

AUVERGNE

N° 77 - NOVEMBRE 2011

Sciences

L'ATP, INDICATEUR DE VIE

LE PRINCIPE DE CARNOT

LE CADRAN SOLAIRE DU BARRAGE DE CASTILLON

FACILE DE CALCULER UNE ÉCLIPSE DE SOLEIL ?

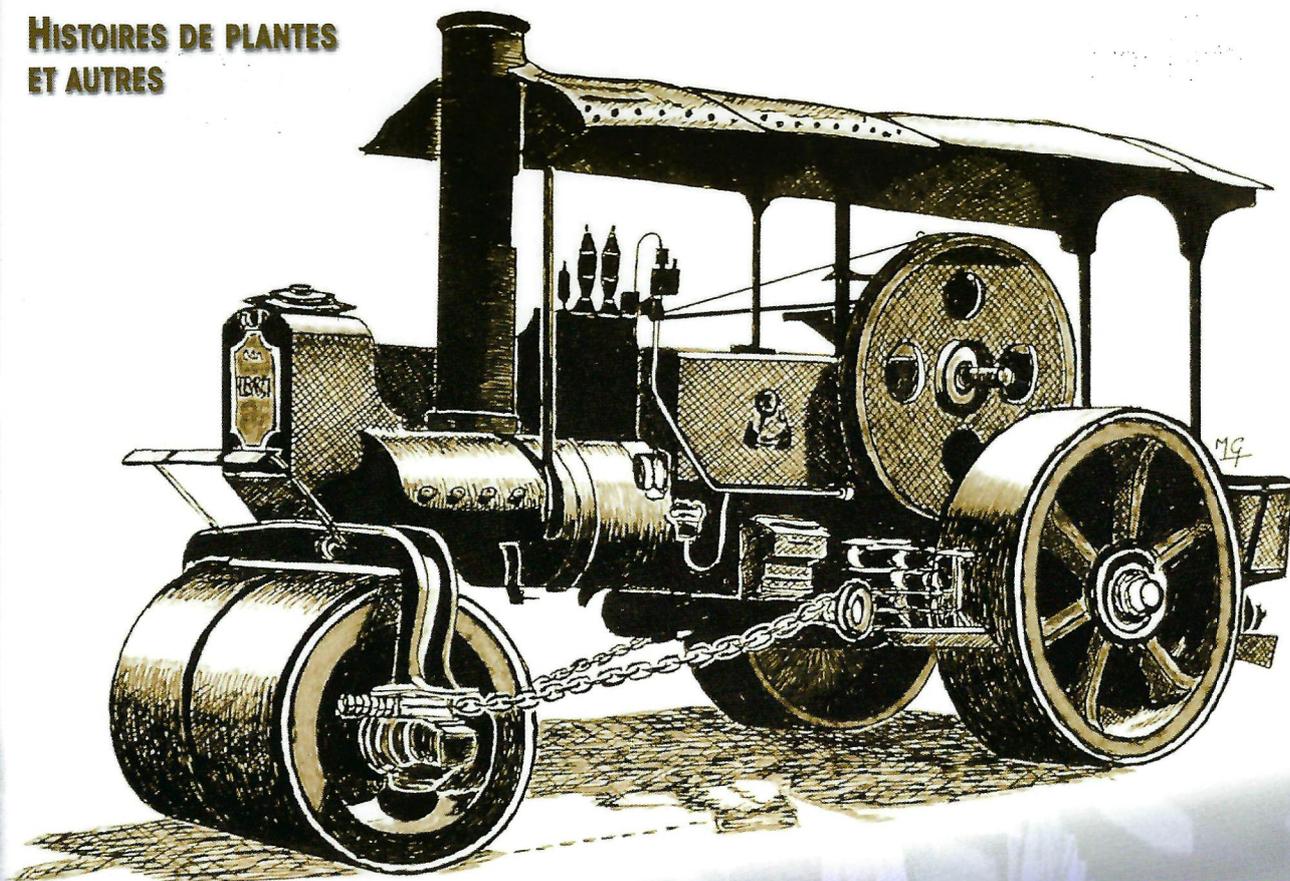
8 NOVEMBRE 2011 :

100^e ANNIVERSAIRE DU PRIX NOBEL DE CHIMIE À MARIE SKLODOWSKA-CURIE

PARTAGER NOS CONNAISSANCES

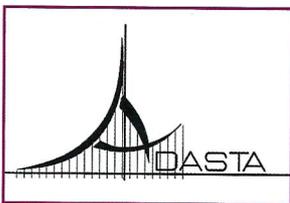
EN ROUTE VERS LA VOITURE ÉCOLOGIQUE

**HISTOIRES DE PLANTES
ET AUTRES**



Revue de l'ADASTA

Association pour le Développement
de l'Animation Scientifique et Technique en Auvergne



EDITORIAL



L'ADASTA continue à être présente dans les diverses manifestations scientifiques en Auvergne.

Les 3 conférences sur l'Énergie, organisée par l'ADASTA, en collaboration avec l'IESF (ex. URIS-A) ont remporté un vif succès. Nos conférenciers ont été ravis de connaître l'ADASTA. Nous tenons à les remercier de leur prestation ainsi que nos amis et collègues-ingénieurs de l'IFMA qui nous ont si bien accueillis et permis l'organisation de ces conférences. Ce fut un événement scientifique à Clermont-Ferrand.

Plusieurs animations d'astronomie, avec notre planétarium mobile, ont eu lieu dans divers établissements scolaires de l'Allier avec un grand nombre d'élèves et professeurs.

Avec le planétarium mobile, nous avons également participé à :
- Expo-Sciences à Blavozy (Haute Loire)
- Forum des Associations à Chamalières
- Forum des Associations à Clermont Ferrand
- La Fête de la Science

Chaque animation est accompagnée d'une vidéo sur les cadrans solaires.

Lors de ces représentations, l'ADASTA est reconnue et appréciée.

D'autres initiations à l'astronomie sont prévues fin 2011 et en 2012. Payantes, elles permettront d'envisager des investissements.

Nous continuons aussi à améliorer le contenu de nos conférences et de nos sorties. Vous pourrez prendre connaissance de celles prévues fin 2011 et en 2012 à la fin de cette revue.

La seconde conférence prévue de M. Michel FOURNIER est reportée, le "Grand Saut" n'ayant pas encore eu lieu en raison de problèmes de financement et du retard dans la livraison du ballon. L'ADASTA suit ce dossier.

En ce qui concerne nos revues, le présent numéro est particulièrement varié. L'excellent article de notre ami Jean CHANDEZON reprend le principe de Carnot, évoqué par ailleurs lors de chacune des 3 conférences sur l'énergie. Notons que les 3 conférenciers ont tenu à préciser que toute discussion sur l'énergie doit s'appuyer sur des chiffres réels.

Un sujet est attendu : "Les unités utilisées dans la radioactivité" ou plus généralement « Les unités dans le nucléaire » par Louis AVAN. Cet article paraîtra dans le prochain numéro.

Concernant la revue, nous sommes toujours attentifs à vos remarques et suggestions : articles, lisibilité, images ou illustrations, qualité générale, niveau scientifique et technique.

Le Président, Henri Bouffard

Par ailleurs, nous avons le plaisir de vous annoncer que notre président Henri Bouffard a été décoré et fait Chevalier de la Légion d'Honneur à Chamalières en présence de Louis Giscard d'Estaing début juillet.

En plus de ses activités d'ingénieur dans les mines, la sidérurgie, les compresseurs, l'armement et les pneumatiques s'ajoutent ses deux responsabilités de président de l'URIS et de l'Adasta mais surtout ses activités dans le développement d'orgues à tuyaux particulièrement originaux, soit traditionnels comme celui de l'église de Chamalières, référence reconnue mais aussi pour le développement d'orgues à tuyaux transportables à 2 claviers-pédalier et un jeu de 16', faisant appel à une technicité complexe et des tuyaux à 2 ou 3 sons.

Plus de 150 concerts dans toute la France ont été donnés avec ces instruments qui ont suscité l'admiration et l'étonnement à chaque fois.

Le président a aussi écrit un ouvrage scientifique et technique sur l'orgue, le premier, avec lequel il a fait de multiples conférences, "Une nouvelle approche de l'orgue".

Il est organiste liturgique depuis 45 ans et est organiste à l'orgue de Chamalières depuis 25 ans avec 3 offices par semaine. Il a formé une vingtaine d'organistes liturgiques et participé à la création de 3 CD.

L'ADASTA est très honorée par cette distinction.

Nous avons hélas à déplorer le décès de notre camarade et ami le Professeur Solé. Un hommage lui est rendu dans cette revue par l'ADASTA.

MERCI À NOS SPONSORS



Comité de rédaction de la Revue Auvergne-Sciences

Rédacteur en chef : Philippe Choisel

Membres : Georges Anton, Gérard Baillet, Vincent Barra, Henri Bouffard, Jean-Claude Capelani, Jean Chandezon, Luc Dettwiller, Roland Fustier, Paul-Louis Hennequin, André Schneider

Toute reproduction partielle ou totale interdite

L'équipe de l'ADASTA

SOMMAIRE

| | |
|--|----|
| L'ATP, indicateur de vie | 1 |
| Le principe de Carnot ou pourquoi les centrales nucléaires réchauffent les fleuves | 4 |
| Le cadran solaire du barrage de Castillon | 10 |
| Facile de calculer une éclipse de soleil ? Pas si sûr ! | 13 |
| 8 novembre 2011 : 100 ^e anniversaire du prix Nobel de chimie de Marie Sklodowska-Curie | 16 |
| Partager nos connaissances | 18 |
| Les conférences et sorties 2011 - 2012 | 19 |
| En route vers la voiture écologique | 20 |
| Histoires de plantes et autres | 26 |

Les articles publiés sont de la responsabilité exclusive de leurs auteurs

Couverture : Dessin de Michel Gendraud,
Le rouleau compresseur à vapeur, vu à Royat vers 1950,
retrouvé à Agrivap, Ambert (années 80)

Remerciements également à nos auteurs pour les photos communiquées

Réalisation et conception :
Design'Création - 04 71 02 80 57

L'ATP, INDICATEUR DE VIE



MICHEL GENDRAUD

Agrégé de Physiologie-Biochimie

Professeur honoraire de Physiologie végétale de l'Université Blaise Pascal

Membre de l'ADASTA

Suite à la conférence du 18 mai 2011 « *De Photosynthèses en Respirations* » au cours de laquelle il fut maintes fois fait mention de l'ATP, il est apparu souhaitable de présenter plus précisément cette molécule qui est au cœur de la bioénergétique.

L'ATP, SA STRUCTURE

ATP est l'abréviation d'**adénosine tri-phosphate** dont la formule est représentée à la figure 1. Sa structure part d'une base, l'adénine, à quatre doubles liaisons conjuguées, liée à un sucre, le ribose, pentose cyclisé, formant ainsi l'adénosine, qui est un nucléoside. L'adénosine est liée à une chaîne de trois acides phosphoriques en α , β et γ par rapport au ribose. Ces acides sont ionisés dans les conditions biologiques, ce qui fait de l'ATP, nucléoside tri-phosphate, un anion ATP^{4-} . Par son adénine, l'ATP absorbe la lumière ultra-violette de 260 nm de longueur d'onde, et par son ribose et l'ionisation de ses phosphates, c'est une molécule polaire soluble dans l'eau et les solutions aqueuses, qui sont les solvants des processus vitaux. Cet anion intervient toujours complexé à un cation magnésium Mg^{2+} .

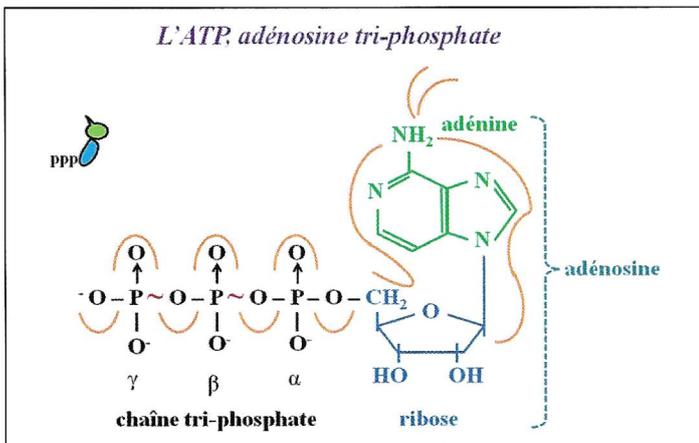


Fig. 1 - Comme une minuscule Nessie, avec une tête d'adénine ornée d'une amine, un corps de ribose et une queue longue de trois phosphates, voici l'adénosine tri-phosphate, ATP, molécule représentative de l'énergie partout dans le vivant. ~, liaison riche en énergie. En haut, à gauche, le petit symbole qui représentera l'ATP dans les figures suivantes (en vert, l'adénine; en bleu, le ribose, et les 3 phosphates en α , β et γ par rapport au ribose).

L'ATP, MOLECULE RICHE EN ENERGIE

La figure 1 montre aussi deux liaisons notées par un tilde ~. Cela indique qu'elles sont riches en énergie c'est-à-dire que, lors de leur hydrolyse, beaucoup d'énergie est dégagée. La cause en est la structure même de la chaîne tri-phosphate. Les conventions de signe veulent que l'énergie dégagée soit comptée négativement. Pour l'ATP, cela représente, pour chacune de ces liaisons, -30 kilojoules par mole (kJ/mole). La figure 2 indique que l'ATP peut céder son énergie par deux réactions, fonctions de la liaison riche hydrolysée, entre α et β ou entre β et γ . La réaction $ATP + eau \rightarrow ADP + P_i$ est la plus fréquente, c'est pourquoi, nous n'examinerons le destin de l'ATP que dans cette situation.

