrique changerait radicalement la donne en termes de consommation de carburant : cette possibilité serait évidemment de peu d'utilité aux taxis, ambulanciers ou représentants de commerce, sans parler des chauffeurs de poids lourds, mais l'automobiliste moyen n'a pas les mêmes critères d'utilisation de son véhicule ! Or, c'est quand même lui qui fait une bonne part

5. Des prototypes ont déjà été réalisés en ce sens, notamment aux États-Unis : <http://www.epa.gov/otaq/technology/420f04024.pdf>. Il paraît néanmoins peu probable que ce type de réalisation soit à terme compétitif étant donné les progrès constants dans le stockage de l'électricité.

de la consommation. Pour diminuer significativement la consommation de pétrole (ou d'autres énergies fossiles) avec de tels véhicules, il conviendrait naturellement de pouvoir les recharger sur une prise de courant, ce qui ne se fait pas avec les modèles actuels, et d'utiliser une électricité produite sans énergie fossile. Certains pays comme la France sont bien placés de ce côté-là grâce à leur parc de centrales nucléaires (dont le combustible s'épuiserait plus vite que le pétrole si le monde venait à suivre notre exemple) ; d'autres plus chanceux comme la Norvège ou l'Islande bénéficient de sources d'énergie renouvelable immenses (respectivement, hydroélectricité et géothermie).

Curieusement, c'est aux États-Unis, pays recourant au charbon pour plus de la moitié de sa production d'électricité, que ce genre de véhicules est en train de voir le jour, par l'intermédiaire d'une modification de batterie pour voiture hybride. Le 31 mars 2006, l'entreprise américaine *EnergyCS* annonçait en effet qu'elle venait de livrer sa première Prius *kitée* à une administration californienne de surveillance de la qualité de l'air, dans un but d'évaluation et de test. On imagine mal en effet beaucoup de particuliers se lancer dans l'aventure pour l'instant, avec un prix de vente du kit installé prévu à 12 000 dollars⁶ lorsque la commercialisation sera effective pour le grand public... et un grand mystère planant sur l'attitude de Toyota en cas de recours à la garantie constructeur.

La modification, commercialisée sous le nom *EDrive*⁷, consiste à remplacer la batterie d'origine d'une Prius, de type nickel-hydrures métalliques et d'une capacité énergétique de 1,3 kWh (mais dont seulement une fraction est utilisée), par une batterie de type lithium-ion de plus de 9 kWh, dont environ 6,4 kWh sont réellement disponibles. Bien que considérablement plus « grosse » en capacité, la nouvelle batterie ne l'est ni en volume ni en masse dans la même proportion : logeant entièrement sous le plancher du coffre de la Prius (qui en temps normal reçoit la batterie NiMH et un volume de rangement

6. Environ 9 350 euros en mai 2006.

7. <http://www.edrivesystems.com/index.html>

supplémentaire), elle pèse seulement 70 kg⁸, quand la batterie d'origine en fait un peu plus de la moitié.

Ainsi modifiée, et équipée d'un système de contrôle de batterie propre, la voiture fait un usage de sa réserve d'énergie très différent de celui d'une Prius de série : elle cherche d'abord à utiliser l'énergie stockée dans la batterie (alors que la voiture d'origine cherche avant tout à maintenir un niveau de charge moyen), puis quand le niveau devient faible elle se comporte comme une Prius ordinaire, utilisant la capacité restante comme le véhicule standard le ferait de sa capacité d'origine.

Pour une personne qui recharge sa voiture dans son garage la nuit (une charge complète dure 9 h avec le chargeur fourni de 1 kW), cela signifie pouvoir parcourir quelques dizaines de kilomètres par jour⁹ sans brûler une goutte d'essence, si les trajets sont effectués à des vitesses faibles et si les accélérations restent modérées, ce qui peut être le cas en conduite urbaine. En effet, le dispositif conçu par *EnergyCS* ne modifie pas la gestion du système hybride de Toyota (seule celle de la batterie est, forcément, différente), et ce dernier est prévu pour exploiter les 21 kW maximum de puissance électrique de la batterie d'origine. Quelles que soient les performances de la batterie de remplacement, une puissance supérieure ne pourra donc pas être utilisée. Mais cette valeur, qui correspond peu ou prou à celle des voitures électriques que nous avons (rarement) connues dans les années 90, telles que la Citroën Saxo, suffit à un usage urbain voire périurbain.

Reste l'épineux problème de la longévité de cette batterie : en cherchant à maximiser l'autonomie électrique, *EnergyCS* recourt nécessairement à des cycles de charge et décharge plus profonds que ceux de la batterie d'origine. Or la profondeur des cycles joue un rôle essentiel dans la longévité de la batterie, c'est pourquoi Toyota a choisi de strictement contrôler ce facteur afin de pouvoir proposer une voiture dont

8. D'après un document constructeur ; une autre source (greencarcongress.com) cite 113 kg...

9. Le constructeur annonce jusqu'à 50 km (plus de 30 miles) à une vitesse inférieure à 55 km/h, ce qui donne une consommation de 130 Wh/km plausible en usage urbain.

la batterie n'est pas considérée comme une pièce d'usure, mais dure *a priori* autant que le véhicule lui-même. Si cette affirmation a longtemps recueilli un certain scepticisme, pour ne pas dire plus, chez les concurrents (ou même les clients), il semble bien que le pari de Toyota soit quasiment gagné aujourd'hui. Certes l'âge des Prius les plus anciennes est encore insuffisant pour que l'expérience soit vraiment probante en nombre d'années, les premières versions hors Japon étant apparues en 2000 ; mais certains gros rouleurs comme Andrew Grant, chauffeur de taxi à Vancouver au Canada, ont déjà largement dépassé les 300 000 km avec la batterie d'origine. *EnergyCS* se borne pour l'instant à annoncer que sa batterie devrait durer plus de cinq ans, et peut-être jusqu'à dix ans ou plus. Seul l'avenir nous le dira...

Au Canada, l'entreprise *Hymotion*¹⁰ propose elle aussi depuis peu des batteries supplémentaires pour voitures hybrides, actuellement la Prius et le tout-terrain des villes Ford Escape Hybrid. Contrairement à celle proposée par *EnergyCS*, la transformation se fait en gardant la batterie d'origine, et en y ajoutant, pour la Prius, une batterie de type lithium-polymère de capacité énergétique plus faible (5 kWh). Le kit installé coûte 9 500 dollars américains, et la livraison aux particuliers est annoncée pour octobre 2006. La documentation parle d'une autonomie maximale de 50 km dans les meilleures conditions pour la Prius, ce qu'on peut considérer comme très optimiste. Ce chiffre est en outre égal à celui avancé par *EnergyCS* pour une batterie de capacité nettement supérieure, et même en tenant compte de la capacité de la batterie d'origine.

L'AUTOMOBILE D'UN TIERS DE CHEVAL

Il est donc possible, avec une technologie actuelle, de remplacer l'usage de pétrole (ou de biocarburants) par celui d'électricité pour une fraction importante des déplacements effectués en voiture, et ceci sans rien sacrifier au confort d'utilisation de l'automobile : la conversion

10. <http://www.hymotion.com>

proposée là concerne un modèle de grande série possédant toutes les caractéristiques d'une familiale moderne (voire d'un tout-terrain...), et non une mini-voiture ultralégère ou un prototype ruineux en fibre de carbone. Le surcoût est il est vrai conséquent pour l'immédiat ; mais connaissons-nous le *véritable* coût (environnemental, humain, politique...) de cette énergie longtemps bradée qu'est le pétrole ? Rien n'est moins sûr.

Cependant, l'électricité n'étant pas directement récoltée dans la nature, mais produite à partir d'une autre source d'énergie, il est nécessaire de savoir si son utilisation en automobile est compatible avec un objectif qui devrait maintenant, vu les risques qui planent sur l'avenir climatique de la planète, s'imposer comme une priorité à tous : se passer à terme de combustibles fossiles. Et pour ceux qui ne verraient pas en quoi le réchauffement de la planète serait un problème, il n'est pas interdit de mettre en parallèle l'actualité internationale avec le fait que les deux tiers des ressources pétrolières se situent au Moyen-Orient.

Il est vrai que produire de l'électricité sans libérer ou presque de dioxyde de carbone reste possible également avec les centrales nucléaires actuelles, mais les ressources en uranium que celles-ci exigent les condamnent à la retraite avant la fin du siècle, voire bien plus tôt si leur construction se multiplie dans le monde. En l'absence d'autre solution énergétique disponible actuellement (seuls les surgénérateurs permettraient d'envisager un avenir à long terme pour le nucléaire¹¹, mais ils ont été quasi-abandonnés, et la maîtrise de la fusion reste très hypothétique), la seule possibilité sur le long terme reste l'utilisation d'énergies renouvelables. Or, celles-ci, dramatiquement minoritaires actuellement dans la consommation mondiale d'énergie, n'ont pas que des qualités ; en particulier elles sont à la fois peu concentrées (le Soleil

11. Contrairement au pétrole par exemple, la quantité d'énergie qu'on peut tirer d'un « combustible » nucléaire (qui d'ailleurs ne brûle pas) dépend *énormément* de la technique employée : la surgénération permettrait de multiplier par 50 ou plus la valeur énergétique de l'uranium. Il s'agit bien là d'un raisonnement *sur les ressources uniquement*, et ne prenant pas en compte les autres problèmes liés à l'utilisation de cette énergie, et notamment son aspect très centralisé et les problèmes de sécurité qui en découlent.

par exemple ne nous envoie qu'un kilowatt par mètre carré dans le cas le plus favorable) et intermittentes (le vent ne souffle pas toujours, le Soleil ne brille pas la nuit, etc.) La notion de ressources est par contre totalement sans objet : puisqu'on ne puise pas dans un stock, on ne risque pas de l'épuiser ! Reste donc à savoir si la *puissance* (énergie par unité de temps) requise par l'utilisation d'automobiles est compatible avec les *flux* d'énergies renouvelables dans lesquels nous baignons, et avec notre capacité plus ou moins grande à les exploiter.

Nous avons déjà vu que la puissance réellement utilisée *en moyenne* par une automobile est très inférieure à sa puissance affichée sur les prospectus, celle dont le vendeur vous parle avec gourmandise en vous laissant entendre que vous auriez tort de ne pas vous faire plaisir. Mais nous n'avons pourtant fait que des moyennes *sur le temps de fonctionnement* de l'automobile. Or c'est triste à dire, mais hormis les cas d'utilisation professionnelle intensive (ambulances, taxis...) une automobile passe le plus clair de son temps à ne rien faire, et donc à exiger une puissance strictement nulle (oublions l'alimentation de l'alarme). Quelle est la *vraie* puissance moyenne (calculée 24 h sur 24, 365 jours par an) demandée par une automobile moyenne, entre les mains d'un conducteur moyen, parcourant dans l'année un kilométrage moyen ? Deux solutions s'offrent à nous pour cette estimation : soit connaître la consommation de travail au kilomètre pour les différents types de parcours, pondérer par les kilométrages correspondants et diviser par la durée d'une année ; soit estimer le travail total du moteur, et diviser par cette même durée. Si on ne fait pas d'hypothèses trop fausses, les deux devraient donner à peu près la même chose.

Nous avons vu dans la partie 4 que la consommation de travail de notre hybride était d'environ 120 Wh au kilomètre sur route, 135 Wh/km en ville et 205 Wh/km sur autoroute. Supposons que l'automobiliste moyen parcourt 15 000 km dans l'année, avec une répartition égale route/ville/autoroute. On aboutit ainsi aux quantités de travail suivantes :

- sur route : $120 \text{ Wh/km} \times 5\,000 \text{ km} = 600 \text{ kWh}$;

- en ville : $135 \text{ Wh/km} \times 5000 \text{ km} = 675 \text{ kWh}$;
- sur autoroute: $205 \text{ Wh/km} \times 5000 \text{ km} = 1025 \text{ kWh}$ (Eh oui, rouler vite coûte cher en énergie !)

La somme de ces travaux fait 2300 kWh ; par ailleurs une année comporte $365 \times 24 = 8760 \text{ h}$, ce qui fait dans notre hypothèse une puissance moyenne utilisée :

$$2300 \text{ kWh} / 8760 \text{ h} = 0,263 \text{ kW}$$

soit à peine plus d'un tiers de cheval-vapeur !

