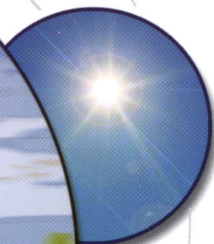
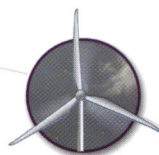




FRANÇOIS ROBY

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.

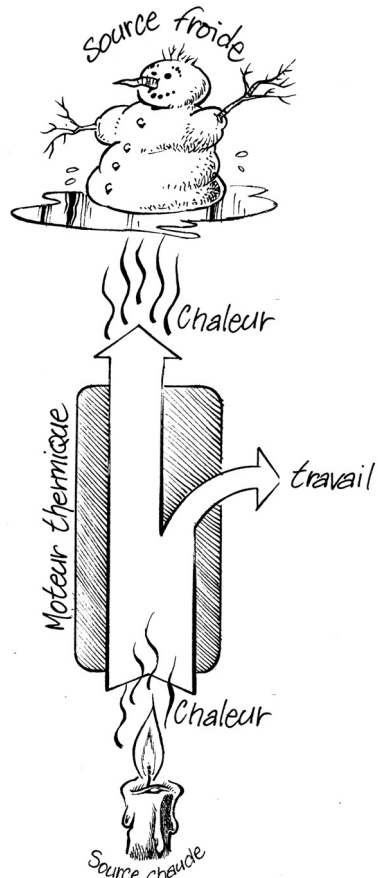
Le vautour ainsi que la braise gênent (très peu évidemment !) le transfert de chaleur vertical qui s'effectue par convection², et transforment par leur présence une très faible partie de ce flux énergétique en travail. Ils constituent donc avec leur environnement un moteur thermique naturel. Plus complexe 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 éolipile, 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.

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 Génarmont 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