L'ATP est la plus fameuse des molécules riches en énergie, mais ce n'est pas la seule. Sont riches en énergie toutes les molécules ayant une liaison dont l'hydrolyse libère

une énergie inférieure à -20 kilojoules par mole. Le champion, deux fois plus « performant » que l'ATP est le discret phosphoenolpyruvate, avec -62 kJ/mole.

L'ATP libère son énergie par hydrolyse de l'une ou l'autre de ses liaisons riches

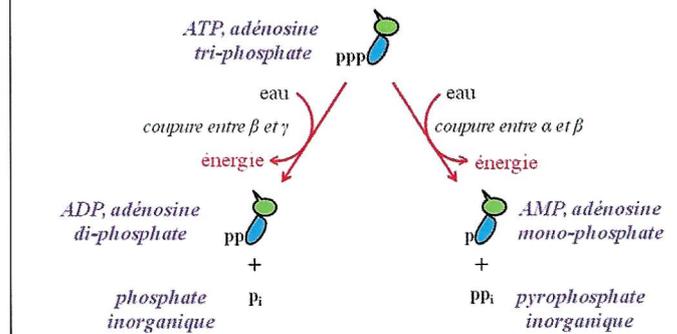


Fig. 2 - Les deux réactions d'hydrolyse par lesquelles l'ATP cède son énergie.

QUE DEVIENT L'ENERGIE LIBEREE PAR L'ATP ?

Il est bien rare que l'énergie libérée par l'ATP soit dissipée en chaleur. En réalité cette énergie est réinjectée dans toutes les réactions qui ont besoin d'énergie pour se faire, en d'autres termes qui correspondent à une mise en jeu d'énergie comptée positivement.

L'exemple type est l'« accrochage » de phosphate sur le glucose pour former le glucose-6-phosphate (fig. 3). L'accrochage, qui demande +12 kJ/mole, est impossible sans apport d'énergie. Un réacteur moléculaire, l'hexokinase, couple une réaction 1 (hydrolyse de l'ATP en ADP et phosphate) et une réaction 2 (formation de glucose-6-phosphate). Le bilan thermodynamique de cette réaction couplée est la somme algébrique des énergies mises en jeu, il est négatif, ce qui rend la réaction possible. Cet accrochage du phosphate est une **phosphorylation**.

L'ATP phosphoryle le glucose en glucose-6-phosphate, en présence du réacteur hexokinase

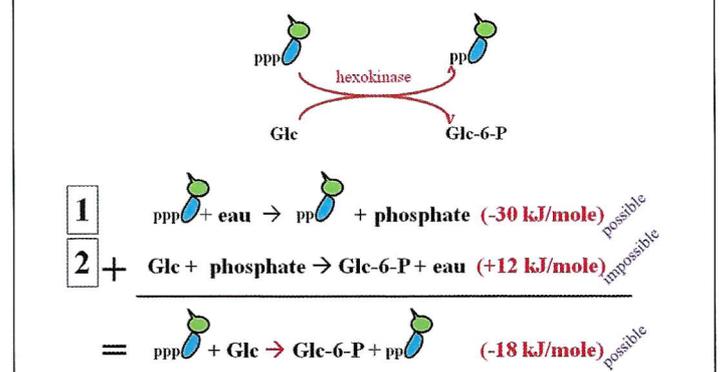


Fig. 3 - Le prototype des réactions couplées, la phosphorylation du glucose en présence d'hexokinase, enzyme réacteur moléculaire. Cette réaction est le bilan de la somme des réactions 1 et 2. Cette somme dégage encore de l'énergie, c'est pour cela qu'elle est possible. Glc, glucose ; Glc-6-P, glucose-6-phosphate.

L'ATP intervient dans d'innombrables phosphorylations nécessitant à chaque fois un réacteur adéquat, une kinase adéquate. Comme pour le glucose la phosphorylation peut être le sésame pour entrer dans le métabolisme, mais lorsqu'elle s'adresse à des protéines, elle change leur conformation, le phosphate introduit étant porteur de charges négatives, et modifie leur fonctionnement ; l'ATP est un acteur des chaînes de transfert d'information.

L'ATP phosphoryle aussi les nucléosides di-phosphates non adényliques, construits sur le modèle de l'ADP, mais dont la base n'est pas l'adénine (fig. 4). Cette fixation conduit aux nucléosides tri-phosphates correspondants, énergétiquement identiques à l'ATP, et dont chacun apportera son énergie à une voie de biosynthèse donnée.

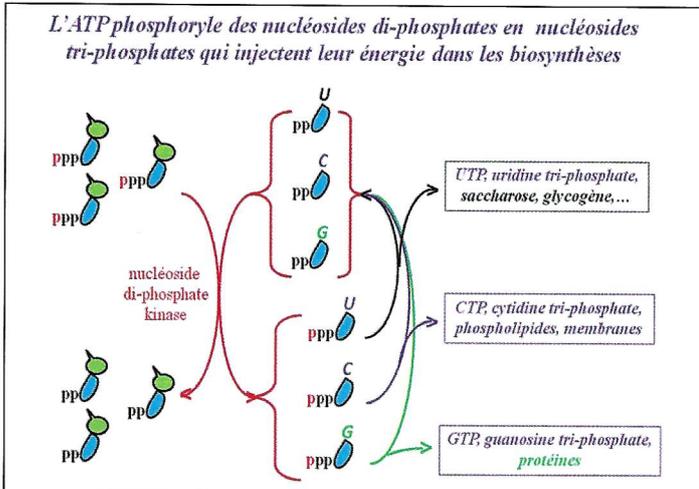


Fig. 4 - L'ATP, répartiteur ubiquiste d'énergie, cède celle-ci à des homologues spécialisés dans certaines biosynthèses (encadrés).

Ayant ainsi transmis l'énergie nécessaire à la confection de ces nucléosides tri-phosphates non adényliques, l'ATP participe avec eux à la synthèse des ARN (acides ribonucléiques) qui lisent le message contenu dans l'ADN.

Enfin, mentionnons que l'énergie libérée par l'hydrolyse de l'ATP en ADP et phosphate est celle qui permet la contraction musculaire et l'ondulation des flagelles des cellules mobiles (spermatozoïdes, algues unicellulaires), donc le mouvement des êtres vivants eucaryotes, constitués de cellules à noyau.

COMMENT L'ATP EST-IL REGENERE A PARTIR DE L'ADP?

L'ADP ne s'accumule jamais dans une cellule vivante. Il retrouve le phosphate pour faire de l'ATP par une réaction inverse de celle de l'hydrolyse et qui demande cette fois... +30 kJ/mole à injecter par une réaction couplée.

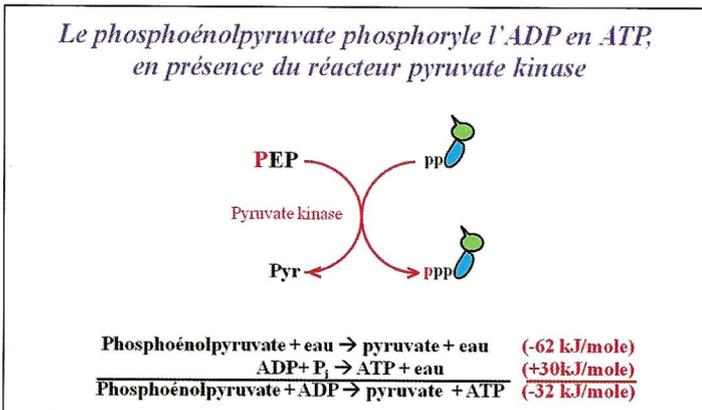


Fig. 5 - Probablement très tôt, le vivant put phosphoryler l'ADP en ATP grâce au phosphoénolpyruvate (PEP) par une réaction couplée dissociable en deux réactions, l'hydrolyse du PEP d'une part et la synthèse d'ATP d'autre part.

Une solution est de faire cette réaction couplée avec un composé riche en énergie plus « performant » que l'ATP qu'il s'agit de reconstruire. Le phosphoénolpyruvate remplit très bien ce rôle (fig. 5) depuis la nuit des temps des fermentations, mais aussi en tube à essai, il suffit que le réacteur adéquat soit là.

Toutefois la régénération de l'ATP se fait à 95 % par l'ATP synthase. Ce réacteur est une sorte de nano-moulin à poivre fixé sur une membrane et qui tourne en synthétisant l'ATP grâce à l'énergie dégagée par le gradient d'ions H⁺ traversant cette membrane (fig. 6). L'ATP synthase date aussi des tous premiers stades de la vie, voici 3,5 milliards d'années, et se trouve sur les membranes de tous les êtres vivants.

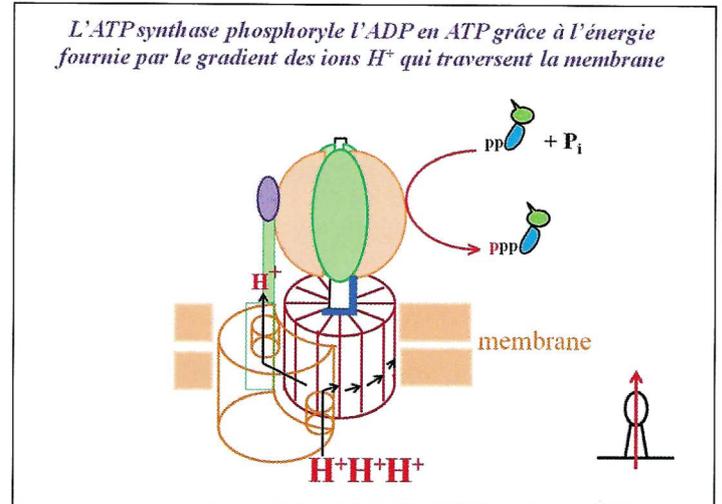


Fig. 6 - L'ATP synthase, toujours encastrée dans une membrane traversée par un gradient d'ions H⁺, assure la synthèse d'ATP, à partir d'ADP et de P_i. L'ATP synthase en fonctionnement sera représentée dans la suite de l'exposé par le symbole en bas et à droite de la figure.

L'ATP, COMPOSE A RENOUVELLEMENT RAPIDE, INDICATEUR DE VIE

L'ATP aussi existe depuis le commencement du monde de la vie et son intervention est toujours la même (fig. 7). Elle reçoit l'énergie d'un distributeur qui accroche son troisième phosphate (en γ), et elle la porte au processus qui en a besoin en lui cédant ce dernier. L'ADP revient alors au distributeur et le cycle recommence. En renouvellement rapide, l'ATP a quelques minutes de demi-vie. **La teneur en ATP est constante dans un organisme donné.** Répartiteur ubiquiste de l'énergie dans les êtres vivants, l'ATP intervient dans tous les mécanismes, anciens ou récents, pour les rendre possibles ou les réguler. Ainsi, la présence d'ATP signifie vie. En d'autres termes, c'est par elle que l'on estime la biomasse d'un milieu.

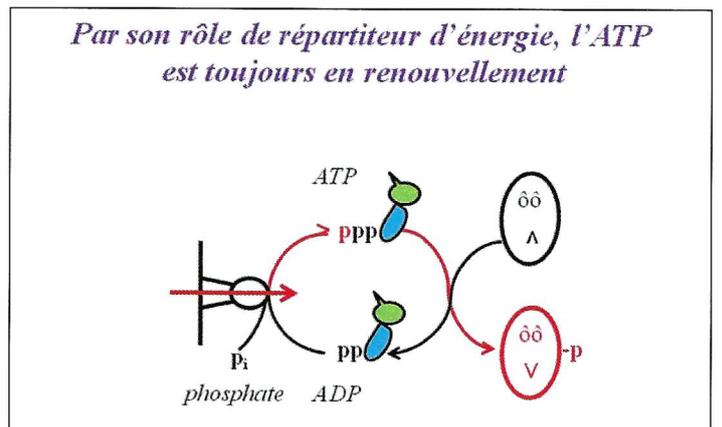
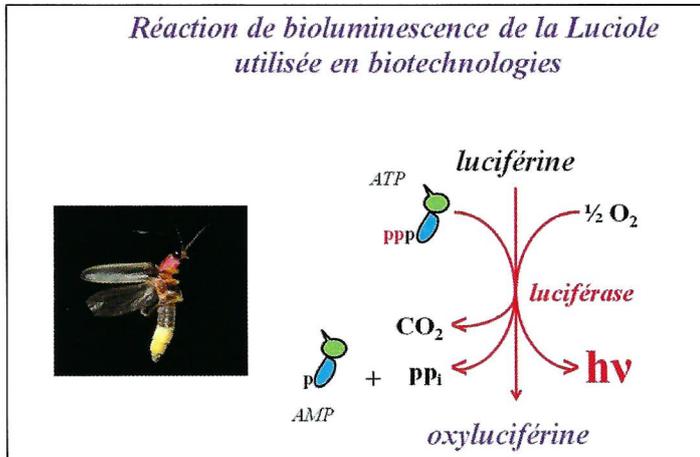


Fig. 7 - Le chemin de l'énergie, en rouge. La place de l'ATP dans le processus de répartition de l'énergie implique son renouvellement rapide.