Tentons l'autre approche pour vérifier nos calculs : 15000 km annuels, pour une voiture consommant 5 litres d'essence aux cent kilomètres, représentent $5 \times 150 = 750 \text{ litres}$ de carburant. Celui-ci ayant un contenu énergétique de 9 kWh , on arrive à $750 \times 9 = 6750 \text{ kWh}$ d'énergie thermique. Celle-ci est transformée en travail par le moteur à raison d'un rendement moyen assez inférieur au rendement maximal dans une automobile conventionnelle, mais proche du rendement maximal dans une voiture hybride optimisée sur le plan énergétique ; en prenant pour ce rendement une valeur de $1/3$ on arrive à : $6750/3 = 2250 \text{ kWh}$, d'où une puissance sur l'année (qui compte 365 fois 24 h) de $2250/(365 \times 24) = 0,257 \text{ kW}$. Pas mal ! On avait trouvé $0,263 \text{ kW}$ par l'autre méthode : il est des calculs à la louche qui tournent plus mal...

LA VOITURE SOLAIRE À TEMPS PARTIEL

Mais en quoi cette puissance ridicule de 260 W signifie-t-elle quelque chose ? N'est-elle qu'un calcul purement académique d'universitaire évaporé ? Non, car elle nous indique ce qu'il faut pouvoir extraire en moyenne d'un flux d'énergie renouvelable, comme le rayonnement solaire ou le vent, pour pouvoir se servir de cette voiture. Différentes possibilités s'offrent à nous pour le choix de l'énergie ; prenons une des mieux réparties sur la Terre : le rayonnement solaire, et considérons sa transformation en électricité par des panneaux photovoltaïques, qui produisent directement du courant continu lorsqu'ils reçoivent de la lumière.

Ceux qui sont commercialisés ont actuellement un rendement de 10 % environ, ou légèrement plus, ce qui signifie qu'un kilowatt de rayonnement solaire (correspondant à la puissance reçue par un mètre carré placé face au Soleil, par grand beau temps) donne 100 W de puissance électrique. Mais bien entendu le Soleil ne brille pas 24 h sur 24, et il ne fait pas beau tous les jours ; par ailleurs si le capteur est fixe (ce qui est presque toujours le cas pour des raisons de coût) il est plus ou moins incliné par rapport au rayonnement en fonction des heures de la journée et des saisons, ce qui ne lui permet pas d'en recevoir le maximum. Bref, rien ne vaut l'expérience quand les paramètres sont trop nombreux pour être pris en compte !

À Grenoble, un particulier a réalisé dès 1998 une centrale photovoltaïque raccordée au réseau afin de produire l'électricité nécessaire à son logement. Ce précurseur, Vincent Fristot, publie sur son site internet¹² un bilan de consommation et de production ; nous avons donc là des éléments tangibles pour évaluer la quantité d'énergie électrique réellement obtenue par unité de surface de capteur, dans les conditions d'ensoleillement qui sont celles de Grenoble ; tout au plus peut-on penser que cette installation, relativement ancienne pour un domaine en évolution très rapide, serait aujourd'hui moins chère et un peu plus performante. Sa production annuelle avec 10 m² de capteurs est d'environ 1 200 kWh, soit une puissance moyenne sur l'année (nuits comprises !) de 137 W, ou approximativement 14 W par mètre carré. Autrement dit, une installation deux fois plus importante devrait produire suffisamment d'électricité (si elle ne sert qu'à cela !) pour faire rouler notre voiture, à condition bien sûr de savoir la stocker à bord.

L'estimation que nous venons de faire est cependant un peu brutale : contrairement à la centrale de Vincent Fristot qui alimente directement les appareils électriques de son appartement, ou d'autres puisqu'elle est reliée au réseau, l'utilisation d'électricité pour faire avancer une voiture

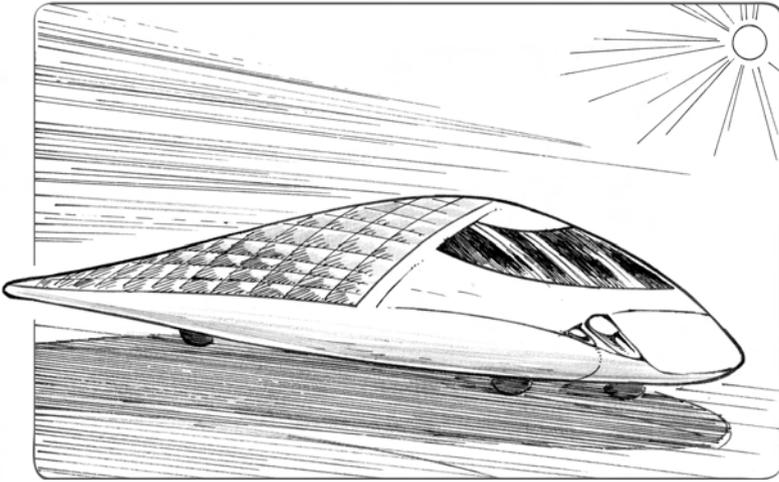
12. <http://toitsolaire.chez-alice.fr/>

nécessite la charge puis la décharge d'une batterie, opérations qui se font avec une certaine perte d'énergie sous forme de chaleur. Le rendement de l'opération dépend du type de la batterie, et des intensités de charge et de décharge (plus elles sont fortes, plus il chute) ; il peut être de 80 % dans un sens, ce qui ne fait plus, hélas, que 64 % si on compte les deux ($0,8 \times 0,8 = 0,64$). Cela signifie que des 14 W produits par mètre carré, il ne reste plus que 9 W environ au niveau des roues. En tenant compte de ces pertes, on arrive à une superficie de capteurs de 25 à 30 m², pour parvenir à alimenter la voiture.

Mais en l'état actuel de la technique, c'est un objectif assez utopique si on désire accomplir tout type de trajet au volant de cette automobile : il vaut bien mieux, compte tenu des limites en puissance et capacité des batteries, limiter l'utilisation de l'électricité aux vitesses plutôt faibles et l'autonomie à quelques dizaines de kilomètres. Dans ce cas, le moteur thermique ne serait utilisé que pour accomplir des trajets longs ou demandant une forte puissance, sur autoroute par exemple. De plus, dans l'hypothèse d'une répartition égale des distances parcourues ville/route/autoroute, l'autoroute compte pour 46 % des besoins en énergie selon notre calcul : c'est donc une puissance moyenne de 138 W environ (arrondissons à 140) dont nous avons besoin si nous excluons l'autoroute¹³, soit une surface de capteur d'environ 15 m².

La voiture solaire à temps partiel existe donc déjà, potentiellement, avec la technique disponible aujourd'hui. Elle ne porte pas ses cellules solaires sur le toit, solution peu intéressante vu le peu de surface disponible et l'orientation non contrôlable par rapport au Soleil. Elle est simplement une automobile hybride « augmentée », privilégiant l'usage de l'électricité sur des distances courtes et pour des vitesses modérées. Elle se contente de 15 m² de panneaux solaires pour parcourir 10 000 km par an dans ces conditions moyennement restrictives, qui sont le quotidien de beaucoup d'automobilistes. Et trimballe ses 1,4 tonne de matériaux divers, en offrant toutes les commodités de

13. On pourrait aussi exclure la route si les distances parcourues dépassent l'autonomie autorisée ; cela dépend de l'usage de l'automobile.



40 | La voiture solaire que vous n'aurez jamais.

l'automobile familiale moderne, sans imposer aucun sacrifice autre que financier.

Justement, à quelle altitude se situe le prix de revient au kilomètre du « carburant » électricité photovoltaïque ? Tout cela n'est-il qu'un pur délire pour nabab en quête de rachat spirituel par la voie technico-écologique tendance *Silicon Valley* ? Les réalisations de centrales photovoltaïques sur habitation sont encore rares en France, mais on peut néanmoins commencer à se faire une idée du coût au kilowatt-heure produit grâce aux agences comme l'Ademe¹⁴ ou à des associations comme Hespul¹⁵. On peut également se baser sur les coûts publiés par Vincent Fristot pour son installation grenobloise, même si celle-ci a été réalisée au tout début du développement de ce marché, et pour un tarif aujourd'hui peu compétitif. À raison de 6 000 € investis environ¹⁶, pour une production annuelle de 1 200 kWh sur 20 ans (les capteurs peuvent normalement durer nettement plus longtemps), le coût du

14. <http://www2.ademe.fr>

15. <http://www.hespul.org>

16. Cette somme représente ce qui resta à la charge de l'utilisateur après subventions.

kilowatt-heure est de $6000/(1200 \times 20) = 0,25 \text{ €}$. Qu'en est-il hors subventions ? D'après des documents disponibles sur le site de l'Ademe en 2006, un watt de puissance crête¹⁷ photoélectrique coûte *au total* (si le particulier qui l'installe ne perçoit aucune aide), et dans le cas d'un raccordement au réseau, aux alentours de 6 € ; comme il produit sur 20 ans environ 20 kWh, on aboutit sur cette période à un coût de $6/20 = 0,30 \text{ € par kWh}$. La faible différence avec le chiffre précédent traduit le coût élevé de l'installation grenobloise prise en exemple, dû à son ancienneté, et l'évolution très rapide du marché. Cela reste néanmoins plus cher (environ trois fois, si on ne tient pas compte des aides) que le prix payé à EDF, naturellement... mais pas plus élevé que le prix auquel l'État s'engage désormais à acheter aux particuliers l'électricité produite de cette façon, sur un contrat de 20 ans ! Le Premier ministre français a en effet annoncé le 15 mai 2006 que le tarif d'achat de l'électricité photovoltaïque passerait de 0,15 à 0,30 € par kWh, voire à 0,55 € par kWh dans le cas d'une intégration architecturale¹⁸.

Maintenant, que devient ce coût énergétique ramené au kilomètre, dans le cadre de l'utilisation automobile envisagée ? En ville comme sur route, nous avons estimé une consommation énergétique d'environ 0,12 kWh au kilomètre. Afin de tenir compte des pertes au niveau des cycles de charge/décharge et pour garder une marge de sécurité, considérons qu'il faut produire 0,20 kWh par kilomètre parcouru. Pour le particulier qui refuse catégoriquement toute aide, on aboutit ainsi à un coût de $0,20 \times 0,30 = 0,06 \text{ € au kilomètre}$, ou 6 € aux cent kilomètres, soit l'équivalent de 4,6 litres de sans-plomb à 1,30 € le litre. En acceptant l'aide qu'il mérite bien, sous forme de crédit d'impôt ou de subventions diverses, et qui couvre généralement plus de la moitié du prix de l'installation, notre automobiliste semi-solaire peut voir ce chiffre encore considérablement réduit... qui a parlé d'utopie pour la voiture solaire ?

17. La *puissance crête* est la puissance électrique que le capteur fournit pour l'ensoleillement maximal.

18. <http://www.enr.fr/DL/presse/photovoltaïque-18-05-2006.pdf>

Maintenant, descendons de notre petit nuage « écolo-bobo » et alimentons notre voiture hybride rechargeable à l'électricité ordinaire, à 80 % nucléaire chez nous : le prix de revient du kWh est divisé par trois... et nous pouvons alors nous déplacer, en ville ou sur route, pour l'équivalent en euros d'un litre et demi de sans-plomb aux cent kilomètres, au tarif 2006. Cela devient vraiment tentant, y compris pour ceux que la pollution des villes n'émeut même pas.

Mais il est vrai que nous n'avons absolument pas tenu compte du coût de la batterie dans le véhicule qui, si elle est vendue 9 000 € et dure 6 ans pour prendre des hypothèses compatibles avec l'exemple donné par *EnergyCS*, revient à 1 500 € par an soit 0,15 € supplémentaire au kilomètre, en supposant que 10 000 des 15 000 kilomètres annuels sont parcourus à l'électricité solaire. Cela change tout, mais doit pourtant être relativisé : d'une part, le coût d'une technique à peine émergente est nécessairement élevé, mais amené à baisser ; et d'autre part, ce coût que nous pouvons juger exorbitant, pour simplement avoir la possibilité de rouler partiellement à l'électricité (solaire ou non) dans une voiture « normale », est tout à fait comparable aux sommes dépensées en carburant. À raison d'un litre de super à 1,30 €, 1 500 € représentent le budget de carburant d'un automobiliste parcourant annuellement 15 000 km dans une automobile consommant 7,7 litres aux cent kilomètres. Nous avons simplement pris l'habitude d'un pétrole bon marché, et refusons de voir que cela ne va pas durer.

18

La voiture électrique

Parce que les moteurs électriques ont un rendement bien supérieur à celui des moteurs thermiques, que le prix des installations photovoltaïques baisse, et que le kWh ainsi produit n'est pas assujéti à la TIPP¹, rouler (au moins partiellement) à l'énergie solaire devient techniquement envisageable et financièrement soutenable. Et ceci, non dans de grandes pelles à tarte monoplaces couvertes de cellules photovoltaïques et montées sur roues de vélo, mais bien dans une voiture familiale hybride disponible sur le marché depuis plusieurs années, à la batterie modifiée. Les biocarburants sont également une forme d'énergie solaire renouvelable, mais dont le rendement est assez catastrophique si l'on tient compte de toute la chaîne, et notamment des intrants utilisés par l'agriculture intensive, à base d'hydrocarbures. En conséquence, les superficies cultivables que les biocarburants exigent, sans parler des ressources en eau qui commencent à poser problème dans de nombreuses régions, ne leur permettront jamais de remplacer chez nous les carburants pétroliers. L'électricité tient déjà là une belle revanche, après

1. Taxe intérieure sur les produits pétroliers

avoir été écartée de la circulation aux débuts de l'ère automobile par l'abondance du pétrole. Va-t-elle pouvoir enfin se développer, voire à terme rendre obsolète le recours aux moteurs thermiques ?

VRAIS ET FAUX PROBLÈMES

Tout le monde le sait, la voiture électrique pêche par ses batteries. On ne peut pas aller très loin avec, et « faire le plein » demande des heures. Le moteur n'a, lui, que des avantages par rapport aux moteurs thermiques : légèreté, propreté, silence, réversibilité, absence d'entretien, longévité. Y a-t-il un espoir pour qu'enfin des batteries dignes de lui l'autorisent à exprimer ses qualités ailleurs que dans les machines à laver, les ventilateurs ou tout ce qui peut s'accommoder d'un fil à la patte ?

Augmenter l'autonomie d'une voiture électrique ne peut se faire qu'en stockant à bord davantage d'énergie, en aucun cas les lois de la physique n'autoriseront une automobile à se déplacer « gratuitement ». Nous venons d'estimer cette énergie nécessaire dans le cas d'une voiture hybride moyenne, et avons trouvé un résultat de l'ordre de 150 Wh au kilomètre, en considérant une proportion égale de ville/route/autoroute. Pour obtenir une autonomie de 500 km, il est donc nécessaire de disposer d'une batterie capable de se décharger de $500 \times 150 = 75\,000 \text{ Wh}$ ou 75 kWh (oublions pour l'instant l'incidence du poids de la batterie sur la consommation). Compte tenu de son rendement qui n'est pas égal à 1, et des menaces que font peser les décharges complètes sur sa durée de vie, on peut estimer que sa capacité énergétique réelle (celle qui s'obtient en multipliant sa tension en volts par sa capacité en ampères-heures) devrait nettement excéder 100 kWh. Une batterie au plomb courante offre une densité énergétique de 35 Wh/kg environ ; la masse de 3 t qui correspondrait à une telle capacité lui ordonne de ne pas y penser, même en rêve. Les nouvelles familles de batteries apparues depuis peu, dans nos ordinateurs portables, téléphones ou appareils photo numériques, ouvrent-elles des perspectives moins sombres ?

Il ne paraît pas du tout déraisonnable, d'un point de vue technique, d'accepter une batterie de 300 kg dans une voiture électrique de taille moyenne² : rappelons-nous que la seule *différence* de masse entre deux Volkswagen Golf actuelles, de la même puissance confortable de 125 kW, l'une équipée d'un moteur essence 1.4 TSI et l'autre d'un TDI, dépasse 200 kg. Sachant qu'à puissance identique un moteur électrique est moins lourd qu'un moteur à essence³, que la transmission peut être considérablement simplifiée (embrayage, boîte de vitesses superflus), qu'un réservoir de carburant rempli pèse quelques dizaines de kilogrammes et qu'enfin les batteries peuvent être réparties dans le véhicule beaucoup plus librement que ne peut l'être un moteur thermique, cette masse peut être considérée comme un non-problème. Embarquer plus de 100 kWh dans 300 kg nous amène à une densité énergétique de plus d'un tiers de kWh par kg, disons 350 Wh/kg, environ dix fois les performances des batteries au plomb. Où en sont les technologies récentes actuellement sur le marché ?

De toutes les familles existantes, ce sont celles à base de lithium, connues sous le terme *lithium-ion* ou *lithium-polymère* (deux familles proches) qui semblent les plus prometteuses. Ce n'est pas un hasard : le lithium est le métal le plus léger (presque deux fois moins dense que l'eau), situé juste sous l'hydrogène dans la classification périodique des éléments. Or le stockage de l'énergie se fait par le mouvement des charges électriques portées par les ions lithium à l'intérieur de la batterie ; la masse de l'ion n'intervient pas dans le processus. On a donc intérêt à ce qu'elle soit la plus faible possible pour qu'à un même transfert d'énergie (processus élémentaire à l'origine de la capacité énergétique de la batterie), soit associée la masse la plus faible possible. De plus, le « potentiel standard » du lithium⁴, égal à $-3,04$ V, l'un des plus bas parmi ceux de tous les éléments, assure qu'une grande quantité d'énergie peut être stockée par atome participant à la réaction

2. Les voitures électriques présentes et passées en ont souvent emporté davantage ; mais justement parce qu'elles sont critiquées pour leur poids, faisons mine de ne pas les connaître.

3. Le moteur électrique arrière d'un *Lexus RX 400 h* pèse 50 kg pour 50 kW, avec le différentiel.

4. Caractéristique chimique importante pour le stockage d'énergie, contrairement à la masse.

électrochimique, indépendamment de la masse de celui-ci. En réalité, si tous les éléments chimiques de la batterie avaient la densité du lithium, la densité énergétique serait même tellement ébouriffante qu'on aurait depuis longtemps oublié le pétrole, mais il est associé à d'autres métaux ou à du carbone, nettement plus lourds que lui.

	IA																										0
1	H																										He
2	Li	Be																B	C	N	O	F	Ne				
3	Na	Mg				Al	Si	P	S	Cl	Ar																
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr									

41 | Troisième de la liste des éléments, le lithium est le plus léger des métaux.

De plus, les batteries au lithium ont un rendement de charge/décharge très élevé, qui les rend très séduisantes pour des applications où l'efficacité énergétique est un critère important. En revanche, elles peuvent poser des problèmes de sécurité, une augmentation accidentelle de température dans l'accumulateur pouvant entraîner le déclenchement de réactions exothermiques⁵ conduisant jusqu'au point de fusion du lithium (180,5 °C), ce qui accélère encore le processus et conduit à une explosion de la batterie. Quelques accidents ont été constatés sur de petits appareils électroniques comme des téléphones portables ou des ordinateurs ; mais la parade semble trouvée d'après certains fabricants⁶.

On peut avoir une idée des performances de telles batteries en consultant les fiches techniques mises à disposition par ceux qui les fabriquent, comme la société SAFT⁷. L'entreprise propose, dans la catégorie des produits pour automobile, des batteries de caractéristiques différentes suivant qu'elles sont destinées à équiper des véhicules purement électriques ou des hybrides : en effet le cahier

5. Qui dégagent de la chaleur.

6. <http://www.valence.com/saphion.asp>

7. <http://www.saftbatteries.com>

L'ULTRA-SPORTIVE ÉLECTRIQUE

Plus d'un siècle après la *Jamais Contente*, l'automobile ultra-performante est encore électrique à batteries. Elle se nomme *Venturi Fetish*, est fabriquée à la main et sur commande à Monaco pour quelques privilégiés, et passe de 0 à 100 km/h en 4,5 s, soit mieux qu'une Porsche 911 Turbo de 420 chevaux. Sa coque est en fibres de carbone, et elle emporte 350 kg de batteries lithium-ion (pour une énergie de 58 kWh) lui conférant une autonomie de 250 à 350 km suivant l'utilisation. Une charge complète dure 3,5 h avec une prise de 80 A... faute de mieux, car les batteries accepteraient une intensité bien supérieure. Et pour un coût, au tarif heures creuses d'EDF, de moins de 5 euros TTC.

Le prix du miracle ? 450 000 euros, hors taxes. Trop cher ? Tout dépend par rapport à quoi... (Éléments de réponse donnés à la fin de ce chapitre.)

des charges n'est pas le même, dans le premier cas on recherche avant tout à stocker une grande quantité d'énergie alors que dans le second c'est davantage la puissance qui sera recherchée. Une lecture des fiches techniques permet de rapidement calculer quelques ordres de grandeur d'énergie massique ; on obtient au mieux⁸ 150 Wh/kg pour les batteries destinées aux voitures électriques, et 100 Wh/kg pour celles destinées aux hybrides non rechargeables.

Pas de quoi concurrencer encore la solution thermique donc (un facteur 3 supplémentaire serait le bienvenu !) mais le but ne paraît pas complètement hors de portée, si la technologie continue à évoluer comme elle l'a fait ces dernières années. Car la limite théorique, de 750 Wh/kg⁹, n'est pas encore atteinte ! Mais après tout, est-ce vraiment nécessaire de disposer d'une autonomie de 500 km ? Certains esprits perfides pourraient même faire remarquer que des voitures prestigieuses, équipées de moteurs à essence particulièrement gloutons,

8. Les densités énergétiques des meilleures batteries (à usage non nécessairement automobile) atteignent aujourd'hui 200 Wh/kg.

9. *Accumulateurs, considérations théoriques*, J. Robert et J. Alzieu, Techniques de l'Ingénieur, D 3 351.

n'ont pas cette autonomie : quand on consomme plus de 20 litres aux cent kilomètres en ville (si, c'est possible), il faudrait un réservoir de plus de 100 litres que la plupart n'ont pas... Et c'est ici que nous butons sur l'autre reproche fait aux voitures électriques : leur temps de recharge. Car si chacun accepterait de s'arrêter tous les 200 km (c'est même conseillé) pour « refaire le plein » d'électricité, personne n'est prêt à attendre plusieurs heures que la voiture se recharge. Est-ce inéluctable, et pourquoi cette lenteur ?

Charger une batterie, c'est lui communiquer une énergie (transformer de l'énergie électrique en énergie chimique, plus un peu de chaleur). Le faire vite nécessite donc une grande *puissance* de charge, puisqu'une puissance est une énergie par unité de temps. Or, nous avons vu que c'est justement en ce domaine, plus encore que dans celui de la densité d'énergie, que les batteries modernes ont fait le plus de progrès, en particulier sous l'impulsion de la mise au point des voitures hybrides. Il y a donc un espoir ! Il est vrai que nous avons jusque-là surtout parlé des puissances de *décharge*, nécessaires à l'aide ponctuelle du moteur thermique *via* le moteur électrique, mais il se trouve qu'un dispositif électrochimique de stockage comme une batterie est, en première approximation, symétrique : s'il se décharge vite, c'est qu'il peut se charger vite également. Des spécialistes de la question trouveraient peut-être à redire de cette simplification un peu rapide, mais tant qu'on ne s'intéresse qu'aux ordres de grandeur, ce raisonnement reste valable.

Comment savoir le temps de charge d'une batterie ? Il suffit de connaître l'énergie qu'elle contient, et de diviser par sa puissance ; on obtient alors nécessairement un temps, qui sera en heures si l'énergie est en kWh et la puissance en kW. Essayons avec une batterie de Prius (sans doute pas très adaptée à une voiture électrique, mais c'est juste pour voir), et une charge complète :

- énergie : 1,3 kWh ;
- puissance : 21 kW ;
- temps de charge : $1,3/21 = 0,062 \text{ h} = 3,7 \text{ min} !$

Il y a de quoi avoir un choc ! Nous aurait-on menti sur l'impossibilité de charger une batterie rapidement ? Ou bien est-ce peut-être parce que cette batterie est toute petite (pour une voiture électrique) qu'elle peut se charger aussi rapidement ? Erreur : le temps de charge *ne dépend pas de la taille de la batterie*, car puissance comme énergie sont proportionnelles à la masse. Il suffit d'ailleurs de consulter les fiches techniques des constructeurs pour s'en persuader, puisqu'ils indiquent les puissances massiques (ou puissances spécifiques) en W/kg et les énergies massiques en Wh/kg.