LE DOSAGE DE L'ATP ET SES RETOMBÉES TECHNOLOGIQUES

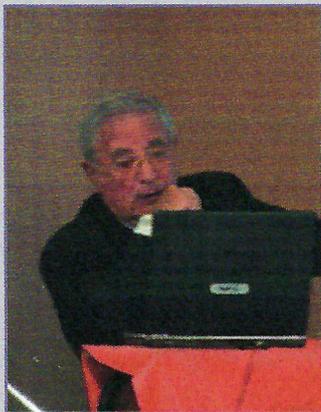
L'ATP donne aussi son énergie au processus de bioluminescence, émission de lumière par le vivant. Le cas le plus étudié est celui de la luciole, *Photinus pyralis*. La figure 8 présente la réaction par laquelle cet insecte, dans sa lanterne abdominale, dispose d'une « lampe », la luciférine, construite à cet effet, qui met en contact l'énergie de l'ATP et le dioxygène, alors qu'un catalyseur, la luciférase, donne du « tirage » à l'oxydation. C'est ainsi que, parmi les branchages, les lucioles s'envoient des messages lumineux. La figure 8 montre que l'ATP cède l'énergie de la liaison riche entre les phosphates α et β puisque de l'AMP est libéré (cf. fig. 2).



La réaction présentée à la figure 8 peut être reproduite en tube à essai, il suffit de mélanger luciférine, luciférase et ATP : l'intensité de la lumière émise est directement proportionnelle à la concentration en ATP ce qui en fait un moyen de dosage de cette molécule. L'ATP étant un indicateur de vie, il est alors possible de quantifier la biomasse dans les liquides biologiques, les eaux, les sols, les surfaces éventuellement souillées... Les bioluminomètres, ou ATP-mètres, construits à cet effet mesurent couramment la picomole d'ATP (10⁻¹² mole) et font florès aux pages d'Internet. Aux origines, voici 40 ans, la mise en œuvre nécessitait de broyer des abdomens desséchés de lucioles (firefly lantern) contenant luciférine et luciférase. Maintenant, la première est synthétisée par voie chimique, la seconde par génie génétique avec des bactéries qui ont reçu le gène luciférase de l'insecte et, par la grâce de l'informatique, les bioluminomètres ou ATP-mètres de terrain ne sont guère plus gros qu'un téléphone portable.

Fig. 8 - La photo montre une luciole et sa lanterne éclairée. La réaction productrice de lumière (hv) provient de l'injection de l'énergie de l'ATP au cours de l'oxydation de la luciférine.

IL NOUS A QUITTÉS



Pierre SOLE, Président honoraire de l'ADASTA nous a quittés cet été.

Voici quelques lignes écrites par lui, peu avant sa mort :

*« Je veux tout partager, bien sûr la mort est là !
Entends son pas léger troublant le silence diaphane.
Une lumière m'enveloppe, alors qu'elle m'honore.
Tu t'enfonces dans ton dernier sommeil sans éclat.
Tes sens comme des bougies s'éteignent peu à peu.
Qui lâchera le premier la main de l'autre ? »*

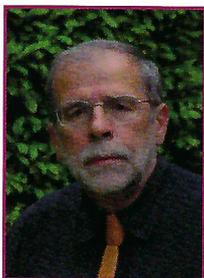
Chercheur émérite et novateur, le professeur Pierre Solé, qui dirigea pendant de longues années le service d'ophtalmologie du CHU de Clermont-Ferrand s'est éteint à l'âge de 77 ans. Il a été inhumé au cimetière de Montluçon.

Catalan de naissance mais solidement enraciné dans la capitale auvergnate où il a bâti carrière et réputation, il était considéré comme l'un des meilleurs de sa spécialité en France.

Pierre Solé a toujours témoigné de son attachement au développement conjugué de sa discipline et de la promotion de sa ville adoptive, comme il a toujours cherché à cultiver des relations entre le monde universitaire auquel il appartenait et l'industrie.

Il a beaucoup fait pour l'ophtalmologie par la publication de nombreux ouvrages.

A son épouse, à sa famille, l'ADASTA présente ses sincères condoléances.



JEAN CHANDEZON

Docteur es-sciences, Professeur émérite de l'Université Blaise-Pascal, Vice-président de l'Adasta

LE PRINCIPE DE CARNOT

OU, POURQUOI LES CENTRALES NUCLÉAIRES RÉCHAUFFENT LES FLEUVES

INTRODUCTION

Je me suis décidé à faire cette conférence à la suite d'une visite que l'Adasta avait organisée à la centrale nucléaire de St-Alban. Cette centrale, dont le refroidissement est assuré directement par de l'eau prélevée dans le Rhône, ne possède pas de tours aéroréfrigérantes visibles de très loin. La personne chargée de la visite nous a montré le système de refroidissement en nous donnant le débit et le réchauffement de l'eau. Par un petit calcul fait de tête, utilisant le principe de Carnot, j'ai immédiatement vérifié ces données. Je me suis alors aperçu que la chargée de communication ignorait tout de ce principe qui, pourtant, est à l'origine de la limitation du rendement de la centrale et de l'obligation du refroidissement avec une énorme quantité d'eau. La méconnaissance du principe de Carnot conduit souvent à avoir des idées complètement fausses sur l'important problème de l'énergie. Il faut rappeler que les lois de la physique s'appliquent même si l'on n'y croit pas et que leur meilleure connaissance permettrait souvent d'éviter des polémiques totalement stériles au sujet d'utopies énergétiques.

A la fin du XVIII^e siècle les machines à vapeur commençaient à se répandre ; pour leur fonctionnement elles utilisaient une très grande quantité de charbon. Pour les ingénieurs de l'époque, une question cruciale était : comment améliorer leur très faible rendement (de quelques pourcents) ; cela se faisait empiriquement avec des résultats plus ou moins heureux : de nombreuses chaudières explosaient. Carnot s'est penché sur ce problème et, par la seule puissance de l'esprit, il a montré que, quelle que soit la technologie choisie, le rendement maximum d'une « machine à feu » a une limite théorique infranchissable. La limitation qu'il a découverte s'applique tout autant de nos jours et c'est elle qui explique pourquoi les centrales nucléaires sont toujours placées soit au bord d'un grand fleuve, soit au bord de la mer qui sont d'importants réservoirs d'eau froide.

SADI CARNOT

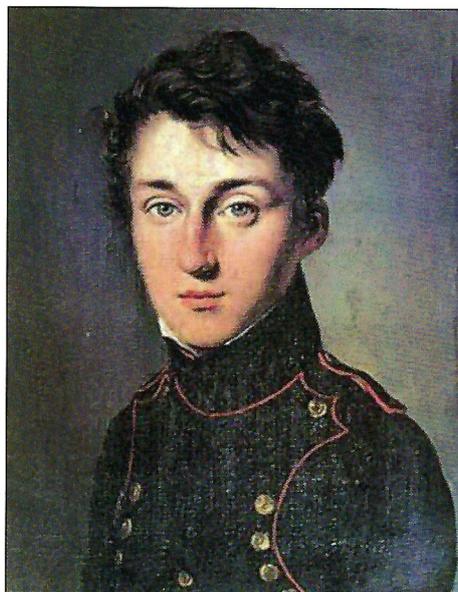


Fig. 1 - Sadi Carnot

Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832), usuellement appelé Sadi Carnot, voire Carnot tout court par les physiciens, est un savant français. Il ne publia qu'un seul petit livre de 118 pages, *Réflexions sur la puissance motrice du feu* (Paris, 1824). Ce livre est passé à peu près inaperçu à son époque, il a été redécouvert, entre autres par Clausius ; de nos jours, il est considéré comme le point de départ de la Thermodynamique classique.

Dans la famille Carnot on trouve plusieurs célébrités :

- son père, Lazare Carnot (1753-1823) dit le Grand Carnot, mathématicien et brillant ingénieur, élève de Gaspard Monge, fut ministre de la Guerre de Napoléon Bonaparte d'avril à octobre 1800 puis ministre de l'Intérieur lors des Cent-Jours, en 1815.

- Son frère, Lazare Hippolyte Carnot (1801-1888), qui fit une carrière politique. Député de 1839 à 1848, ministre de l'Instruction en 1848 du président Louis Napoléon Bonaparte, il refusa de soutenir le Second Empire, et fut député en 1871, sénateur en 1875, académicien des Sciences morales en 1887.

- Son neveu, Marie François Sadi Carnot (1837-1894), homme politique, ministre des Travaux publics de 1879 à 1880 puis ministre des finances de 1885 à 1886. Il fut élu président de la République Française en 1887 et fut assassiné en 1894 à Lyon par l'anarchiste Caserio.

Lorsque, comme à Clermont-Ferrand, on trouve, sans plus de précisions, une avenue Carnot, on peut penser que c'est un hommage rendu à l'ensemble de la famille.

PHILOSOPHIE NATURELLE ET PHYSIQUE

La philosophie naturelle

Depuis toujours les hommes ont cherché à comprendre le monde physique dans lequel ils vivent. Ce qui deviendra par la suite la physique n'était au départ qu'une branche de la philosophie : la philosophie naturelle, dont le but était d'expliquer l'Univers à partir de quelques principes simples à énoncer et à comprendre, formant un ensemble cohérent. Les philosophes de la Grèce ancienne, au V^e siècle av. J.-C. dont notamment Empédocle ont introduit l'hypothèse des quatre éléments :

- La Terre
- L'Air
- L'Eau
- Le Feu



Fig. 2 - Les solides de Platon

Ces éléments s'opposent deux à deux : l'Eau et le Feu, la Terre et l'Air. Tous les corps sont composés de parties variables de ces éléments, leur composition reflète leurs propriétés. Le bois qui brûle contient du feu, l'alcool

est une eau avec du feu, l'atmosphère de l'air et de l'eau... Platon associe à chacun de ces éléments un solide parfait, la Terre était associée avec le cube, l'Air avec l'octaèdre, l'Eau avec l'icosaèdre et le Feu avec le tétraèdre. Ces associations sont faites en fonction des propriétés de l'éléments considéré : le feu est pointu alors que l'air est doux. Un corps quelconque est un mélange de ces solides. A cela il faut ajouter le dodécaèdre, proche de la sphère, qui représente l'Univers.

Avec cette théorie si l'on peut à peu près tout expliquer avec des mots, on ne peut rien prévoir. C'est un peu, pour les esprits chagrins, la situation de l'économie qui explique parfaitement, après coup, toutes les crises mais qui est incapable de les prévoir. Cependant, il ne faut pas croire qu'il n'y a pas un fond de vérité dans cette approche, car on retrouve bien les trois états principaux de la matière : gazeux, liquide et solide, le feu représentant les interactions chimiques.

La physique

Avec Galilée puis Pascal, Newton et tous leurs successeurs la physique entre dans l'ère quantitative où le monde est expliqué par des théories et des principes qui s'expriment avec des équations mathématiques. La physique permet alors de prévoir l'évolution des choses. Le monde n'est plus expliqué uniquement avec des mots mais surtout avec des équations. Ce phénomène est maintenant très visible dans les livres de physique modernes où la part des mots se réduit de plus en plus au profit des équations si bien que la plupart des gens pensent que la physique n'est qu'un ramassis d'équations totalement incompréhensibles pour le commun des mortels.

Le Graal du physicien est la théorie du tout qui rassemblerait toutes les lois de l'univers en une seule ; il semble bien que cela ne soit qu'une chimère et que, à chaque fois que les physiciens pensent être près du but, de nouvelles difficultés apparaissent qui éloignent à nouveau l'horizon de la connaissance.

ENERGIE, CHALEUR ET TEMPÉRATURE

Quoi de plus banal que l'énergie et la chaleur, pourtant, lorsqu'on tente de donner une définition précise à ces notions, on se rend très vite compte de la difficulté de la chose. En fait, cela est très banal en physique où l'on sait très bien faire des calculs sur des grandeurs qu'on ne sait pas très bien définir : on peu prendre comme exemple l'électricité ou la mécanique, disciplines dans lesquelles la nature profonde de l'électron ou de la masse échappe totalement à l'analyse.

L'énergie

L'énergie est une grandeur abstraite qui traduit la possibilité, ou potentialité, de fournir entre autres :

- du travail : l'essence en contient car, dans un cyclomoteur, elle permet de remplacer le travail des jambes du cycliste, c'est une énergie chimique. Le moteur transforme l'énergie du carburant en travail. En haut d'un col le cycliste possède une énergie, dite potentielle, car il peut redescendre cette fois-ci sans pédaler.

- de la chaleur : un morceau de bois contient de l'énergie car il est capable de chauffer.

- et en général un mélange des deux : pour gravir une montagne le moteur d'une voiture chauffe.

A cela il faut ajouter une autre grandeur : la puissance qui mesure un travail par unité de temps, c'est-à-dire la vitesse à laquelle l'énergie est mobilisée pour fournir un travail. C'est pour cette raison qu'au début du machinisme on mesurait la puissance disponible d'une machine en la comparant à celle que pouvait fournir un cheval, de là l'unité du cheval-vapeur (CV). Actuellement l'unité de puissance est le watt : $1 \text{ cheval-vapeur} = 736 \text{ watts}$.

Dans l'approche ancienne de la philosophie naturelle l'énergie se dépensait sous la forme de feu. A la fin du XVII^e siècle un savant Allemand Georg Ernst Stahl proposa une séduisante théorie : celle du phlogistique. Les corps inflammables contiennent plus ou moins une substance subtile appelée phlogistique et, par conséquent, après la combustion il y a eu diminution de la masse par la perte du phlogistique, les cendres sont d'autant moins abondantes qu'il y avait, au départ, plus de phlogistique dans le matériau. Cette théorie qui supposait la disparition de la matière a commencé à être mise à mal lorsque l'on s'est aperçu que la combustion de métaux, on parle alors de calcination, conduisait à des cendres d'un poids supérieur à la quantité de métal d'origine. Avec les travaux de Lavoisier et la célèbre phrase qui lui est attribuée : « rien ne se perd, rien ne se crée tout se transforme » la théorie du phlogistique a été abandonnée au profit de la chimie moderne.