Où est l'erreur, alors ? Tout d'abord, il est plus prudent de prendre une batterie adaptée à l'usage prévu (ici une voiture électrique, non une hybride) ; si l'on consulte une fiche technique d'un produit proposé par SAFT pour cette utilisation, on peut trouver pour une batterie lithium-ion une puissance massique de 660 W/kg pour une énergie massique de 150 Wh/kg. Ce qui donne un temps de charge de l'ordre $150/660 = 0,227 \text{ h} = 13,6 \text{ min}$, arrondissons à un quart d'heure. À quoi il faut ajouter un bémol : la puissance indiquée n'est garantie que pour une durée de 30 s, car une puissance élevée maintenue sur un temps long fait chauffer la batterie ; il convient donc de faire une différence entre les puissances disponibles temporairement, qui peuvent être très élevées, et les puissances maintenues en régime de croisière qui doivent être plus modérées. On sait d'ailleurs que les « courants de démarrage » indiqués sur les banales batteries au plomb des automobiles classiques correspondent à ce qu'elles sont capables de débiter pendant quelques secondes, le temps de démarrer le moteur thermique, et pas à ce qu'elles peuvent fournir en continu.

N'empêche, avec la technologie *actuelle*, et moyennant éventuellement quelques précautions sur le refroidissement de l'accumulateur, *via* une ventilation appropriée, la durée de charge typique d'une batterie est bien le quart d'heure, pas davantage ! On peut d'ailleurs trouver au supermarché des chargeurs de piles ultrarapides proposant une recharge en 15 min, c'est marqué dessus. Et même pas avec du lithium-ion, mais de bêtes NiMH ; une fois qu'on a compris que cette

durée ne dépend pas (hormis problèmes de refroidissement) de la taille de l'accumulateur, on se demande forcément pourquoi il n'y a pas davantage de voitures électriques.

La raison est simple : *c'est à cause de la prise*. Même avec « seulement » 50 kWh (soit la moitié de ce que nous avons estimé pour avoir une autonomie « raisonnable »), transférer une telle énergie en un quart d'heure nécessite une prise de courant capable de supporter $50 \times 4 = 200 \text{ kW}$ de puissance électrique, soit presque un millier d'ampères sous 220 V. Ce n'est pas un cordon d'aspirateur, ou même de cuisinière électrique, qui sera capable de supporter cela ; la voiture n'y est plus pour grand-chose, c'est la faute à la prise. Et même avec un très gros cordon, pas question de charger en un quart d'heure à la maison : cette fois, c'est la puissance du contrat souscrit qui s'y oppose. Chez soi, une voiture électrique se rechargera toujours de préférence la nuit (où par ailleurs la demande d'électricité est faible, ce qui permet d'équilibrer la production). En revanche, rien n'empêche d'imaginer des prises spéciales, très sécurisées, en des lieux commodes pour l'automobiliste : par exemple des stations-service. Mine de rien, quand on fait le plein de carburant liquide pour nos voitures à moteur thermique, avec le débit des pompes à notre disposition ce sont plusieurs *mégawatts* de puissance qui transitent par le pistolet.

LA PILE À COMBUSTIBLE

Face à la difficulté de stocker « directement » l'électricité (en fait, sous une forme chimique) dans des batteries à l'intérieur d'un véhicule, on s'est demandé, depuis les débuts de l'automobile, s'il n'y avait pas moyen de la produire à bord à partir d'une autre source d'énergie. C'était la raison d'être des hybrides comme la Lohner-Porsche ou la Krieger dans les années 1900, qui à l'époque se préoccupaient peu d'économiser le pétrole. Depuis une dizaine d'années, on entend beaucoup parler de *piles à combustible* qui permettent, notamment à partir de dihydrogène, la production embarquée d'électricité et donc l'alimentation de moteurs électriques.

UNE BATTERIE RÉVOLUTIONNAIRE ?

Le 29 mars 2005, le fabricant japonais Toshiba a fait sensation en annonçant* être parvenu à réaliser des batteries au lithium capables de se charger à 80 % de leur capacité en une minute seulement, grâce notamment à l'utilisation de nanoparticules d'une centaine de nanomètres de diamètre, qui empêcheraient de se produire des réactions chimiques apparaissant habituellement lorsqu'on dépasse une certaine vitesse de charge, et qui sont destructrices pour la batterie.

Même s'il faut rester prudent face à de telles annonces, tant qu'aucun produit n'est actuellement testable sur le marché, un tel saut technologique révolutionnerait l'usage des batteries en leur ouvrant des domaines de puissance réservés jusque-là aux condensateurs, autres dispositifs de stockage électrique capables de puissance très élevées mais beaucoup trop lourds par rapport à l'énergie stockée. Le prototype de Toshiba aurait une énergie volumique d'environ 200 Wh par litre, dans le bas de la fourchette des batteries au lithium traditionnelles, et correspondant à une énergie massique proche de 100 Wh/kg, elle aussi plutôt faible. Mais ce temps de charge record signifierait une puissance de l'ordre de 5 kW/kg. De plus, cette technologie assurerait également aux batteries une longévité exemplaire, avec une perte de capacité de seulement 1 % au bout de 1000 cycles.

Transposée à une voiture hybride comme la Prius, cette technologie permettrait d'obtenir une batterie de capacité énergétique identique à l'actuelle pour une quinzaine de kilogrammes, et surtout sa puissance dépasserait celle du moteur électrique principal, MG2. La récupération d'énergie au freinage pourrait alors se faire beaucoup plus efficacement, même sur des freinages appuyés, et le «handicap» de la solution retenue par Toyota (nécessité d'un gros moteur électrique, plus lourd et plus cher) se transformerait finalement en avantage pour l'efficacité énergétique. À suivre...

En attendant, les choses bougent pour les pures électriques : on attend avec impatience de voir aboutir les projets** des industriels français Dassault et Bolloré, chacun avec des batteries de nouvelle génération ; au Japon le constructeur Subaru annonce*** des tests d'une version électrique de sa petite citadine R1, rechargeable à 80 % en un quart d'heure.

* http://www.toshiba.co.jp/about/press/2005_03/pr2901.htm

** Cleanova (<http://www.cleanova.com/public/sve>)

et BlueCar (<http://www.batscap.com>).

*** http://www.greencarcongress.com/2006/06/tepco_and_fuji.html

ENTRE LES CONDENSATEURS ET LES BATTERIES : LES SUPERCONDENSATEURS

Lorsqu'on parle de stockage direct de l'électricité, c'est un raccourci de langage car les mécanismes mis en jeu sont divers et en réalité indirects.

Les piles ou batteries utilisent des réactions chimiques d'oxydoréduction se produisant à la surface d'électrodes et rendues possibles par le déplacement d'ions dans un électrolyte, souvent liquide : ce sont des accumulateurs électrochimiques.

Les condensateurs utilisés en électronique sont constitués d'électrodes conductrices séparées par un isolant, et ne mettent en jeu aucune réaction chimique : c'est le déplacement des charges électriques dans les conducteurs qui constitue le mécanisme de stockage. Leurs temps de charge et décharge sont beaucoup plus courts que ceux des batteries (de l'ordre de la milliseconde), mais ils ne conviennent pas pour stocker des quantités importantes d'énergie car leur masse est beaucoup trop importante et ils se déchargent spontanément très vite. Seule leur puissance peut être très élevée, grâce à leur rapidité.

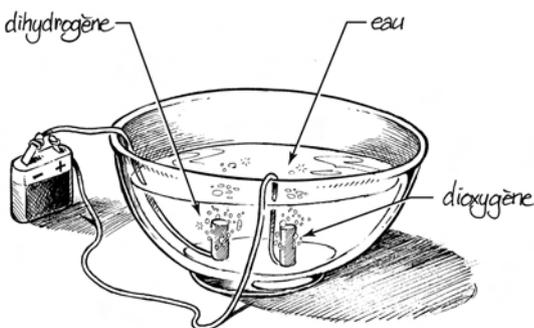
À mi-chemin entre ces deux catégories, les « supercondensateurs », inventés à la fin des années 50, font appel à un électrolyte comme les batteries, mais pas à une réaction chimique : c'est le déplacement des ions au sein de l'électrolyte, et plus spécialement la formation d'une double couche ionique à la surface des électrodes, qui constitue le mécanisme de stockage énergétique. Une très grande porosité des électrodes permet d'augmenter la surface de celles-ci, donc la quantité d'énergie stockée : là encore, le problème géométrique de rapport surface/volume s'avère primordial, et constitue un domaine de choix pour les nanotechnologies. L'absence de réaction chimique confère de plus aux supercondensateurs une longévité quasi infinie.

Ils héritent également de propriétés intermédiaires à celles des batteries et des condensateurs, ayant un temps de charge/décharge de l'ordre de la seconde : à masse égale, ils sont beaucoup plus puissants que les batteries, mais beaucoup moins que les condensateurs. Et leur densité énergétique de l'ordre de quelques Wh par kg reste faible par rapport à celle des batteries, mais forte par rapport à celle des condensateurs. Cela en fait de bons candidats pour le stockage et la restitution rapide de quantité d'énergies relativement faibles, comme lors du freinage et de l'accélération des véhicules électriques et hybrides.

Appliquées à l'automobile, elles semblent être le Saint-Graal de la voiture propre. Pensez donc : des voitures n'utilisant pas de pétrole, qui glissent en silence en ne rejetant qu'un peu de vapeur d'eau ! Ces véhicules existent bel et bien, il en existe quelques dizaines en circulation autour du globe ; des autobus fonctionnent également sur ce principe, en test dans plusieurs villes d'Europe dont Londres, Madrid ou Stuttgart, dans le cadre du programme européen *CUTE*¹⁰. Certains constructeurs automobiles ont même suggéré qu'il était inutile de se lancer dans le développement des hybrides thermiques/électriques, puisque la pile à combustible (souvent PAC en abrégé) allait régler tous les problèmes d'approvisionnement en énergie et de pollution du transport routier. Info ou intox ?

Une vieille connaissance

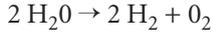
La pile à combustible n'a rien d'une nouveauté : avant même l'invention de l'accumulateur électrique plomb-acide, Sir William Grove, avocat au Royaume-Uni, en découvre le principe au milieu du XIX^e siècle. Son fonctionnement repose sur la réversibilité de la réaction d'électrolyse de l'eau. Lorsqu'on plonge des électrodes de platine dans de l'eau, portées à une différence de potentiel supérieure à 1,23 V, on observe un dégagement de bulles sur chacune d'elles. D'un côté, c'est du dioxygène gazeux qui se forme ; de l'autre, du dihydrogène gazeux.



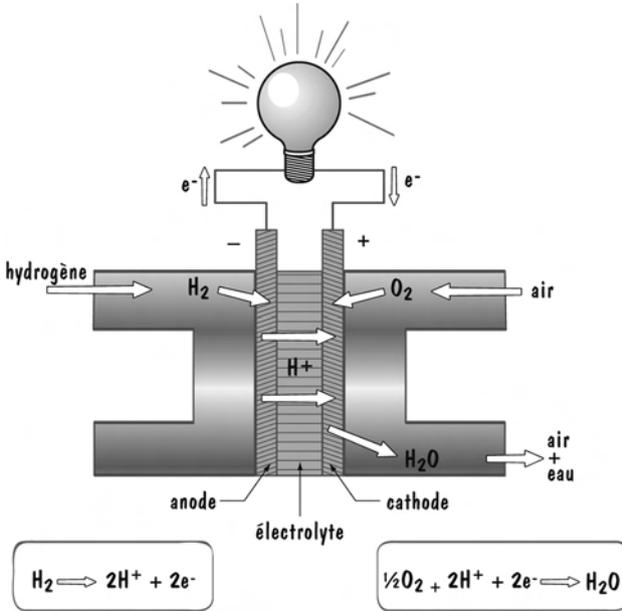
42 | Électrolyse de l'eau.

10. *Clean Urban Transport for Europe* (transport urbain propre pour l'Europe).

La réaction chimique qui se produit traduit la décomposition des molécules d'eau en molécules de dihydrogène et de dioxygène :



Inversement, si maintenant on met en présence le dioxygène et le dihydrogène, on peut soit obtenir une simple combustion dégageant de la chaleur, soit, en présence d'un catalyseur comme le platine, obtenir un générateur d'électricité (comme une pile, d'où le nom !) et accessoirement de chaleur. Bien entendu cela ne se fait pas « tout seul », il est nécessaire d'introduire séparément le dioxygène et le dihydrogène à deux entrées d'une *pile à combustible*, qui finalement réalise le même genre d'opération qu'une pile (ou batterie) ordinaire, c'est-à-dire produire un courant électrique grâce à une réaction chimique. À ceci près que les espèces chimiques participant à la réaction ne sont pas stockées dans la pile, mais à l'extérieur, et sont mises en présence seulement au moment voulu.