La chaleur

Là encore, voilà une notion familière qui est de nature complexe. Jusqu'à la fin du XIX^e siècle la chaleur était considérée comme un fluide sans masse : le calorique, qui s'écoule des corps chauds vers les corps froids à la manière de l'eau

qui va des points hauts vers les points bas. Les matériaux différents peuvent emmagasiner plus ou moins de calorique ce qui donne la capacité calorifique. A l'époque de Carnot on postulait que, comme pour l'électricité, le calorique se conservait, ce qui est faux. Malgré tout, en raisonnant avec la fausse hypothèse de la conservation du calorique, Carnot a établi son principe, sa démonstration était donc entachée d'une erreur de base mais, comme l'a montré Clausius, avec une légère modification dans le raisonnement le résultat reste le même, il est donc exact.

A la fin du XIX^e siècle il a bien fallu se rendre à l'évidence que la matière n'est pas continue mais constituée d'atomes et de molécules et que la chaleur n'est que la traduction de l'agitation moléculaire. On continue cependant, en physique, à parler de quantité de chaleur notée Q , très souvent mesurée en calories ce qui revient à donner un autre nom au calorique. Finalement, la chaleur est la conséquence d'un ensemble de mouvements désordonnés, elle n'est donc qu'une forme « dégradée » du travail, alors que les mouvements ordonnés en sont la partie « noble ».

La température

Définir ce qu'est la température et la mesurer n'a pas été simple. De façon intuitive on sait assez bien classer subjectivement les températures : glacé, froid, tiède, chaud, brûlant... Pour obtenir une échelle de température objective on a fait appel à la dilatation des corps : gaz, liquides ou solides. Si l'on fait l'hypothèse que la dilatation est proportionnelle à la température on mesure cette dilatation entre deux points de référence et l'on divise ensuite cet intervalle en degrés de chaleur. Pour les Français, les points choisis sont la congélation de l'eau à 0° et l'ébullition à 100° ce qui, à l'origine a constitué l'échelle centigrade, devenue par la suite échelle Celsius. Pour les anglo-saxons c'est l'échelle Fahrenheit qui fut choisie ; elle est, dans un certain sens, plus

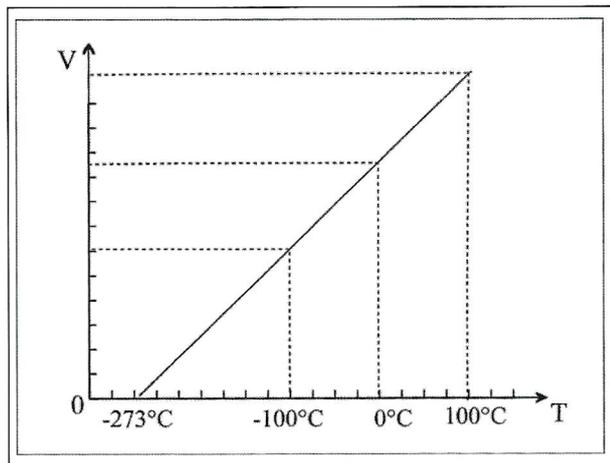


Fig. 3 - Dilatation des gaz

commode car dans la vie courante il n'y a presque jamais de température négative et la température du corps humain est pratiquement de 100°. La conversion s'écrit : $T^{\circ}\text{C} = (T^{\circ}\text{F} - 32) \times 5/9$.

Cette définition de la température n'est pas très satisfaisante car elle ne permet que des comparaisons et n'a pas de zéro bien défini. Vers la fin du XVIII^e siècle avec les études sur les gaz et, en particulier la loi Gay-Lussac, on s'est rendu compte que si l'on refroidit un gaz son volume diminue proportionnellement avec la température et que l'on peut alors, par extrapolation, déterminer une température pour laquelle le volume s'annule et donc choisir ce point comme température zéro. On l'a appelé température absolue. Elle était déjà connue de Carnot qui utilisait la valeur de l'époque de -267°C finalement assez proche de la valeur actuelle de -273,15°C.

Pour Carnot un corps porté à -267°C ne contient plus de calorique. Pour le physicien moderne un corps dont la température serait de -273,15°C, ce qui est impossible à atteindre, aurait toutes ses molécules immobiles.

LES PRINCIPES DE LA THERMODYNAMIQUE CLASSIQUE

Actuellement et surtout dans la littérature Anglo-saxonne on considère que la thermodynamique est basée sur deux principes :

Le principe d'équivalence travail chaleur

- Le principe d'entropie

C'est ce point de vue qui a été adopté par Jean-Karl Platten dans sa conférence à l'Adasta du 12 janvier 2011.

Lorsque j'étais étudiant à Clermont, au début des années soixante, le Professeur Emmanuel Dubois enseignait qu'il y avait trois principes. On trouve aussi des gens qui disent qu'il y a quatre principes en ajoutant un principe zéro. Les deux principes les plus importants sont le premier et le second.

Le principe zéro

Il concerne la notion d'équilibre thermique, il est à la base de la thermométrie. Si deux systèmes sont en équilibre thermique avec un troisième, alors ils sont aussi ensemble en équilibre thermique.

Le premier principe

C'est le principe de conservation de l'énergie qui affirme que, dans un système fermé, l'énergie est toujours conservée donc son énergie totale reste constante.

En thermodynamique il est la conséquence de l'équivalence du travail et de la chaleur montré par James Prescott Joule (1818-1889) dans une expérience restée célèbre, faite en 1843, qui l'a conduit à établir l'équivalence d'une calorie avec 4.18 joules (la calorie étant la quantité de chaleur nécessaire pour élever un gramme d'eau de 1°C). On a donné le nom de Joule à l'unité de travail.

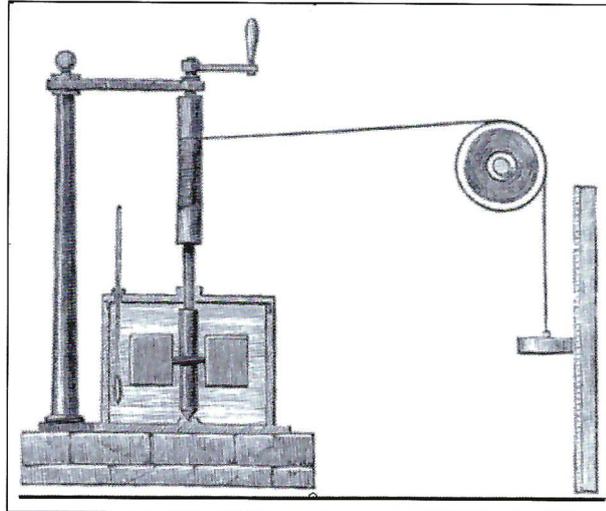


Figure 4 - L'expérience de Joule

Il faut bien remarquer que les lois de conservation ne s'appliquent qu'à des systèmes finis et que pour des systèmes infinis cela n'a pas de sens. C'est pour cette raison qu'il faut obligatoirement considérer un système fermé.

Le deuxième principe

Egalement connu sous le nom de principe de Carnot, il établit l'irréversibilité des phénomènes physiques, en particulier lors des échanges thermiques où la chaleur passe toujours du corps chaud vers le corps froid et jamais l'inverse. C'est un principe d'évolution qui fut énoncé pour la première fois par Sadi Carnot en 1824 sous la forme suivante :

« Dans une machine parfaite, la puissance motrice de la chaleur est indépendante des agents mis en œuvre pour la réaliser ; sa quantité est fixée par la température des corps entre lesquels se fait en dernier résultat le transport du calorique ».

Depuis, tout au long du XIX^e siècle et au delà, il a fait l'objet de nombreuses généralisations et formulations successives : Clapeyron (1834), Clausius (1850), Lord Kelvin, Ludwig Boltzmann en 1873 et Max Planck.

Ce principe a une origine statistique : à la différence du premier principe, les lois microscopiques qui gouvernent la matière ne le contiennent qu'implicitement et de manière statistique. En revanche, il est assez indépendant des caractéristiques mêmes de ces lois, car il apparaît

également si l'on suppose des lois très simplistes à petite échelle.

Le troisième principe

Initialement pour Clausius il s'exprimait ainsi :

« Il est impossible de transporter directement ou indirectement de la chaleur d'un corps froid sur un corps chaud à moins qu'il n'y ait en même temps destruction de travail ou transport de chaleur d'un corps chaud sur un corps froid ».

C'est ce principe qui a conduit à introduire une grandeur abstraite, l'entropie qui, pour un système isolé, caractérise le désordre : le désordre ne peut qu'augmenter. En langage vulgaire le système évolue toujours vers un désordre croissant : le puzzle qui était dans un ordre parfait, ne peut après une manipulation quelconque n'être que plus désordonné, si l'on jette les pièces en l'air elles ne retomberont jamais bien assemblées. En

thermodynamique classique on peut se passer de ce troisième principe.

LES LOIS DE CONSERVATION ET L'INFINI

Pour montrer la difficulté qu'il y a avec les lois de conservation et l'infini on peut prendre pour exemple celui qui est connu sous le nom l'hôtel infini de Hilbert. David Hilbert (1862-1943) un mathématicien allemand, considéré comme l'un des plus grands mathématiciens du XX^e siècle, utilisait l'exemple de l'hôtel pour illustrer les difficultés qui apparaissent avec l'infini.

La loi de conservation des chambres d'hôtel

Supposons qu'il existe un monde dans lequel les chambres d'hôtel sont conservatives : si une chambre est détruite à un endroit une autre est créée à un autre endroit.

- Considérons un monde fini et isolé, une île par exemple, le nombre de chambres numérotées de 1 à N est fini, il est égal à N. La société des finiticiens physiciens possède N participants, elle organise un congrès sur l'île et loue toutes les chambres d'hôtel : l'hôtel du Grand-Hilbert est complet. Si la société des mathématiciens finiticiens organise un congrès au même moment, impossible de les loger.

- Considérons un monde infini où l'hôtel du Grand-Hilbert possède un nombre infini de chambres toutes numérotées avec une plaque portant un numéro

m allant de 1 à l'infini. Les physiciens infiniticiens, en nombre infini organisent un congrès, le président réserve toutes les chambres, l'hôtel est complet.

- Cette fois ci, le président de la société des mathématiciens infiniticiens, portant également un badge avec un numéro n allant de 1 à l'infini, arrive à l'hôtel, le responsable lui dit qu'il est impossible de les loger car l'hôtel est plein, il répond : c'est vrai mais vous pouvez tout de même nous loger en procédant comme suit :

- Les physiciens prennent les chambres paires et les mathématiciens les chambres impaires. Le physicien possédant le badge n va prendre la chambre $m=2n$, le mathématicien possédant le badge n va prendre la chambre $m=2n-1$ et cela jusqu'à l'infini : tout le monde a une chambre. Mieux encore, on peut laisser vide la chambre numéro 1 en attribuant aux mathématiciens les chambres numérotées $2n+1$.

- Dans un hôtel infini plein il peut donc y avoir une infinité de chambres vides !

Cet exemple fait bien prendre conscience qu'une loi de conservation n'a de sens que dans un univers fini, dans un univers infini elle n'est d'aucun secours. La méconnaissance de cette propriété de l'infini permet de démontrer à peu près n'importe quoi comme le font par exemple les frères Bogdanoff dans leur récent livre *Le visage de Dieu*.

LE THÉORÈME DE CARNOT

L'énergie calorifique $W=Q$ contenue dans un système fini isolé, de gaz par exemple, est proportionnelle à la température absolue T . Elle peut donc s'écrire $W=aT$ où a est un coefficient qui dépend du système. Le travail que l'on peut extraire de ce gaz est donc au maximum W ce qui impliquerait, qu'après l'extraction, il soit au zéro absolu : température $T=0$. Pour extraire de l'énergie thermique il faut refroidir le gaz ; pour lui fournir de l'énergie thermique il faut le chauffer donc avoir une chaudière appelée source chaude de température T_1 . Avec un raisonnement de ce type, Carnot a montré que pour transformer de l'énergie thermique en énergie mécanique il faut disposer de deux sources de chaleur : une source froide de température T_0 et une source chaude de température T_1 . Calculer le rendement théorique maximum r d'une machine thermique est alors très simple : c'est le rapport entre l'énergie maximum extraite $a(T_1 - T_0)$ et l'énergie thermique totale que l'on pourrait extraire $W=aT_1$:

$$r = \frac{T_1 - T_0}{T_1} = 1 - \frac{T_0}{T_1} < 1$$

Cette relation très simple constitue le théorème de Carnot. Les températures qui interviennent sont les températures absolues. On peut montrer qu'un tel rendement n'est accessible qu'avec une machine idéale, réversible, fonctionnant selon un cycle bien particulier : le cycle de Carnot ; pour tous les autres cycles le rendement maximum est inférieur. Le corollaire de ce principe est l'impossibilité du mouvement perpétuel qui serait la création de travail à partir de rien.

On remarque que le rendement d'une machine thermique est d'autant meilleur que la chaudière est plus chaude et que la source froide, souvent l'atmosphère, est plus froide. Pour une machine fonctionnant entre $20^\circ\text{C}=293^\circ\text{K}$ et l'eau bouillante

à gaz ne faisant pas appel à la vapeur, le principe de base est le suivant :

1. Un cylindre muni d'un piston rempli de gaz est posé sur la source froide de température T_0 le gaz se contracte.

2. On place une masse m sur le piston : le piston descend, il y a compression et réchauffement.

3. Le cylindre est placé sur la source chaude à température T_1 , il y a dilatation.

4. On enlève la masse m qui est maintenant à une hauteur h , il y a eu production d'un travail, le gaz se détend et se refroidit.

5. On recommence le cycle.

Avec ce cycle le travail fourni par la machine est celui nécessaire pour faire monter la masse m de la hauteur h .

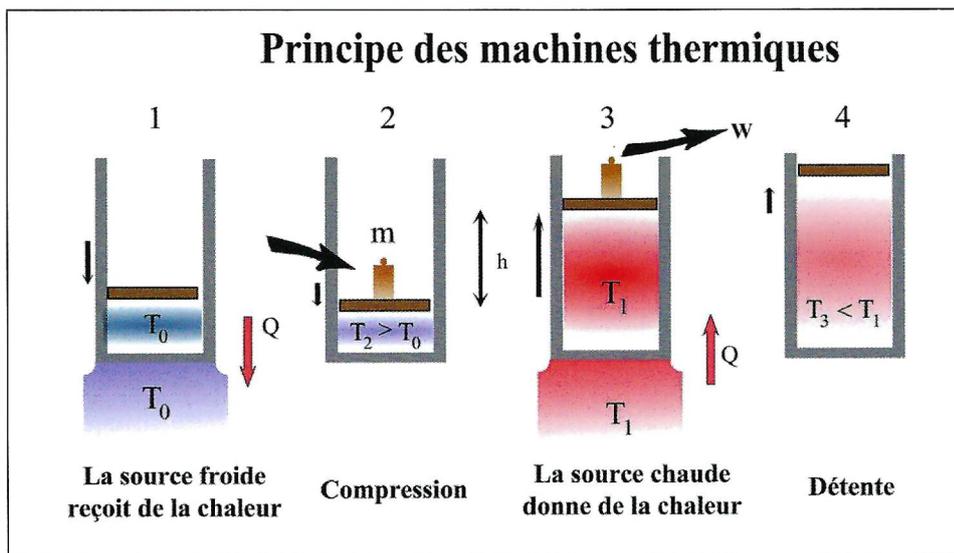


Fig. 5 - Un cycle thermique

$100^\circ\text{C}=373^\circ\text{K}$ le rendement maximum n'est que de 21,5%. Il y a donc plus de 78,5 % de l'énergie calorifique fournie par la chaudière qui est perdue, elle ne sert qu'à réchauffer la source froide, il faut donc l'évacuer pour éviter que la source froide, le radiateur du moteur d'une voiture par exemple, ne monte en température.

Pour une centrale nucléaire la température de la source chaude, de la vapeur d'eau, est de l'ordre de $300^\circ\text{C}=573^\circ\text{K}$ et celle de la source froide aux alentours de 25°C ; le rendement théorique maximum est de 48 %.

LE CYCLE TRÈS SIMPLIFIÉ D'UNE MACHINE THERMIQUE

Les machines thermiques, appelées machines à feu du temps de Carnot, fournissent du travail à partir de la vapeur d'eau obtenue dans une chaudière souvent chauffée au charbon. Le rendement des premières machines à vapeur était dérisoire, de l'ordre de quelques pour cents. Pour des raisons de simplicité nous considérons un cycle

LES MACHINES THERMIQUES

Ce qui est actuellement considéré comme l'ancêtre des machines thermiques est l'éolipyle conçue par Héron d'Alexandrie (1^{er} siècle ap. J.-C.). Ce n'est qu'un dispositif de démonstration où la vapeur fait tourner une sphère.

Le précurseur de la machine à vapeur est Denis Papin (1647-1712). C'est lui qui, en 1690, fabrique le premier cylindre à vapeur puis, en 1707, le premier bateau à vapeur qui navigua sur la Fulda en Allemagne, bateau qui fut détruit par des marins inquiets du progrès technique.

Le premier à concevoir une machine à vapeur, qui ait réellement fonctionné dans le temps, est l'anglais Thomas Savery qui dépose, en 1698, un brevet sur une pompe destinée à l'exploitation minière, fonctionnant à la vapeur. Cette pompe sans piston fut utilisée pour pomper l'eau des mines de charbon anglaises.

La première machine à piston fut construite par Newcomen associé de Thomas Savery. Cette machine à vapeur

possède un cylindre de très grand volume où l'on injecte de la vapeur d'eau bouillante puis, pour provoquer le retour du cylindre, de l'eau froide. Cette machine actionnait une pompe alternative.

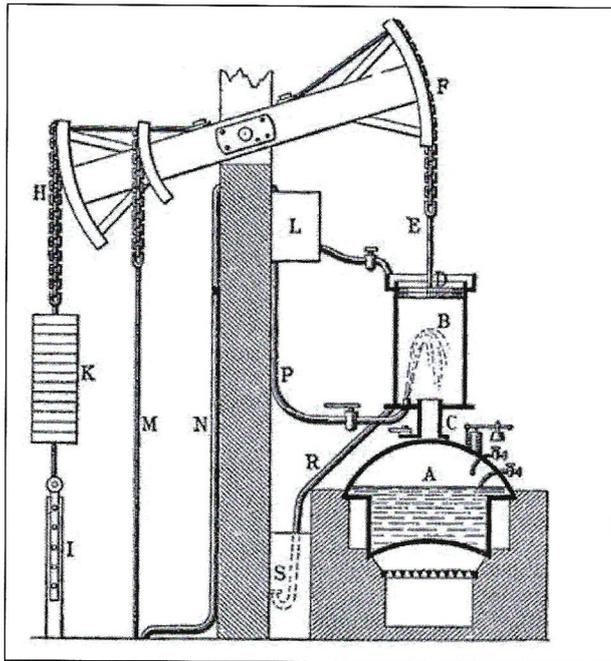


Figure 6 - La machine de Newcomen

La maturité de la machine à vapeur a été atteinte avec James Watt (1736-1819) qui entre 1768 et 1788 introduit de nombreuses innovations majeures :

- la haute pression qui augmente le rendement,
- la double action : le cylindre est moteur dans les deux sens,
- un balancier articulé, dit parallélogramme, de Watt qui transforme le mouvement rectiligne du piston en mouvement de rotation,
- le volant d'inertie qui supprime les à-coups,
- la source froide est un condenseur, nettement séparé du cylindre,
- le régulateur à boules qui diminue les risques d'explosion.

Avec la machine de Watt la machine à vapeur est devenue fiable ; en 1800 il y en avait environ 500 qui fonctionnaient dans le monde, la révolution industrielle commençait.

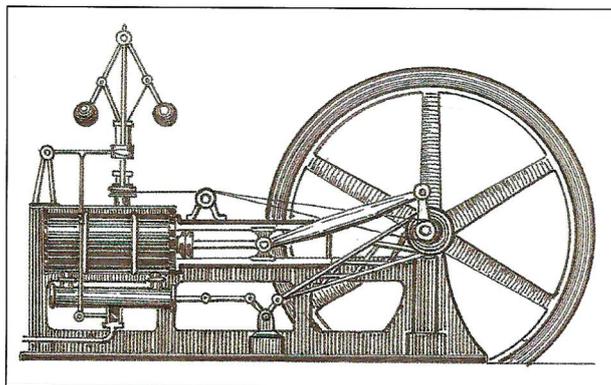


Figure 7 - La machine de Watt, dessin de Michel Gendraud

Les turbines à vapeur

Elles sont utilisées dans les centrales électriques. Leur rendement est bien meilleur que celui des machines à piston car il n'y a que des pièces en mouvement rotatif et donc pas en mouvement alternatif générateur de pertes. Elles fonctionnent avec le cycle suivant :

- l'eau liquide est mise en pression par une pompe et envoyée vers la chaudière,
- l'eau est chauffée, vaporisée et surchauffée,
- la vapeur se détend et refroidit dans la turbine en fournissant de l'énergie mécanique,
- la vapeur détendue est condensée au contact de la source froide sous vide partiel.

Les turbines ont un bien meilleur rendement que les machines à piston à condition de n'être utilisées qu'au voisinage du régime optimum. Elles ne sont pas du tout adaptées aux véhicules terrestres qui changent fréquemment de régime.

POURQUOI LES CENTRALES NUCLEAIRES RECHAUFFENT LES FLEUVES

Dans une centrale nucléaire la chaudière utilise du carburant fissile qui, sous un très faible volume, peut fournir une énorme quantité de chaleur servant, comme dans une machine à vapeur, à chauffer de l'eau. Dans les centrales à eau bouillante, comme celle de Fukushima au Japon, cette eau fournit de la vapeur sous pression qui actionne directement la turbine. Dans les centrales françaises à eau pressurisée cette eau réchauffe un circuit secondaire qui actionne la turbine.

L'eau du circuit primaire, la source chaude est aux environs de 300°C et la source froide à la température ambiante vers 25°C. Le rendement théorique maximum est donc :

$$r = \frac{573 - 293}{573} = 0.49$$

Dans la pratique le rendement réel n'est guère que de 33%, il faut donc évacuer les deux tiers de la chaleur dégagée par le combustible nucléaire.

La puissance d'un réacteur nucléaire est de l'ordre de 1 gigawatt, il y a donc 2 gigawatt à évacuer en chaleur. Pour cela il y a, selon la quantité d'eau froide disponible, deux techniques :

- **Réchauffement d'une grande quantité d'eau.** Avec 4.18 kW on réchauffe 1 litre d'eau de 1°C par seconde, avec 20 kW on réchauffe ce même litre de 4,2°C. Pour évacuer 2 gigawatt il faut donc un débit de 100 000 litres par seconde soit 100 m³ par seconde avec un réchauffement de 4,2°C. Si l'on prend un tuyau de section 10 m² soit 3,16 m de diamètre, cela donne une vitesse de l'eau de 10 m/s ce qui absorbe une assez importante énergie. On voit tout de suite que ce type de refroidissement n'est possible qu'avec une grande quantité d'eau, la présence d'un fleuve ou de la mer est indispensable.

- **Evaporation d'une grande quantité d'eau.** L'utilisation de la chaleur de vaporisation de l'eau permet de diminuer la consommation d'eau. Pour vaporiser 1 litre d'eau par seconde il faut fournir 2260 kW donc pour absorber 2 GW il faut vaporiser 885 litres d'eau par seconde, soit un peu moins d'un mètre cube par seconde. Avec cette méthode il faut beaucoup moins d'eau mais elle est évaporée dans l'atmosphère, c'est elle qui est à l'origine des panaches de vapeur que l'on voit sortir des immenses tours de refroidissement.



Figure 8 - les tours réfrigérantes

Finalement, pour fonctionner, une centrale électrique de puissance, nucléaire ou autre consomme donc beaucoup d'eau, c'est pour cette raison qu'on les rencontre soit au bord d'un fleuve soit au bord de la mer.

LE CHAUFFAGE

Si l'on dispose d'une source de chaleur, un poêle ou une chaudière, le chauffage d'une habitation ne pose aucun problème et le rendement peut être proche de 100 % (il y a toujours un peu de chaleur qui s'échappe avec les fumées). Ce rendement peut même dépasser 100 % si l'on condense la

vapeur d'eau et que l'on récupère ainsi la chaleur de vaporisation de l'eau contenue dans les fumées (mais il faut alors évacuer les condensats qui peuvent être acides à cause du soufre contenu dans le carburant).

Pour un physicien, le chauffage électrique est une hérésie car, pour chauffer une habitation il faut rejeter dans l'atmosphère ce qui pourrait chauffer deux autres habitations. Si cela peut se justifier pour les centrales nucléaires de très grande puissance installées loin des grandes villes, ce n'est pas le cas pour la filière gaz où il vaut bien mieux, pour le bilan énergétique, équiper les habitations de chauffages individuels ou collectifs à gaz.

La cogénération

Elle consiste à utiliser l'énergie perdue dans le refroidissement des centrales électriques pour alimenter des réseaux de chaleur. C'est la solution la plus intéressante pour le bilan énergétique ; malheureusement, les centres de production qui disposent d'énormes quantités de chaleur sont souvent très éloignés des zones urbaines. Il y a également un frein à cette utilisation en raison de la peur engendrée par le nucléaire : on voit mal la population accepter sans crainte un réseau de chaleur provenant d'une centrale nucléaire. La cogénération commence cependant à s'installer avec des petites centrales électriques, parfois à bois, associées à des réseaux de chaleur comme ce sera bientôt le cas dans les quartiers nord de Clermont-Ferrand.

Les pompes à chaleur

La chaleur ne passe pas d'un corps froid vers un corps chaud : il n'est pas possible de chauffer avec du froid ! Si l'on consent à dépenser de l'énergie cela devient possible avec la pompe à chaleur.

Le principe de la pompe à chaleur est très simple. Si dans le cycle d'une machine thermique au lieu de faire monter un poids on met un poids en position haute qui va comprimer le gaz et qu'on l'enlève en position basse alors de la chaleur passe de la source froide à la source chaude. Le principe est le suivant :

1. On comprime le gaz contenu dans un cylindre : il se réchauffe à une température supérieure à celle de la source chaude.