43 | Schéma de fonctionnement d'une pile à combustible.

Le dioxygène étant présent dans l'air, il peut être considéré comme « gratuit » et il ne reste donc plus qu'à se procurer une réserve de dihydrogène pour pouvoir, avec une pile à combustible, disposer d'un générateur électrique. En toute rigueur, il existe également d'autres combustibles possibles que le dihydrogène pour ces piles : on peut par exemple utiliser le méthanol, ou même des hydrocarbures. Dans ce cas cependant, la pile ne rejette pas que de l'eau mais également du dioxyde de carbone et éventuellement d'autres produits.

UN MOTEUR À EAU ?

Si une pile à combustible utilise du dioxygène et du dihydrogène pour donner de l'électricité et de l'eau, ainsi qu'un peu de chaleur, et que l'eau peut à nouveau être décomposée en dihydrogène et dioxygène par électrolyse, n'a-t-on pas inventé ainsi le moteur à eau, voire le moteur perpétuel ? Absolument pas : on dépensera toujours plus d'énergie pour reformer le dihydrogène et le dioxygène par électrolyse qu'on n'en obtiendra au moment de leur réaction dans la pile. Toujours la faute à notre mauvaise copine l'entropie, qui nous dit qu'au mieux on ne gagne rien, l'énergie se conservant sous la même forme (cas du mouvement des planètes par exemple, qui à notre échelle est immuable), et qu'au pire on dégrade toute l'énergie « ordonnée » en chaleur, ce qui se passe en général dès qu'on est trop pressé (par exemple, charger une batterie trop vite peut la faire exploser !) Il n'y a pas de miracle en physique, juste des règles qu'il faut savoir utiliser au mieux. Et le raisonnement sur le « cycle de l'eau » a d'ailleurs son équivalent pour les moteurs thermiques à hydrocarbures : rien n'interdit en principe, en récoltant le dioxyde de carbone et l'eau qu'ils rejettent à l'échappement, de reformer les hydrocarbures du départ. Mais outre le côté peu pratique de l'affaire, on ne ferait bien entendu que dépenser un peu plus d'énergie, en pure perte.

Il y a plusieurs avantages à produire de l'électricité de cette manière par rapport à la solution d'un groupe électrogène, c'est-à-dire un moteur thermique associé à un générateur électrique : le seul rejet d'une pile à dihydrogène, en dehors du courant électrique recherché et d'un peu de chaleur, est de l'eau pure, donc pas de pollution ; de plus le fonctionnement de la pile est silencieux et ne produit aucune

vibration contrairement à celui du moteur thermique. En outre, le rendement de conversion de l'énergie chimique en énergie électrique est excellent car il n'est pas limité par le rendement de Carnot : il dépend de la température mais il peut être, théoriquement, égal à 83 % à 25 °C¹¹. Le moteur thermique est enfoncé¹².

Le dihydrogène a par ailleurs des caractéristiques physico-chimiques qui peuvent sembler séduisantes : son contenu énergétique par unité de masse est bien plus élevé que celui du pétrole ou de ses dérivés, puisque son pouvoir calorifique inférieur vaut 120 MJ/kg contre 42 MJ/kg pour le pétrole. Il peut donc sembler intéressant, à première vue, de s'en servir comme « source » d'énergie transportable, même si, contrairement au pétrole, il n'est pas extrait du sous-sol ni de quelque autre endroit, mais doit être fabriqué de façon industrielle.

Les raisons d'un long sommeil

Cependant, les piles à combustible sont restées pendant longtemps des curiosités de laboratoire, car incapables de fournir une puissance suffisante pour avoir une quelconque application technologique ; le premier prototype à atteindre quelques kilowatts vit le jour en 1953 grâce aux travaux de Francis T. Bacon en Angleterre. Ce sont les missions spatiales américaines, peu avares en dollars, qui permirent à cette technologie très coûteuse (notamment à cause de l'emploi de platine) de se développer, et la première utilisation pratique des piles à combustibles fut l'alimentation électrique des capsules spatiales.

Dans le domaine automobile, où les puissances nécessaires se comptent en dizaines de kilowatts, installer une pile à combustible à

11. *Piles à combustible*, Techniques de l'Ingénieur, D 3 340-6.

12. La définition du rendement d'une pile à combustible, ou d'un moteur thermique, se base sur le « pouvoir calorifique inférieur » (en abrégé PCI) du combustible, qui est l'énergie dégagée par la réaction (encore appelée PCS, pouvoir calorifique supérieur) *moins* celle qui pourrait être récupérée par condensation de l'eau produite, opération généralement irréalisable. Cette définition est contestable (elle aboutit à des rendements théoriques supérieurs à 1 pour certains types de piles, ce qui n'a aucun sens physique) et avantage le dihydrogène par rapport aux autres combustibles car la différence entre son PCS et son PCI est plus élevée que pour les combustibles traditionnels. Autrement dit, si les rendements étaient correctement exprimés en fonction du PCS, ils chuteraient de 6 % pour l'essence, mais de 18 % pour le dihydrogène.

bord revenait à l'époque, littéralement, à construire une usine à gaz dans le véhicule. Pourtant, dès 1970 un ingénieur de la compagnie Union Carbide, Karl Kordesch, réussit à propulser une voiture de cette façon. Sur une base d'Austin A-40, il monte dans le coffre une pile de faible puissance (6 kW), secondée par des batteries placées à l'avant : il s'agissait donc d'un véhicule hybride électrique/électrique. Les bonbonnes de dihydrogène prenaient place sur le toit, et l'autonomie de la voiture, qui roula 16 000 km, était de 300 km.

Testée également sur des deux-roues, cette technologie resta cependant en sommeil jusqu'aux années 90, où de nombreux constructeurs automobiles lancèrent des programmes de recherche très ambitieux visant à fabriquer des « voitures à hydrogène » enfin crédibles.

Enfin, ça marche

C'est parti : au prix d'investissements énormes, une série de modèles expérimentaux voient le jour, plus performants et moins lourds d'une génération à l'autre. Chez Daimler-Benz par exemple, c'est la série des *Necar* pour *New electric car* ; la *Necar 1*, présentée en 1994, est en fait un utilitaire... peu utilisable puisqu'il s'agit d'une camionnette dont toute la partie arrière est occupée par la salle des machines : il reste deux places à l'avant. Difficile de parler de « voiture ». Mais suivent très rapidement une *Necar 2* en 1996, sorte de minibus portant ses réservoirs de dihydrogène sur le toit et capable d'emmener six passagers, puis en 1997 une *Necar 3* qui marque vraiment une étape décisive, puisque réalisée sur la base d'une *classe A*, la plus petite des Mercedes, tout en gardant de la place pour deux passagers ! À la différence des précédentes, celle-ci s'alimente au méthanol, qui est transformé en dihydrogène à bord par un « reformeur »¹³ :

13. Le « reformage » (adaptation assez pauvre de l'anglais *reforming*) consiste à produire une réaction chimique afin de changer la nature du carburant de départ. Par exemple, du méthanol chauffé en présence de vapeur d'eau et d'un catalyseur donne du dihydrogène et du dioxyde de carbone suivant la réaction : $\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 3\text{H}_2$

Il s'agit ni plus ni moins d'embarquer à bord une « mini-usine à gaz » capable de reproduire les processus employés couramment pour la fabrication de dihydrogène dans les raffineries.

on supprime ainsi le problème des lourds et encombrants réservoirs de ce combustible, qui doit être comprimé sous très forte pression (plusieurs centaines de bars), ou refroidi à une température rarement rencontrée même en laboratoire ($-253\text{ }^{\circ}\text{C}$) pour passer à l'état liquide. En revanche, le procédé est émetteur de dioxyde de carbone. Dès le modèle suivant, *Necar 4*, présenté en 1999, les cinq passagers sont à nouveau invités à bord, et la voiture recourt à nouveau au dihydrogène directement, sous forme cryogénique (liquide) ; la puissance massique des piles commence à être intéressante, avec 5 kg seulement nécessaires pour produire 1 kW. On est encore loin des moteurs thermiques cependant, même Diesel (les plus lourds), facilement deux fois plus légers à puissance égale. Mais surtout, leur réservoir de carburant est autrement moins pesant et encombrant que l'énorme « thermos de compétition » devant contenir le dihydrogène liquide à des températures défiant l'entendement.

Les constructeurs français sont un peu à la traîne : Renault tente sans grande conviction, à la même époque, de tester une Laguna break (projet *Fever*) dont toute la partie située derrière les sièges avant est occupée par une usine à gaz, et embarquant 8 kg de dihydrogène liquide pour une autonomie annoncée de 500 km. La puissance de la pile n'est que de 30 kW, un peu juste pour une voiture pesant 2,2 tonnes ; heureusement des batteries d'appoint, de type NiMH, lui permettent quand même d'avancer. C'est une constante que l'on retrouvera, à de rares exceptions près, sur tous les prototypes à pile à combustible développés par la suite : obtenir une puissance suffisante est une tâche tellement ardue (et coûteuse) que la solution naturelle pour contourner la difficulté consiste à recourir à l'hybridation, ici de type électrique/électrique puisque pile à combustible comme batteries sont des générateurs électriques. À la différence près, importante, que la batterie peut « ravalier » du courant, et donc récupérer de l'énergie dans les ralentissements, alors que la pile n'est pas réversible car elle ne peut pas faire fonction d'électrolyseur. Théoriquement, ce serait possible, mais c'est déjà assez cher et compliqué comme ça, et en plus

il faudrait comprimer le dihydrogène produit pour le stocker, ce qui n'est pas une mince affaire !

PRINCIPALES PILES À COMBUSTIBLE UTILISÉES

Il existe de nombreux types de pile à combustible. En automobile, la seule qui semble avoir quelque intérêt actuellement auprès des constructeurs est la pile PEMFC pour *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*, ou pile à combustible à membrane échangeuse de protons. Elle est entièrement solide, y compris l'électrolyte qui se présente sous la forme d'une (ruineuse) membrane de polymère ; elle s'alimente au dihydrogène de très grande pureté et fonctionne à une température de 80 °C environ.

Une autre, sa cousine, pourrait avoir un intérêt car buvant directement du méthanol, beaucoup plus facile à transporter et stocker que le dihydrogène : la pile DMFC pour *Direct Methanol Fuel Cell* (pile à combustible à méthanol direct). Malheureusement, elle ne rejette plus uniquement de l'eau, mais aussi du dioxyde de carbone, voire pire (formaldéhyde, acide formique) et perd donc un peu de son intérêt écologique ; de plus son rendement est inférieur et n'est pas, en pratique, supérieur à celui de bons moteurs thermiques.

Enfin, toujours pour contourner les problèmes posés par le dihydrogène, certains constructeurs travaillent à mettre au point des prototypes fonctionnant... avec des hydrocarbures de synthèse. Rien de tel que le carbone pour rendre l'hydrogène transportable !

La compétition fait rage entre tous les constructeurs à la fin du xx^e siècle, et les résultats sont spectaculaires. Daimler-Benz, General Motors, Ford, Toyota, Honda... tous abordent le xxi^e siècle avec des prototypes qui font plus envie que pitié, et où la « mécanique » parvient à produire des performances décentes tout en se montrant relativement discrète en volume comme en poids. Ce sera par exemple la série des *FCHV*¹⁴ chez Toyota, qui se poursuit toujours, ou celle des *HydroGen* chez General Motors, sur la base d'un monospace Opel Zafira. En 2004, la troisième version *HydroGen3*, tellement fière de la puissance de sa pile qu'elle se passe de batterie d'appoint, s'offre même

14. Pour *Fuel Cell Hybrid Vehicle*, véhicule hybride à pile à combustible.

le luxe de traverser l'Europe, du nord de la Norvège au sud du Portugal, pour un périple de près de 10 000 km sur de vraies routes, entourée de vraies automobiles qui l'obligent à accélérer ou freiner comme dans la vraie vie.

Tout semble donc possible : faire des voitures qui transportent vraiment des passagers, éventuellement avec leurs bagages, à des vitesses correctes et avec une autonomie décente, qui font le plein en un temps raisonnable, et sans utiliser de pétrole ni émettre le moindre polluant. Vivement leur généralisation !

Est-ce vraiment raisonnable ?

La voiture ne rejetant que de l'eau à l'utilisation, c'est possible. Avec un rendement énergétique très supérieur à celui des moteurs à combustion interne, c'est déjà moins évident. Nous avons cité le chiffre de 83 % : il s'agit là d'une valeur maximale théorique, sans grand rapport avec la réalité. Plusieurs nuages viennent voiler le Soleil radieux des dépliant publicitaires.

Dès qu'une pile à combustible fonctionne, le courant qu'elle débite occasionne une chute de tension et une chute de rendement. Autrement dit, contrairement à un moteur thermique, une pile transforme efficacement l'énergie chimique du combustible... tant qu'on lui demande de ne pas trop travailler. Plus on force dessus, plus son rendement s'écroule. Or, il n'est pas question de la surdimensionner, vu son prix déjà exorbitant par unité de puissance. La connaissance de cette caractéristique est essentielle pour pouvoir comparer l'efficacité des prototypes à pile à combustible présentés par les constructeurs à celles de leurs équivalents thermiques : bien souvent, les chiffres annoncés correspondent soit à des vitesses stationnaires, soit à des cycles normalisés peu exigeants en puissance. Les piles à combustible y sont alors naturellement favorisées. Dans des conditions d'utilisation normales, c'est une tout autre histoire, comme on le verra bientôt.

En tenant compte d'une production de courant non nulle, donc, le rendement pratique d'une pile de type PEMFC à dihydrogène

tombe entre 50 et 60 % ; encore ne s'agit-il que de la pile « nue » qui, en réalité, a besoin d'« accessoires » tout aussi peu facultatifs à son fonctionnement que peuvent l'être le circuit de refroidissement ou la distribution¹⁵ d'un moteur thermique. Par exemple, la pile peut avoir besoin d'un compresseur d'air¹⁶ pour la gaver en oxygène : sa « respiration » naturelle ne permet pas d'en tirer une puissance suffisante. Accessoirement, ce compresseur peut être bruyant, ce qui relativise d'un coup les avantages de silence des piles à combustible. Le refroidissement de la pile est également essentiel, et beaucoup plus délicat que sur un moteur thermique car les écarts de température tolérés pour son fonctionnement sont faibles : s'il y a surchauffe, la membrane est détruite et la pile avec. Or, un circuit de refroidissement fonctionne d'autant mieux que la différence de température entre le liquide qu'il contient et l'air ambiant est grande ; pas de chance, une pile fonctionnant à une température assez basse par rapport à celle d'un moteur thermique, son système de refroidissement est donc moins efficace et doit être surdimensionné en conséquence.

Bref, parvenir à un rendement global de 50 % est déjà un exploit... quand les moteurs thermiques dépassent déjà, pour les Diesel, 40 %. C'est mieux certes, et moins polluant ; mais ce rendement, comment est-il calculé au juste ? En ramenant le travail effectué par la pile (ou le moteur thermique) au contenu énergétique du combustible, exprimé par son pouvoir calorifique inférieur, en abrégé PCI. Ce choix est déjà discutable, mais admettons-le. Il existe cependant une grosse différence entre un hydrocarbure extrait du pétrole (ou un biocarburant) et le dihydrogène : on estime que seule une faible partie de l'énergie contenue initialement dans le pétrole brut est dépensée à le raffiner et à le distribuer, en raison principalement de son caractère liquide particulièrement pratique. Autrement dit, le PCI de l'essence (ou du gazole) n'est pas très différent de l'énergie récoltée à la source, au

15. Dispositif permettant l'alimentation des cylindres, et comprenant notamment les soupapes.

16. La pression qu'il délivre peut varier suivant les constructeurs, et aller de quelques centaines de millibars à quelques bars.

niveau du puits de pétrole : cela dépend naturellement de la qualité du pétrole extrait, mais on cite souvent le chiffre de 12 % de pertes, ou encore on parle d'un rendement « du puits au réservoir » de 88 %.

Pour le dihydrogène, la situation est complètement différente. Il ne sort d'aucun puits, même après raffinage : il faut le produire, tout comme l'électricité. Il est effectivement possible d'en obtenir à partir de toute source d'énergie, donc éventuellement renouvelable (d'où son intérêt), par exemple par électrolyse de l'eau au moyen d'électricité issue d'éoliennes, de centrales hydroélectriques ou d'installations photovoltaïques. Mais avec un rendement qui est loin d'être glorieux ; on lit ainsi dans une fiche¹⁷ de l'Association française de l'hydrogène : « *La consommation électrique des électrolyseurs industriels (auxiliaires compris) est généralement de 4 à 6 kWh/Nm³...* »

Un « Nm³ » est un mètre cube (de dihydrogène dans ce cas) produit dans les conditions normales de température et de pression. Une autre fiche¹⁸ nous apprend qu'un Nm³ de dihydrogène contient une énergie de 3 kWh. On a donc un rendement d'électrolyse, selon ces chiffres, de $3/6 = 50\%$ à $3/4 = 75\%$. Le dihydrogène produit doit alors être stocké localement sous pression ; cette opération, qui coûte de l'énergie, est indépendante du contenu énergétique du gaz ; elle est donc, relativement, plus intéressante quand le gaz possède un pouvoir calorifique élevé par unité de volume à la pression ambiante. Pas de chance : le dihydrogène est très énergétique par unité de masse (2,4 fois plus que le gaz naturel), mais particulièrement peu énergétique par unité de volume à la pression atmosphérique (trois fois moins que le gaz naturel). On va donc dépenser la même quantité d'énergie pour comprimer du dihydrogène ou du gaz naturel, par exemple de la pression ambiante jusqu'à 100 bars, mais le contenu énergétique du réservoir sera trois fois moins grand...

Le transport du dihydrogène par « dihydrogènoduc » pose le même genre de problème : le coût énergétique restera toujours, pour des

17. http://www.afh2.org/uploads/memento/pdf/fiche_3_2_1.pdf

18. http://www.afh2.org/uploads/memento/pdf/fiche_2_1.pdf

raisons fondamentales qui tiennent à la physique, nettement plus élevé que celui d'autres combustibles gazeux. À bord du véhicule, son stockage impose de recourir à des pressions gigantesques si l'on souhaite en stocker des quantités suffisantes : plusieurs centaines de bars, actuellement 700 bars sur certains prototypes. Pressurisation qui coûte de l'énergie naturellement, et impose des mesures de sécurité draconiennes : quand on pense à la psychose et aux mesures d'interdiction (parkings souterrains) que peuvent provoquer, à tort, des réservoirs de GPL sous quelques bars, comme les briquets qui contiennent le même combustible, on se demande comment il serait imaginable de proposer en grand nombre de tels véhicules. La solution de la liquéfaction est encore pire énergétiquement parlant, et de plus un réservoir cryogénique contenant du dihydrogène liquide doit nécessairement laisser évaporer un peu de son contenu (de l'ordre de 1 % par jour au mieux) pour maintenir sa température.

Tout compte fait, et même sans parler de leur coût encore faramineux, les piles à combustible alimentées au dihydrogène se montrent intrinsèquement à peine plus efficaces que les moteurs thermiques dans les conditions réelles d'utilisation, tout en utilisant un combustible qui est par nature remarquablement délicat et cher à manipuler, entraînant des pertes énergétiques énormes, à cause de ses propriétés physiques et chimiques contre lesquelles personne ne pourra jamais rien. Même les constructeurs parmi les plus avancés en ce domaine le reconnaissent : ainsi Toyota admet que son *FCHV* a une efficacité globale, « du puits à la roue »¹⁹, inférieure à celle d'une Prius actuellement commercialisée²⁰. Et encore, ce calcul n'utilise que l'hypothèse la moins coûteuse énergétiquement pour la production de dihydrogène : celle où il est obtenu par reformage de gaz naturel ! Hypothèse réaliste : aujourd'hui, 95 % du dihydrogène est produit à partir de ressources fossiles...

19. C'est-à-dire en multipliant le rendement énergétique du véhicule lui-même par celui de la production du combustible.

20. <http://www.toyota.co.jp/en/tech/environment/fchv/fchv12.html>

Démonstration par l'absurde

En mai et juin 2004, General Motors eut le courage de lancer un de ses prototypes à pile à combustible à travers l'Europe, l'*Hydro-Gen3*, de la Norvège au Portugal, pour un marathon médiatique de presque 10 000 km²¹. Ce véhicule inaugurerait par rapport à la génération précédente une architecture non hybride (il se passait donc de batteries d'appoint pour seconder la pile), et emportait 68 litres de dihydrogène sous forme liquide, à - 253 °C. Le récit étape par étape de cette aventure a été mis en ligne sur le site du magazine allemand *Auto Bild*, et peut encore être consulté²² en mai 2006. On y lit le détail des aventures de cette voiture, construite sur une base d'Opel Zafira, équipée d'un moteur électrique de 60 kW, capable d'accélérer de 0 à 100 km/h en 16 s (soit la même performance qu'un Kangoo 1.5 dCi de 50 kW) et créditée d'une autonomie théorique de 400 km d'après le constructeur. Sachant qu'un litre de dihydrogène liquide représente 8,49 MJ ou 2,36 kWh si l'on se base sur le pouvoir calorifique inférieur, 68 litres valent 577 MJ ou 160 kWh, ce qu'on peut encore traduire par 18 litres d'essence ou 16 litres de gazole environ.

Les journalistes-essayeurs sont particulièrement intéressés par le ravitaillement du véhicule, car il n'est pas donné à tout le monde de faire le plein de dihydrogène liquide (amené par camion en l'absence de stations-service le distribuant). Ils notent les kilomètres parcourus entre deux « passages à la pompe », et doivent bien reconnaître que les 400 km de la fiche technique sont très théoriques. On lit ainsi au début du périple, de Hammerfest en Norvège à Pello en Finlande :

«Es bleibt aber wenig Zeit, sich darüber zu freuen. Schon 160 Kilometer nach dem letzten Tankstopp ist der Wasserstoff fast schon wieder alle. Wir fahren langsamer und schaffen es noch bis Tachoanzeige 182,3 Kilometer. Alex von Kropff greift wieder zum Laptop und heizt den Tank per Mausclick auf. « Das erzeugt eine Druckerhöhung im Hydrogenbehälter ». Tatsächlich kommen wir noch zwei Kilometer weiter. Dann ist aber

21. <http://www.gmeurope.com/marathon/index.htm>

22. http://www.autobild.de/aktuell/reportagen/artikel.php?artikel_id = 6073

definitiv Schluß. Acht Kilometer vor dem geplanten Tankstopp bleiben wir liegen. »

Traduction rapide : 184,3 km après le départ le réservoir est totalement vide, 8 km avant le ravitaillement programmé. Ce qui fait une consommation de 37 litres de dihydrogène liquide aux cent kilomètres, ou en équivalents énergétiques plus familiers²³, 10 litres d'essence ou 9 litres de gazole. À un rythme qu'on imagine sénatorial vu la valeur de l'engin : un million d'euros environ.

Un peu plus loin (étape Paris-Darmstadt), on lit encore que tous les 150 km au plus tard, le véhicule doit refaire le plein. Le volume annoncé est d'environ 75 litres, ce qui est sans doute une erreur vu la contenance du réservoir, mais même avec 68 litres cela nous amène à 45 litres aux cent kilomètres²⁴ : les choses ne s'arrangent pas. Un espoir renaît à la lecture de l'étape Salzburg-Turin : on y apprend que le prototype consomme exactement 1 kg de dihydrogène pour cent kilomètres, soit 120 MJ ou l'équivalent de 3,7 litres d'essence, ou encore 3,4 litres de gazole. Faux espoir : il s'agissait uniquement de descente, après le passage d'un grand col alpin.