2. On refroidit le gaz chaud avec la source chaude qui reçoit de la chaleur

3. On détend le gaz qui se refroidit à une température inférieure à celle de la source froide

4. On réchauffe le gaz en le plaçant sur la source froide qui fournit de la chaleur

5. On recommence

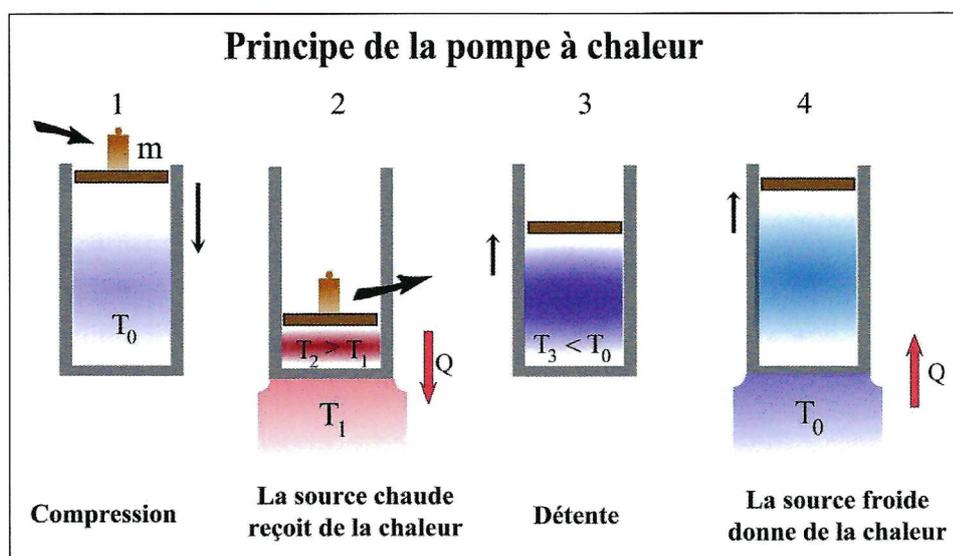


Fig. 9 - La pompe à chaleur

En pratique, pour optimiser les échanges de chaleur, on utilise le changement d'état liquide d'un gaz soigneusement choisi pour passer de l'état gazeux à l'état liquide. La source chaude est du côté de la compression où le gaz est liquéfié : c'est le condenseur. La source froide est du côté de la détente où le liquide se vaporise c'est l'évaporateur.

Selon l'endroit où l'on place les sources chaude et froide ce dispositif est soit un climatiseur (ou un réfrigérateur) soit une pompe à chaleur.

Le rendement des pompes à chaleur

Pour qu'une pompe à chaleur soit utile il faut que son rendement soit supérieur à 1, sinon il vaut bien mieux se chauffer directement avec l'énergie dépensée pour l'actionner. Le rendement théorique maximum issu du principe de Carnot est facile à calculer, c'est l'inverse du rendement de la machine réversible de Carnot :

$$r = \frac{T_1}{T_1 - T_0}$$

Le rendement est d'autant meilleur que la différence de température est plus faible et donc que la demande de chauffage est plus faible, il devient même infini lorsque T_1 est égal à T_0 , c'est-à-dire lorsque le chauffage est inutile ! Pour une température extérieure de 5°C et une température intérieure de 20°C, ce qui correspond à un système air/air il est de 19,5 ; pour une installation à eau chaude avec une eau à 40° il n'est plus que de 8,4. Dans la pratique le rendement réel d'une pompe à chaleur est bien moindre il ne dépasse jamais 5 et il est plutôt, en moyenne, de 3.

Finalement, avec une pompe à chaleur on ne fait guère mieux, au prix d'un dispositif assez complexe, que récupérer la chaleur initialement

dissipée par la centrale thermique, c'est pour cette raison qu'elle ne se place donc pas dans les dispositifs à énergies renouvelables. Là encore, si la centrale est à gaz, il est bien préférable de se chauffer directement au gaz.

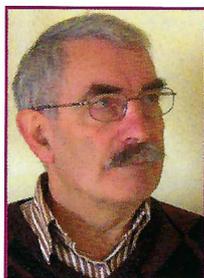
Amélioration du rendement des centrales thermiques

En raison des puissances mises en jeu, une faible amélioration du rendement permet d'obtenir une grande quantité d'énergie. Pour une centrale de 1 GW un gain de 1 % correspond à 10 MW soit la puissance de 5 éoliennes de 2 MW qui ne sont disponibles que 33 % du temps.

C'est pour cette raison que les ingénieurs ne cessent d'améliorer les centrales thermiques mais ils sont toujours limités par le théorème de Carnot.

CONCLUSION

Le problème de l'énergie est capital pour les sociétés modernes et l'électricité en est certainement la forme la plus aboutie. Sans électricité toutes nos sociétés modernes s'effondreraient, c'est pour cette raison que l'on est obligé d'accepter des compromis pas toujours satisfaisants. Il est remarquable que les limites thermodynamiques qui interviennent dans la production de l'énergie aient été mises en évidence au début du XIX^e siècle par Carnot, savant un peu méconnu du grand public. On est frappé de constater que dans les innombrables débats sur les problèmes énergétiques la passion l'emporte souvent sur la science ; un rappel du théorème de Carnot permettrait de les recentrer sur l'essentiel et de ne pas proposer des solutions chimériques. Personne n'envisage de chauffer sa maison avec de la cendre de bois. Il y a pourtant des gens qui pensent que le moteur à eau est possible et que c'est les compagnies pétrolières qui empêchent sa mise au point !



LE CADRAN SOLAIRE DU BARRAGE DE CASTILLON

GÉRARD BAILLET

Ancien Ingénieur en opto-électronique

Membre de la S.A.F. et de la commission des cadrans solaires

Prix Henry Rey de la S.A.F (Société Astronomique de France) 2006

Comme dans les bonnes pièces de théâtre commençons par les personnages au départ de cette histoire.

Denis Savoie, Chef du Département Astronomie-Astrophysique, Palais de la découverte, Chercheur associé au Syrte, (département Système de référence temps espace de l'Observatoire de Paris)

Roland Lehoucq, Astrophysicien à l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (CEA-Irfu)

Gérard Baillet, votre serviteur

Et des personnages immatériels : l'**astronomie** et l'**année astronomique internationale**.

Début 2008, et pour l'année astronomique internationale Denis Savoie propose à EDF de construire un cadran solaire sur un barrage. Les éléments du choix sont les suivants :

- Une voûte dont la face visible est orientée approximativement vers le sud avec des reliefs environnants ne masquant pas trop le soleil.

- Le site doit être aisément accessible par une route pour les touristes.

- Les visiteurs doivent voir sans difficultés la face intéressante du barrage.

EDF hydraulique est intéressé par le projet et plusieurs sites sont retenus, et au final le "Barrage de Castillon Demandolx" est choisi en raison d'une voûte bien régulière et sans déversoir. Il se situe à 4,5 km à vol d'oiseau au Nord-Nord-Est de la commune de Castellane dans les Alpes-de-Haute-Provence, lieu très touristique (gorges du Verdon). La route d'accès traverse la vallée en empruntant le couronnement de la voûte.

D'autre part le barrage doit être l'objet d'important travaux de rénovation en 2009, les travaux liés au cadran solaire devront donc s'imbriquer avec ceux de la rénovation.

Le cadran solaire serait classique, une tige de 25 m porterait ombre sur la voûte qui recevrait les lignes d'heures.

Denis Savoie me tient au courant et me demande d'analyser le problème (début septembre 2008), il faut dire, qu'il me propose, assez souvent, de participer à l'éclaircissement de problèmes complexes à l'aide du logiciel libre POV-RAY.

Je simule alors une voûte de barrage par une portion de cône, la limite ombre-lumière dessine une jolie courbe et de fil en aiguille je découvre une propriété très intéressante :

Pour une même heure solaire lorsque la déclinaison du soleil varie (par le changement de date) il existe une courbe enveloppe à cette limite de l'ombre, cette enveloppe peut alors servir de ligne d'heure.

Nota : Si vous voulez voir un mathématicien grimacer, parlez-lui d'enveloppe de famille de courbes en 3D !

Assez rapidement nous recevons des renseignements détaillés sur la forme de la voûte et en particulier les copies du document manuscrit d'origine du barrage datant de 1936.

Voici un extrait de la description du parement aval du barrage :

*Début extrait*_____

1/ En dessous de la cote 810,00 le parement aval est un cylindre vertical

2/ Entre les cotes 810,00 et 850,00 le parement aval est un conoïde dont les génératrices sont des droites s'appuyant à la fois :

a/ Sur le cercle de couronnement de rayon $R = 70,00$

b/ Sur le cercle à 764,75 de rayon $R = 21,17$

c/ Sur la verticale du centre de couronnement
les lignes de niveau sont des limaçons de pascal définis par l'équation :

$$\varrho_1(\phi) = 70 - 0,6074 \times z + 0,3674 \times z \times \cos(\phi)$$

Fruit d'une génératrice :

$$m = 0,6074 - 0,3674 \times \cos(\phi)$$

en clef le fruit est de 0,24

3/ Entre les cotes 850,00 et 880,00 le parement aval est une surface raccordant le conoïde au cercle de couronnement aval. Des plans verticaux rayonnant autour de la verticale du centre du couronnement coupent cette surface par les paraboles d'équation :

$$\varrho_2(m) = 66 - \left[\frac{z^2}{225} + \left(m - \frac{4}{15} \right) \times z \right]$$

Les courbes de niveau ont pour équation polaire :

$$\varrho_2 = 66 - 0,3407 \times z - 0,0044 \times z^2 + 0,3674 \times z \times \cos(\phi)$$

*Fin extrait*_____



Fig. 1 - Une vue partielle du barrage avant nettoyage et modification. On discerne bien l'ombre de la corniche sur le barrage.

UN PEU DE TECHNIQUE

Pour la modélisation des lignes d'heures il était nécessaire de trouver la nature des enveloppes de ces familles

de courbes. L'usage de la géométrie m'a permis de découvrir que chaque ligne d'heure est une courbe plane contenue dans un plan parallèle au plan horaire et tangent à la corniche. A partir de là, la modélisation devient plus facile, ou presque !

Pour le début décembre je réalise donc deux vidéos en images de synthèse pour montrer le fonctionnement de deux types de cadrans solaires sur le barrage :

1. l'une avec une tige
2. l'autre sans tige utilisant les enveloppes de famille de courbes

Les figures 2 et 3 suivantes sont extraites de ces vidéos.

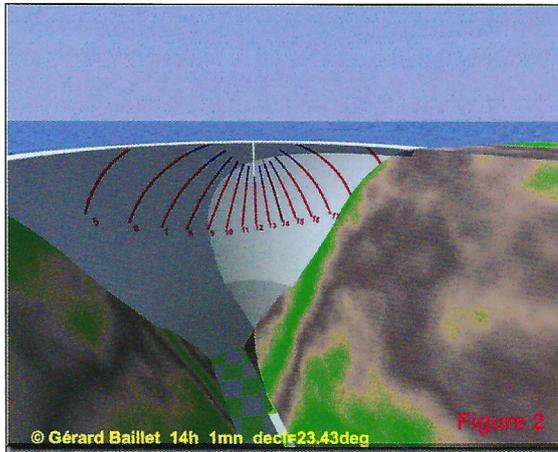


Fig. 2 - Le barrage équipé d'un style (une tige). L'ombre de la tige est sur la ligne d'heure 14.

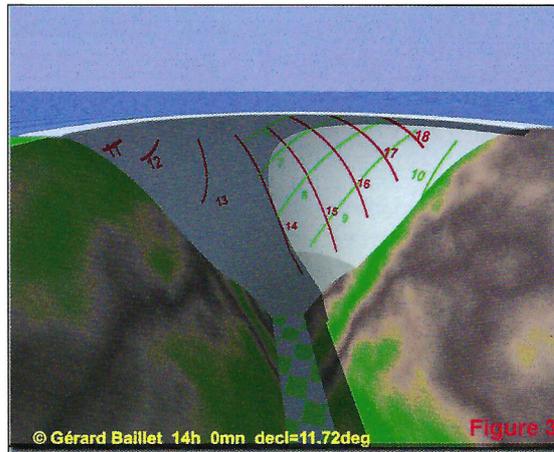


Fig. 3 - le barrage avec le dessin des lignes d'heures, enveloppe de famille de courbes. L'ombre est tangente à la ligne 14 il est 14h solaire.

Ces vidéos sont envoyées au responsable EDF. Dans le même temps les discussions portent sur la facilité de lecture du cadran de la figure 3. En effet ce type de cadran est nouveau, le principe n'est pas connu des spécialistes et encore moins du grand public. La complexité vient du principe de lecture : une limite d'ombre tangente à une courbe et d'autre part de la superposition des lignes d'heures du matin et de l'après midi (les lignes vertes et rouges sur la figure 3).

Mon avis est favorable au cadran de la figure 3 pour les raisons suivantes :

- Un cadran solaire est, aujourd'hui, totalement inutile, alors pourquoi renoncer à montrer un type nouveau de cadran.

- Pour les cadrans anciens (avec une tige) j'ai vu, deux fois, une personne chercher où était le moteur qui faisait tourner la tige, alors la « complexité » de lecture...

- Alors s'il n'y a qu'un très faible pourcentage de personnes qui maîtrise la lecture du cadran où est le problème ?

Pour finir les responsables EDF choisissent en janvier 2009 le cadran de la figure 3, les dés sont jetés, inauguration solstice d'été (juin 2009).

En février les géomètres de l'entreprise effectuent un relevé complet des 13 000 m² de la voûte avec au moins un point tous les 10 cm sur la voûte et un point tous les 5 cm sur la corniche. L'ensemble des mesures est rattaché au système Lambert 93 de coordonnées, légal en France. Les fichiers nous sont transmis avec diverses résolutions 0,1 0,5 et 1 m.

A partir de ces fichiers les équations de la surface sont ajustées par une méthode des moindres carrés et la cotation de la corniche précisée. Un problème, à cause de la différence entre le nord Lambert et le nord géographique (2,56°), est vite résolu. Le parement aval est maintenant convenablement modélisé et positionné dans un repère géographique.