Redisons-le : ce prototype *n'était pas hybride*, ses performances sont donc à comparer à celles des voitures à moteur thermique simple de masse équivalente (vraisemblablement proche des 2 tonnes, le constructeur étant assez discret à ce sujet). Il montre néanmoins que la pile à combustible, loin d'être d'une efficacité « deux fois supérieure à celle des moteurs thermiques » comme on l'entend parfois, est en l'état actuel de la technique un moyen ruineux de dépenser davantage d'énergie qu'avec un bon moteur thermique, et ceci *même en oubliant les pertes énormes liées aux caractéristiques particulières du dihydrogène*. Si celles-ci sont prises en compte, le bilan devient catastrophique. La pile à combustible a toutes les caractéristiques pour *ne pas* convenir à l'automobile²⁵, hormis quelques opérations de communication à visée

23. Sans compter, naturellement, les pertes liées à la production, au transport et au stockage du dihydrogène.

24. Soit environ 12 litres en équivalent-essence et 10,6 litres en équivalent-gazole.

25. Questions about a hydrogen economy, *Scientific American*, mai 2004.

publicitaire²⁶ : rapport poids/puissance et surtout coût/puissance très défavorable, rendement intéressant seulement en utilisation à faible charge, combustible extrêmement difficile à transporter et stocker. Ce qui peut se concevoir dans le cas d'une utilisation stationnaire, pour une cogénération d'électricité et de chaleur par exemple, n'est pas possible en automobile : le dihydrogène ne peut pas être stocké sous faible pression dans des réservoirs volumineux.



44 | L'entropie : l'oublier peut coûter cher.

Rouler sans polluer, sans émettre de gaz à effet de serre, c'est donc impossible ? Non, une voiture électrique à batteries sait le faire. Bien sûr la production d'électricité peut être polluante et émettrice de CO₂ ; elle l'est souvent dans les pays (comme les États-Unis) où

26. Honda a par exemple accordé en juin 2005, à grands renforts de communiqués de presse, la location d'une automobile à pile à combustible (la FCX) à une famille californienne, les Spallino, tellement modèle qu'on a du mal à imaginer qu'elle ait pu être choisie au hasard...

le charbon est un des combustibles les plus utilisés pour cela ; mais elle peut aussi ne pas l'être, et utilisée directement par un véhicule à batteries, une électricité « écologiquement correcte » permettra de faire beaucoup, beaucoup plus de kilomètres qu'en passant temporairement sous la forme dihydrogène : au bas mot, trois fois plus. La pile à combustible fonctionnant à ce gaz n'a d'intérêt que pour de très riches automobilistes disposant d'une source d'énergie propre, suffisamment abondante pour qu'il soit envisageable d'en laisser perdre une grande partie. Si ses problèmes de coût sont un jour réglés, elle pourrait avoir un intérêt pour la propulsion automobile à condition de trouver un moyen pas cher de produire directement du dihydrogène à grande échelle (sans passer par l'électricité), moyen aujourd'hui inexistant. Seules des centrales nucléaires conçues pour cela semblent envisageables ; mais à condition de recourir à la surgénération, sous peine de voir les ressources en uranium fondre aussi vite que le pétrole ! Tout cela fait beaucoup de conditionnels ; en attendant un jour hypothétique où tous ces problèmes seront résolus, les hybrides rechargeables permettront déjà d'effectuer une bonne part des déplacements sans pollution locale, voire sans pollution tout court selon le mode de production d'électricité. Et lorsque le moteur thermique se mettra en route, s'il est alimenté par un biocarburant, l'émission nette de dioxyde de carbone sera très fortement réduite. Solution qui serait moins irréaliste qu'actuellement, justement par la réduction massive de la consommation moyenne que cette architecture permettrait. Resterait alors la pollution locale urbaine ? Avant d'exiger de tous les véhicules en circulation des émissions de polluants inférieures à celles d'une hybride essence-électricité, il serait plus utile de dépolluer aussi efficacement les deux-roues, puis le chauffage des habitations, voire les cuisinières à gaz.

CONCLUSION

Née objet de luxe réservé à quelques rares privilégiés, l'automobile s'est répandue dans les pays industrialisés au point de devenir le produit de consommation de masse par excellence, au même titre que le réfrigérateur ou le téléviseur. Elle a bénéficié pendant un siècle d'une énergie quasi-gratuite, lui permettant de progresser toujours dans le même sens : plus de vitesse, plus de puissance, plus de confort, plus de sécurité ; si son efficacité énergétique a été constamment croissante, elle n'a pour l'essentiel que compensé les exigences des automobilistes, constamment à la hausse en ces domaines.

Cet âge d'or est terminé : désormais, les effets pervers de la généralisation de l'automobile ne peuvent plus être ignorés dans les pays où l'on peut se payer une voiture pour une année de salaire, tandis que l'enrichissement rapide des pays émergents, et le désir de voiture individuelle qui l'accompagne, constitue une formidable pression sur l'approvisionnement en pétrole de ce gigantesque cheptel mécanique planétaire. Mais ce pétrole est-il réellement le seul combustible utilisable ? Paradoxalement, il est nécessaire aujourd'hui plus

qu'avant : tant que l'automobile restait un luxe, sa demande en énergie demeurait compatible avec la production de carburants d'origine agricole, nécessitant de grandes surfaces cultivables, et dont les moteurs à combustion interne s'accommodent très bien pour peu qu'on les optimise à cette fin. Ces huiles ou alcools, et leurs dérivés, sont par ailleurs fort préférables aux produits de raffinage pétroliers pour leur impact bien moindre sur le réchauffement climatique dont nous avons maintenant pris conscience.

Mais c'est la dose qui pose problème, et lorsque chacun veut se déplacer comme bon lui semble dans son propre véhicule, la quantité totale d'énergie consommée n'est plus compatible avec la captation très lente d'énergie solaire dont sont capables les plantes. Il n'est plus question aujourd'hui, dans un pays comme la France, de produire par des cultures la totalité du carburant dont nos automobiles ont besoin, à leur niveau actuel de consommation. On se plaint souvent du faible rendement des cellules photovoltaïques convertissant directement le rayonnement solaire en électricité, et qui peine à dépasser 10 % ; or lorsqu'une culture donne une tonne équivalent pétrole d'énergie nette à l'hectare, cela correspond dans nos régions à un rendement de l'ordre de 0,1 % soit cent fois moins... situation aggravée par la très faible efficacité des moteurs thermiques comparée à celle de leurs équivalents électriques !

Ces moteurs aujourd'hui généralisés ne seront donc pas sauvés par les carburants agricoles, surtout si les mauvaises habitudes se prolongent voire s'amplifient. Il semble en effet que l'avertissement sonné par l'envolée des cours du brut ne serve à rien : plus la pénurie d'or noir se précise, plus on voit apparaître de nouveaux types d'automobiles qu'on hésite à qualifier de « véhicules légers », et qui cumulent les handicaps énergétiques. Masse approchant voire dépassant les deux tonnes, profil aérodynamique de boîte à chaussures, surface frontale d'utilitaire, motorisation permettant d'atteindre des vitesses dépassant de très loin le cadre légal, pneumatiques dont la résistance au roulement n'a jamais autant mérité ce nom. Il y a pourtant une logique à cela : dans les pays

où le marché automobile tend vers la saturation, il n'est plus possible pour les constructeurs de continuer à générer du profit en motorisant de nouveaux clients, voire en proposant une voiture un peu plus luxueuse à ceux qui naguère devaient se contenter du strict minimum. Sur ces marchés, conserver sa marge bénéficiaire passe nécessairement par la vente d'un produit à forte valeur ajoutée, qu'on peut obtenir par simple inflation de toutes les caractéristiques qui définissent l'automobile : plus de puissance, plus de masse, plus de largeur, plus de hauteur, plus de sièges, plus de pneus, plus de chrome... Les techniques de *marketing* aidant, il est relativement facile de convaincre le client qu'il est *tendance* de se déplacer dans un véhicule dont la conception même est contradictoire¹, ou dont le stationnement en ville est un casse-tête perpétuel, sans parler même de son caractère dangereux pour les autres usagers, de ses coûts d'entretien surprenants ou de son appétit immodéré en carburant.

Toutefois cette inflation a ses limites, qui semblent déjà atteintes et dépassées au pays qui n'a que très rarement montré son intérêt pour les économies d'énergie : les États-Unis d'Amérique. Là où les fluctuations du prix du baril se répercutent bien plus sèchement que chez nous sur le coût (pourtant encore faible) des déplacements en automobile, les ventes de gros véhicules tout-terrain ou autres soiffards de la route sont en chute libre, et concourent à ruiner un peu plus encore des constructeurs nationaux qui n'avaient pas besoin de cela. Au point qu'au mois de mai 2006, General Motors propose à certains clients de Floride et de Californie qui hésiteraient à acheter des modèles trop gloutons, de leur garantir pendant la première année d'utilisation un coût apparent du carburant au plus égal à 1,99 dollar le gallon², en leur reversant la différence³ ! Cette fuite en avant ne poursuit évidemment

1. Le premier élément assurant l'efficacité d'un véhicule tout-terrain est son train de pneus, de taille haute et fortement crantés. Combien de ceux vendus aujourd'hui ne chausseront rien d'autre que des pneus de taille basse à vocation exclusivement routière ?

2. Soit environ 0,41 euro le litre d'essence en mai 2006. Son prix réel est d'environ 3,50 dollar par gallon, soit 0,72 euro le litre.

3. http://www.greencarcongress.com/2006/05/gm_partially_su.html

qu'un but : parvenir à écouler des véhicules dont l'attrait s'amenuise inexorablement, avant qu'il soit réellement impossible de les vendre. Et elle aura forcément une fin : le bord du précipice, voire le précipice lui-même.

En Europe, les constructeurs ont misé sur les progrès récents et spectaculaires de la motorisation Diesel, tant en rendement qu'en agrément d'utilisation, pour à la fois inciter le consommateur à renouveler plus tôt son automobile et proposer sur le marché des véhicules aux consommations raisonnables. Mais cet avantage découle en grande partie d'une illusion d'optique, savamment entretenue, qui trouve son origine à la fois dans la façon usuelle de mesurer la consommation (le litre n'est pas une unité d'énergie !), dans la fiscalité (c'est le carburant le plus cher qui est vendu le moins cher) et dans des normes de pollution européennes jusque là bienveillantes pour les moteurs à allumage par compression. Cette situation ne durera pas, pour des raisons physico-chimiques, économiques et environnementales : les raffineries qui ne produisent qu'un type de carburant restent à inventer, l'État voit rarement d'un bon œil s'étendre à grande échelle les avantages fiscaux, et les seuls points encore réellement problématiques de la pollution atmosphérique d'origine automobile, les particules de suie et les oxydes d'azote, obligent le Diesel à des complications technologiques coûteuses.

Et de toute façon, même avec des moteurs propres, au rendement exceptionnel et utilisant des carburants propres, ni le pétrole, ni les carburants d'origine agricole ne pourront à terme satisfaire les besoins de mobilité d'un nombre croissant d'automobilistes si leurs besoins en énergie se maintiennent au niveau actuel ; l'urgence est donc à la sobriété et à la diversification énergétiques, le premier point ayant préoccupé depuis bien longtemps les ingénieurs les plus brillants, hélas rarement écoutés. Ainsi Jean-Albert Grégoire, visionnaire qui marqua le xx^e siècle notamment par l'invention du joint homocinétique nécessaire à la traction avant, écrivait déjà en 1979 dans *Vivre sans pétrole* :

« J'ai souligné ailleurs combien il était irrationnel de faire rouler dans les villes encombrées à 13 km/h de moyenne avec un seul passager à bord, nos engins à quatre places conçus pour dépasser 140 km/h. Ne serait-il pas logique de prévoir deux sortes d'automobiles, l'une routière, à quatre places, capable d'atteindre les vitesses tolérées sur les autoroutes, l'autre citadine, à deux ou trois places, ne dépassant pas les 80 km/h, limite des périphériques ? Met-on les mêmes chaussures pour une chasse en Sologne et pour un Bal de l'Opéra ? Certes il est plus pratique d'avoir une voiture à tout faire mais cette facilité cause un gaspillage caractérisé rendu possible par le prix trop bas du pétrole et qui paraîtra vite intolérable. »

Nous y voilà... et pourtant, il est encore bien difficile de renoncer à la polyvalence d'un véhicule apte à tout type de trajet (sans parler de ceux qui prétendent évoluer hors des routes), à moins d'en posséder plusieurs au sein d'un même foyer. Cependant, si les lois de la physique condamnent les moteurs thermiques de voitures routières à des performances énergétiques très médiocres en milieu urbain, leur adjoindre une machine électrique associée à de puissants accumulateurs ouvre des perspectives insoupçonnées. Apparues trop tôt (d'un strict point de vue économique) dans le Japon en proie au doute des années quatre-vingt-dix, les premières motorisations hybrides à prétention commerciale ont avec obstination montré la voie que les contraintes économiques et physiques rendront de plus en plus pertinente. Sans faire le moindre miracle, mais en optimisant le fonctionnement d'un moteur thermique très classique grâce à un recours modéré à l'électricité, l'hybridation nous fait déjà prendre conscience des gâchis énergétiques consentis depuis toujours dans l'utilisation quotidienne de l'automobile. Elle propose aujourd'hui à l'automobiliste de diminuer sa consommation d'un tiers, voire de moitié en ville, sans rien changer à ses habitudes mais en l'éduquant naturellement à la conduite énergétiquement efficace et apaisée, et en réduisant les émissions polluantes de façon très significative. Au prix également d'un surcoût certain, bien qu'actuellement amorti par les constructeurs qui la proposent : il faudra s'y faire, pour diminuer la part de l'énergie consommée dans le

budget d'utilisation, le raffinement technique demande sa rétribution ; au moins le temps d'adapter l'outil industriel à l'échelle de ce marché immense.

Mais si l'hybridation d'aujourd'hui fonctionne de façon autonome, sans autre source d'énergie que le carburant contenu dans le réservoir, son évolution naturelle appelle la transition graduelle vers un usage de plus en plus important de l'électricité pour mouvoir l'automobile, solution qui fut un temps considérée comme la plus pertinente et prometteuse, il y a plus d'un siècle, en des temps où les exigences de vitesse et d'autonomie n'étaient pas les mêmes. Dès aujourd'hui, la puissance et les capacités de stockage des batteries permettent d'adapter l'énergie à l'utilisation de la voiture : fonctionnement purement électrique sur de courtes distances parcourues à vitesse modérée, carburant liquide pour les longs trajets éventuellement autoroutiers. En autorisant la coexistence des deux sur le même véhicule, la technologie hybride change radicalement la perception des limites (toujours réelles) du stockage de l'électricité. Si des progrès restent à faire, ils sont pour ce type de véhicule d'ordre économique plus que technique, et découleront très logiquement d'une extension du marché.

L'idéal sera toujours, en matière d'efficacité comme de pollution locale, la propulsion par moteurs électriques ; et si l'électricité ne doit pas être considérée comme une source mais comme un vecteur d'énergie, elle a au moins le mérite d'offrir un éventail assez vaste de moyens de production, donc de permettre une libération progressive du pétrole et des ressources fossiles. Déjà, la production décentralisée d'électricité solaire par des centrales photovoltaïques familiales offre des perspectives inattendues : on pensait cette technique ruineuse, ou juste bonne à faire rouler quelques prototypes de records sans aucune utilité pratique, et on découvre qu'elle permettrait d'effectuer nos déplacements de proximité à moindre coût qu'avec nos voitures à pétrole, moyennant des modifications mineures de voitures hybrides produites en grande série. Si l'investissement reste conséquent, et le coût du stockage toujours le maillon faible, rouler grâce au

Soleil dans une voiture d'apparence normale n'est plus un pur délire d'ingénieur. Et si c'était à cette aune que se mesure le vrai progrès automobile ?

Des véritables handicaps du stockage d'électricité par accumulateurs, ne subsiste aujourd'hui réellement que celui de la quantité d'énergie transportée : la compacité, comme la légèreté, du stockage d'énergie dans les carburants liquides reste à ce jour inatteignable par les meilleures batteries (il s'en faut d'un facteur 50), et fait bien mieux que compenser le mauvais rendement des moteurs thermiques, lié essentiellement à la différence de nature entre l'énergie thermique libérée par une combustion et l'énergie « ordonnée » utilisable quasi-intégralement par un moteur électrique. En revanche, des progrès spectaculaires et d'une actualité brûlante en matière de puissance permettent aujourd'hui de recharger des batteries de toute taille à l'échelle de quelques minutes, pourvu que la prise de courant l'autorise : ce n'est donc plus le véhicule qui coince, mais l'infrastructure. Faire « le plein d'électricité » aussi rapidement que celui de carburant pétrolier demande une puissance de plusieurs mégawatts ; pour le particulier ayant souscrit un abonnement de quelques kilowatts, la recharge en quelques heures la nuit restera de toute façon la seule possibilité, ce qui n'est à vrai dire pas un réel problème. Et même pour de futures stations-service électriques, peut-être pourrait-on repenser l'offre commerciale afin de s'accommoder de puissances plus raisonnables : quel inconvénient y aurait-il à recharger sa voiture en un quart d'heure, quand on n'est pas condamné à garder sa main sur un pistolet plus ou moins poisseux en respirant des vapeurs nocives, mais qu'on peut mettre à profit cette pause pour faire quelques emplettes, boire un café ou surfer sur internet ? Les experts en marketing devraient bien être capables de vendre un concept rationnel, eux qui arrivent à rendre indispensable tant de superflu.

Pour l'immédiat, les constructeurs semblent considérer l'automobiliste comme incapable de changer la moindre de ses habitudes, et lui font miroiter une voiture écologiquement ultime qui risque

fort de rester pour très longtemps encore du seul domaine de la communication publicitaire ; ou au mieux, devenir le privilège de quelques nantis. Utilisant une variante de l'accumulateur électrochimique, la pile à combustible, qui puise un de ses réactifs (le dioxygène) dans l'air, et l'autre (le dihydrogène⁴) dans un réservoir embarqué sur le véhicule, ces automobiles font l'objet de déclarations de plus en plus optimistes sur son commercialisation prochaine. Elles résoudraient enfin l'éternel problème des voitures électriques, en leur permettant de faire le plein comme on s'approvisionne en GPL, et en ne rejetant aucun polluant.

Comme toute technologie quasi-inconnue, rencontrée seulement à l'occasion de quelques salons ou dans des malettes pédagogiques exposant le principe mais pas les ordres de grandeur, la pile à combustible fait rêver, et conduit facilement à oublier les limites que son application à grande échelle rencontrerait en automobile. Elle résout moins que les batteries le problème de la source primaire d'énergie : en recourant à un gaz qu'il faut d'abord produire avec un rendement énergétique parfois peu glorieux, et dont les caractéristiques physico-chimiques sont les pires qu'on puisse imaginer pour le transport et le stockage, elle impose de perdre dans la chaîne énergétique une grande partie de la ressource initiale. En clair, elle impose de payer le kilomètre au moins trois fois plus cher, et de dilapider trois fois plus vite les réserves énergétiques encore à notre disposition. Car aucun moyen de produire du dihydrogène en quantité suffisante et à un coût raisonnable n'existe actuellement, en dehors de l'utilisation d'hydrocarbures. A moyen terme, des centrales nucléaires spécialisées pourraient se porter candidates... et épuiser ainsi les réserves d'uranium aussi vite que celles de pétrole, si elles devaient se généraliser avec la technologie actuelle. Quelques pays gâtés par la nature et disposant de sources d'énergies renouvelables exceptionnellement abondantes peuvent envisager de produire le dihydrogène de façon « écologique »,

4. Ou éventuellement d'autres, mais qui réduisent alors beaucoup les avantages écologiques de cette solution.

mais à un coût toujours élevé comparé à celui de la production directe d'électricité.

De plus, un réseau de distribution de dihydrogène serait à créer de toutes pièces, contrairement au réseau existant de distribution de l'électricité, et poserait de graves problèmes techniques comme la fragilisation des métaux utilisés pour les conduites et réservoirs par ces minuscules molécules ; la pile à combustible porte encore en elle des schémas d'organisation économique hypercentralisés⁵ hérités de l'ère des carburants fossiles, alors que nous commençons à prendre conscience de la fragilité qu'ils entraînent pour nos sociétés. Et enfin, son coût par unité de puissance reste à l'heure actuelle totalement prohibitif en automobile, même s'il pourrait ne plus l'être pour des applications d'électronique nomade par exemple.

Parce que l'utilisation de grandes quantités d'énergie est la condition *sine qua non* du fonctionnement d'une automobile, et que l'énergie est une des notions les plus centrales de la physique et de la chimie, les automobiles du siècle qui commence, privées des facilités permises par l'abondance du pétrole, devront faire appel aux connaissances les plus pointues de la recherche scientifique ; depuis la production (qui n'est jamais qu'une transformation) de l'énergie quelle que soit son origine, jusqu'à son utilisation dans le véhicule, en passant par son stockage. Sans la physique quantique née il y a un siècle, il n'y aurait pas de microélectronique aujourd'hui si banale ; sans elle, il n'y aurait pas non plus de convertisseurs électriques puissants et efficaces tels que ceux utilisés aujourd'hui dans les véhicules hybrides et électriques. Pas non plus de conversion directe d'énergie solaire en courant électrique. Cet exemple n'est qu'un parmi tant d'autres, et certainement d'une grande banalité ; mais tout ce qui va sans dire va encore mieux en le disant. L'innovation d'aujourd'hui a ses racines dans les

5. Dans son *best-seller L'Économie hydrogène*, Jeremy Rifkin suggère au contraire une révolution énergétique décentralisatrice permise par la généralisation des piles à combustible. Hélas, outre le peu de place accordé dans ses hypothèses au coût d'une telle solution, on pourra épinglez chez cet économiste l'oubli d'un fait essentiel : pour la production de dihydrogène, seules les installations de taille industrielle ont des rendements acceptables.

connaissances des siècles passés, et celle de demain ou d'après-demain dans les questions que se posent, souvent sans aucune préoccupation d'ordre technologique, les chercheurs d'aujourd'hui. Seule l'absence de culture scientifique peut faire croire le contraire.

Le futur (incertain) de l'automobile ne sera ni la prolongation de son passé, ni les lendemains radieux promis par les discours publicitaires des constructeurs, mais un compromis entre des nécessités physiques, économiques et environnementales. La survie de l'automobile sous une forme proche de celle connue actuellement ne saurait de toute façon être un but en soi ; c'est bien davantage une mobilité individuelle, utilisant divers véhicules suivant les circonstances et les besoins, qui paraît souhaitable. Ce n'était pas le but de cet ouvrage d'en parler, ni de traiter de sujets aussi importants que l'influence de l'urbanisme sur l'usage de l'automobile et vice-versa ; son ambition n'était que de prendre prétexte d'un problème d'actualité pour montrer la pertinence de raisonnements physiques, ainsi que la nécessité de situer les ordres de grandeur en jeu. Et comme la physique finit toujours, en dernier lieu, par avoir raison lorsque l'énergie n'est plus gratuite, parions que ce futur automobile sera aussi, la pression économique aidant, l'occasion de replacer la voiture à sa juste place dans l'échelle des rayons d'action ; plus précisément, entre deux inventions championnes de la sobriété énergétique, inventées en un temps où la puissance non animale était encore rare : le train et le vélo.

Collection *Bulles de Sciences*

La collection « Bulles de Sciences » a été créée afin de promouvoir la culture scientifique. Elle est destinée à un large public. Cette collection a reçu la Mention Spéciale du Prix du Livre Scientifique d'Orsay 2002.

Ouvrages publiés dans la collection

- *Asymétrie : la beauté du diable*
Franck Close
- *Ces bolides qui menacent notre monde*
Christian Köberl
- *Combien dure une seconde ?*
Tony Jones
- *Combien pèse un nuage ?*
Jean-Pierre Chalon
- *De l'haltère à la Lune*
René Bimbot et Nicole Bimbot
- *Doit-on craindre la foudre ?*
Christian Bouquegneau
- *Est-ce qui fait trembler la Terre ? (Qu')*
Pascal Bernard
- *Neutrinos vont-ils au paradis ? (Les)*
François Vannucci
- *Où viennent les pouvoirs de Superman ? (D')*
Roland Lehoucq
- *Pourquoi la nature s'engourdit ?*
Jean Génormont et Catherine Perrin
- *Que sait-on des maladies à prions ?*
Emile Desfeux
- *Que sait-on du cancer ?*
Maryse Delehedde
- *Radioactivité de tous les diables (Une)*
Gérard Lambert

• *Requins sont-ils des fossiles vivants (Les)*

Gilles Cuny

• *Séquoias dans les étoiles (Des)*

Philippe Chomaz

• *Terre chauffe-t-elle ? (La)*

Gérard Lambert

• *Vampires chez les plantes (Des)*

Georges Sallé

• *Vie est-elle universelle ? (La)*

André Brack et Bénédicte Leclercq

Retrouvez tous nos ouvrages sur www.edpsciences.org