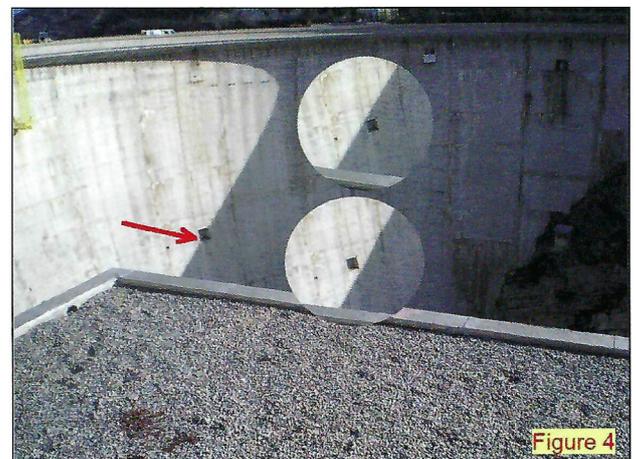
Afin de nous assurer que nos calculs sont valables il est décidé de vérifier l'heure de passage de la limite de l'ombre sur l'angle bas gauche d'une fenêtre du barrage. La procédure retenue consiste à faire photographier la fenêtre par le

personnel du barrage 5 mn avant l'heure calculée, à l'heure calculée et 5 mn après, avec ce procédé on peut estimer l'erreur.

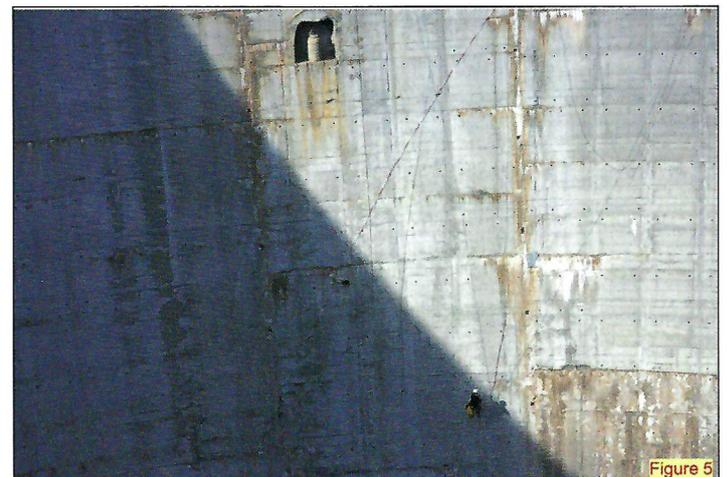
Figure 4 le résultat pour le 22 avril 2009 (flèche rouge) et une heure calculée de 9h 10mn 46s légale, en médaillon circulaire sur la figure 4 les passages 5 mn avant et après. On ne discerne pas d'erreur sur cette photographie.

Autre point intéressant, en observant la répartition de l'ombre sur la corniche on peut comprendre la difficulté de la simulation pour trouver automatiquement la partie de la corniche tangente au plan horaire. Pour toutes les lignes d'heures il n'y a qu'un seul point de tangence à prendre en compte, sauf pour midi et 11h où il y a deux points à trouver suivant la déclinaison du soleil.

On peut voir aussi que par rapport à la figure 1 la voûte a été nettoyée et débarrassée des échelles d'accès. L'échafaudage jaune en haut à gauche de l'image est utilisé pour poser une nouvelle passerelle en haut de la voûte.



A partir des coordonnées des lignes d'heures transmises, EDF met en place provisoirement les lignes d'heures en les matérialisant avec des chaînes plastiques de couleurs rouge et blanche. Voir figure 5 vue d'ensemble de la pose et figure 6 le détail du croisement des chaînes et de l'ombre tangente à l'une d'elle. Il y a plus de 300 m de lignes d'heures à poser.



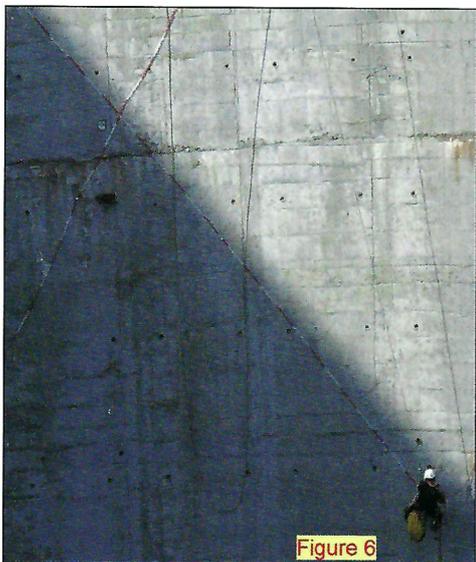


Figure 6

Les vérifications avec ce dispositif sont satisfaisantes sauf pour la ligne de midi qui nécessite des retouches liées probablement à une variation locale de la voûte.

La pose définitive des lignes d'heures est décidée, elle est constituée de plaques de lave émaillée de deux couleurs orange pour le matin et verte pour l'après-midi, fournies par « Atelier Saint-Martin 63200 Mozac ». Elles sont disposées en pointillé (figure 7). Chacune mesure 1 m de long, 20 cm de large et 2 cm d'épaisseur, elles sont collées et vissées. La pose est dirigée par deux stations topographiques, une sur chaque rive, les points sont donnés par un pointeur laser (voir figure 8).



Figure 7

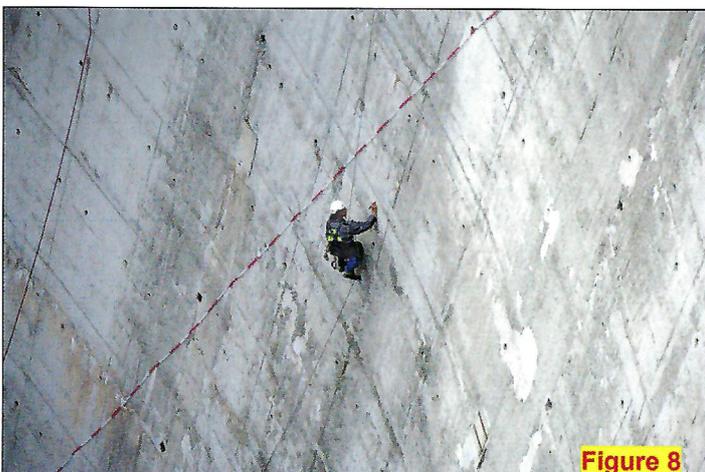


Figure 8

L'inauguration approche et pour celle-ci, je réalise une vidéo didactique en images de synthèse. Sur les figures 9 et 10 on peut voir des images extraites de celle-ci.

Sur la figure 9 la flèche rouge indique le point de tangence à la ligne d'heure 15.

de gauche à droite :

| | | |
|--------------------|-------------|-----------------|
| le 8 novembre 2009 | 15h solaire | 14h 17mn 37s TU |
| le 1 octobre 2009 | 15h solaire | 14h 23mn 25s TU |
| le 3 août 2009 | 15h solaire | 14h 40mn 01s TU |
| le 22 juin 2009 | 15hsolaire | 14h 35mn 54s TU |

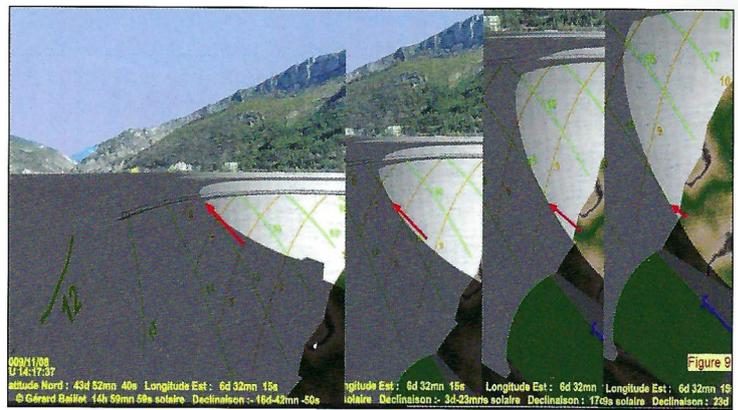


Figure 9

Sur la figure 10 la flèche rouge indique le point de tangence à la ligne d'heure 8.

de gauche à droite :

| | | |
|----------------------|------------|----------------|
| le 16 octobre 2009 | 8h solaire | 7h 19mn 25s TU |
| le 13 septembre 2009 | 8h solaire | 7h 29mn 46s TU |
| le 10 août 2009 | 8h solaire | 7h 39mn 13s TU |
| le 22 juin 2009 | 8hsolaire | 7h 35mn 50s TU |

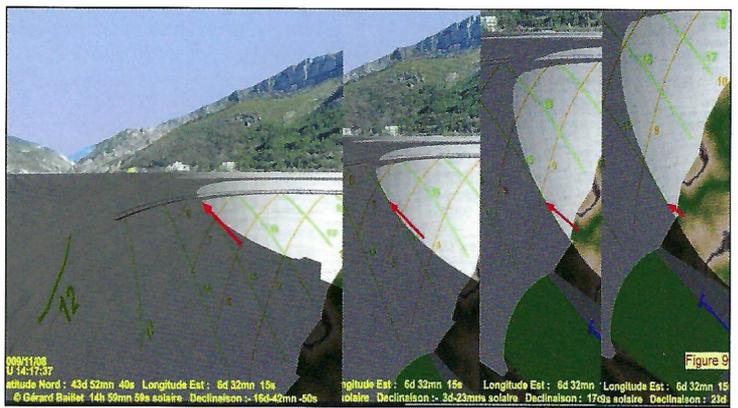


Figure 10

Ces deux figures montrent le principe de lecture du cadran. Il faut noter que la construction d'une passerelle sous la corniche ampute légèrement les lignes d'heures vers le solstice d'hiver. Cette amputation n'est pas très grave : les touristes étant moins nombreux en hiver, d'autre part les calculateurs des lignes sont un peu soulagés parce que le point de tangence des plans horaires sur la corniche saute d'un endroit à un autre à cette époque pour des faibles variations de la déclinaison du soleil.

L'inauguration s'est déroulée en présence des autorités du lieu des responsable de EDF, des inventeurs de ce cadran le 20 juin à 8h solaires locales soit 9h 35mn heure légale avec l'ombre à la position prévue.

Un abri sur la rive droite (coté sud) donne les renseignements utiles à la lecture de l'heure.

Par la suite, une exposition de 6 mois sur ce sujet a eu lieu, à compter du 15 mars 2010 au Palais de la Découverte de Paris, avec la collaboration d'EDF et la projection permanente de ma vidéo didactique.

Quelques publications sur ce sujet :

Revue « XYZ » de l'association française de topographie n°122 mars 2010

Revue « l'Astronomie » de la Société Astronomique de France (S.A.F.) février 2010

Revue « Cadran info » de la commission des cadrans solaires de la S.A.F. N°19 mai 2009



FACILE DE CALCULER UNE ÉCLIPSE DE SOLEIL ? PAS SI SÛR !

FRANCIS ASPORD
Ingénieur ECP,
Membre de l'ADASTA,
Retraité SNCF, Ingénieur Conseil

Cet article rédigé par Francis Aspor, avec une contribution de Jean Chandezon, fait suite à la conférence donnée par l'auteur le 16 mars 2011 à l'Adasta. Un enregistrement de la conférence est disponible au secrétariat de l'Adasta, au format « wmv ».

INTRODUCTION

Une éclipse de Soleil est certainement le phénomène astronomique le plus fascinant qui puisse se produire sur Terre. C'est aussi le plus difficile à calculer. C'est donc une sorte de « bâton de maréchal » pour l'astronome amateur qui souhaite s'y lancer. En fait, tout dépend du degré de précision recherché. Sans trop de difficultés, un amateur parviendra à une précision de ± 200 km. Au-delà, il faudra faire appel aux outils des professionnels pour atteindre une précision de ± 200 m. J'illustrerai cet article avec l'éclipse du 11 août 1999 qui est passée au-dessus du nord de la France et que, en raison des nuages, je n'ai pas eu la chance d'admirer dans toute sa plénitude.

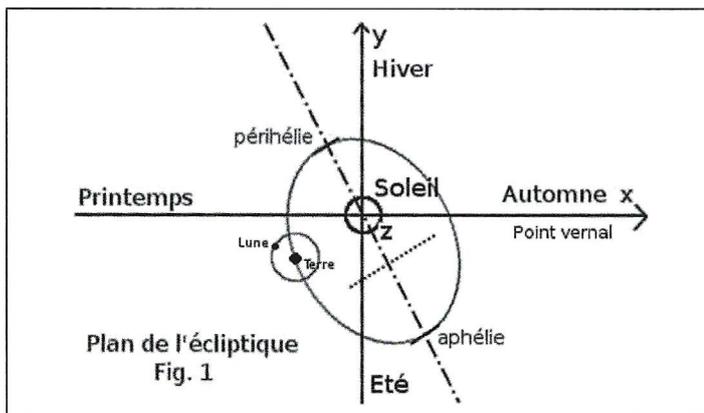
UN PEU DE GÉOMÉTRIE CÉLESTE : LE REPÈRE ÉCLIPTIQUE HÉLIO-CENTRÉ (1)

La Terre tourne autour du Soleil dans un plan, appelé écliptique. Pour qu'il y ait une éclipse de Soleil sur terre il faut que la Lune cache le Soleil pour les terriens, elle doit donc se trouver entre le Soleil et la Terre; par conséquent, il faut qu'elle soit également dans le plan de l'écliptique.

Depuis Kepler et Copernic on sait que les planètes décrivent des orbites elliptiques planes autour du Soleil.

Le système solaire peut être décrit en coordonnées cartésiennes en prenant comme origine le centre de gravité du Soleil, l'axe des x dans la direction printemps - automne (2), l'axe des y dans la direction été - hiver et l'axe des z dans la direction du pôle Nord écliptique. Les directions x et y sont dans le plan de l'écliptique, la direction z lui est perpendiculaire (Fig. 1).

Fig. 1 - Le système de coordonnées héliocentriques

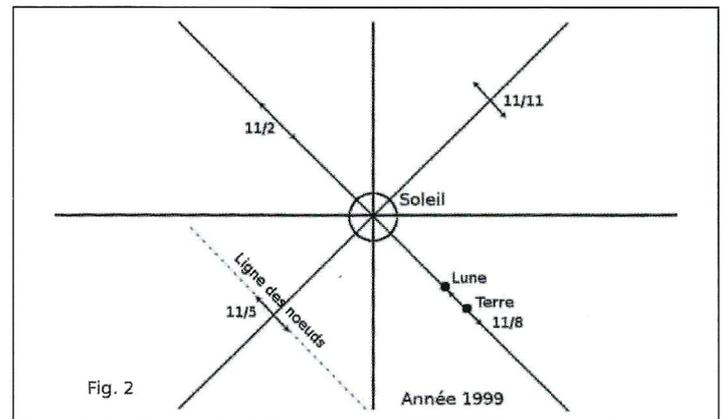


UN PREMIER CALCUL

Pour commencer le calcul, nous devons nous munir d'un programme donnant la position du Soleil, de la Terre et de la Lune, pour une date et une heure données. Je ne saurais trop vous conseiller de vous doter d'une calculatrice programmable et du logiciel fourni par Paul Schlyter, astronome suédois (3).

L'exemple numérique fourni, tout au long de la présentation, vous permettra de vérifier votre propre travail de programmation. En fin de compte on obtient :

- pour le Soleil $[0, 0, 0]$ puisqu'il reste au centre du repère
- pour la Terre $[x_t, y_t, 0]$ puisqu'elle reste dans le plan de l'écliptique
- pour la Lune $[x_l, y_l, z_l]$ z_l est non nul puisqu'elle ne tourne pas dans le plan de l'écliptique.



Dans quelles conditions une éclipse du Soleil par la Lune peut-elle se produire ? Il faut, bien évidemment, que la Lune se trouve entre le Soleil et la Terre ce qui se produit uniquement lors de la « Nouvelle Lune ». Si la Lune, comme la Terre, tournait dans le plan de l'écliptique, il y aurait une éclipse à chaque « Nouvelle Lune », c'est-à-dire tous les mois. Or ce n'est pas le cas, la Lune tourne dans un plan faisant un écart de 5° par rapport à l'écliptique. Ces deux plans se coupent donc suivant une droite, appelée « ligne des nœuds ». Lorsque la Lune passe du nord au sud de l'écliptique, elle passe par son nœud descendant. Quinze jours plus tard elle passe du sud au nord, par son nœud ascendant.

Un écart de 5° est-ce beaucoup ? Dans la vie courante non ! Mais le Soleil et la Lune sont vus, depuis la Terre, sous un même angle de $0,5^\circ$ (4), c'est-à-dire dix fois moins. Il suffit donc d'un tel décalage pour que toute possibilité d'éclipse disparaisse. Voilà pourquoi les éclipses de Soleil sont rares. Au lieu d'une par mois, il y en a seulement deux par an.

Alors pourquoi une éclipse le 11 août et pas le 11 février, le 11 mai ou le 11 novembre ? Tout dépend de l'orientation de la ligne des nœuds. En février et en août 1999 (5) la ligne des nœuds était dans la même direction que l'axe Soleil - Terre : d'où la possibilité d'avoir une éclipse. En mai et en novembre ces deux axes étaient perpendiculaires : il est donc inutile de chercher une éclipse à ces dates.

Si, en première approximation, on peut se contenter de l'hypothèse des orbites elliptiques données par les lois de Kepler, pour des calculs précis il faut apporter des corrections à ces orbites.

AVEC QUELLE PRÉCISION DOIT-ON CALCULER ?

Pour répondre à cette question il faut déterminer la largeur de la bande de totalité. En août 1999 elle était de 200 km. Pour bénéficier de l'éclipse la plus longue possible il faut donc

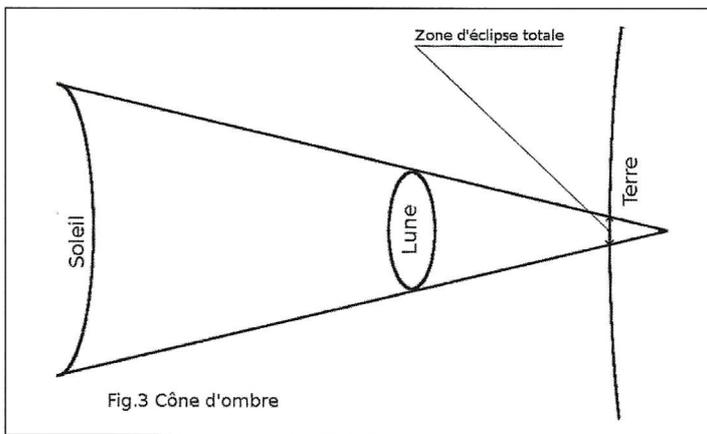


Fig.3 Cône d'ombre

se placer au centre de cette zone de ± 100 km. Nous devons donc atteindre, dans notre calcul, une précision de ± 10 km pour la trace, sur la Terre, de l'ombre de la Lune, afin que l'incertitude soit très inférieure à la largeur de la bande. Le Soleil pouvant être considéré à l'infini par rapport à la distance Terre - Lune, cela entraîne, *ipso facto*, que la position de la Lune doit être connue, également, à ± 10 km près. Le programme amateur le permet-il ? Il apporte dix termes correctifs à l'orbite elliptique de Kepler et donne une précision de quelques minutes d'angle. Cela paraît bien suffisant, cependant à 380 000 km cela représente tout de même 111 km par minute d'écart. La position de la Lune n'est donc connue qu'à quelques centaines de km près ce qui est malheureusement insuffisant pour se positionner au centre de la zone de totalité !

UTILISATION DES ÉPHÉMÉRIDES DU « BUREAU DES LONGITUDES »

Pour aller plus loin en précision on peut utiliser les éphémérides du « Bureau des Longitudes » dont la précision est de 0,1 seconde d'angle soit 180 m, grâce à l'introduction de 35 000 termes correcteurs ! En introduction de ce document, on nous dit que les tables habituelles ont été avantageusement améliorées, pour les interpolations, par l'utilisation de développement en polynômes de Tchebychev (6). Mais pourquoi s'encombrer de ces polynômes qui semblent, de prime abord, bien difficiles à comprendre ? La raison en est simple. Voici un petit exemple illustratif : vous connaissez la position de la Lune à 0 h soit 380 000,0 km. A 1 h elle est à 390 000,0 km. Où se trouve-t-elle à 0 h 30' ? Sûrement pas à 385 000,0 km comme une interpolation linéaire semble l'indiquer ! La Lune ne se déplaçant pas par bonds successifs en ligne droite, entre les points connus avec grande précision de la table, cette interpolation linéaire fait perdre toute précision. L'ancienne méthode d'interpolation nécessitait des calculs compliqués prenant en compte plusieurs points, de part et d'autre de la valeur cherchée. La nouvelle méthode, une fois les fameux polynômes domestiqués (7), est très simple à utiliser : il suffit de quelques coefficients pour atteindre la précision professionnelle de ± 200 m due aux 35 000 termes correcteurs, mis au point par des générations d'astronomes, aidés en cela par les ordinateurs, évidemment.

Si vous n'êtes pas un spécialiste des polynômes orthogonaux de Tchebychev définis sur l'intervalle $[-1,+1]$, il vous suffit de savoir qu'ils oscillent continûment entre -1 et +1 et qu'ils apportent à votre calcul, au maximum, la valeur des coefficients qui les multiplient.

UN EXEMPLE DE CALCUL ILLUSTRATIF

Distance Terre - Lune en km à un temps t. Les coefficients des polynômes sont constants pour toute la journée du 11 août 1999. Seuls les polynômes T_0, T_1, \dots varient en fonction de l'heure.

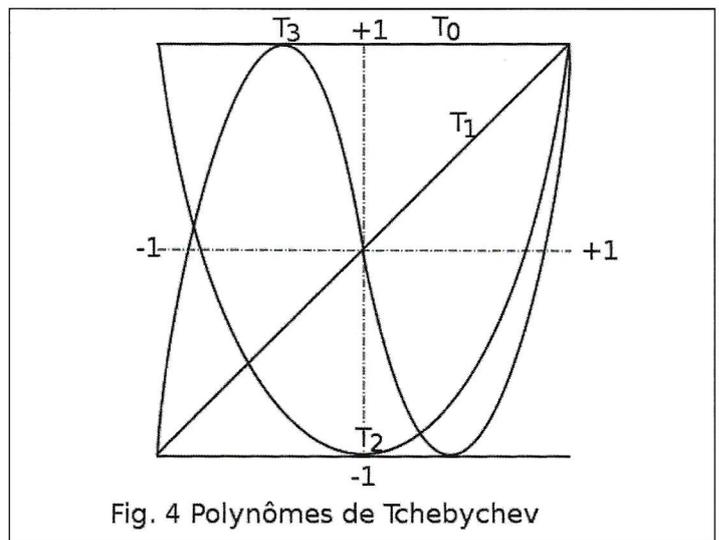


Fig. 4 Polynômes de Tchebychev

Fig. 4 - Polynômes de Tchebychev

$$D = 400\,000 T_0 + 40\,000 T_1 + 4\,000 T_2 + 400 T_3 + 40 T_4 + 4 T_5 + 0,4 T_6 + 0,04 T_7 + \dots$$

On arrête la somme à partir du coefficient que l'on veut négliger. Pour une précision de ± 10 km on peut tronquer à partir de T_5 puisqu'il n'apporte, au maximum, qu'une modification de ± 4 km. Avec un peu d'habitude c'est vraiment très pratique car, grâce à un même calcul, la même précision est obtenue sur l'ensemble de la journée. Merci Pafnouti !

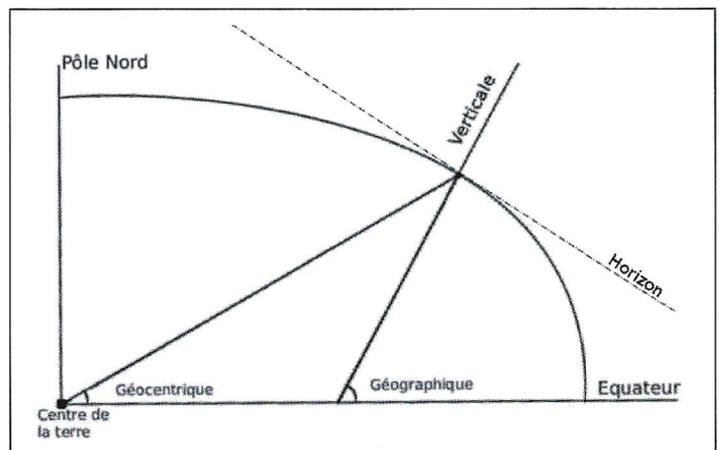


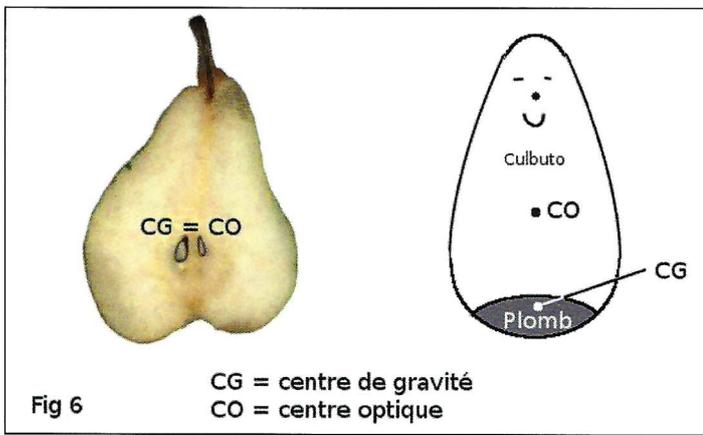
Fig. 5 - Les différentes latitudes

ET MAINTENANT UN PEU DE GÉOMÉTRIE

Connaissant avec une grande précision la position des trois corps, il suffit maintenant de prolonger la direction Soleil - Lune pour voir où elle coupe la surface terrestre. La géométrie analytique de Descartes donne facilement la réponse. Attention ! il y a, quand même, quelques pièges ! Faut-il considérer la Terre sphérique ou en forme d'ellipsoïde ? L'écart entre le rayon équatorial et le rayon polaire est de 20 km, c'est trop pour la précision cherchée. Pour notre calcul il faut donc tenir compte du fait que la Terre n'est pas une sphère. Peut-on confondre la latitude géocentrique des astronomes avec la latitude géographique des marins ? L'écart est nul à l'équateur et aux pôles et maximum à la latitude 45° . Il vaut alors $10'$ soit 20 km. Pas de chance c'est à cette latitude que se trouve la France et l'éclipse ! C'est encore trop, pas question de les confondre. En évitant ces pièges, on finit par trouver une précision de ± 2 km en se comparant aux calculs officiels sur internet.

PEUT-ON FAIRE MIEUX ?

Oui. Les professionnels ajoutent ici une pincée de poudre de « perlimpinpin » ! Quand on calcule la position du centre de la Lune, il faut bien comprendre que c'est celle de



son centre de gravité qui intervient dans la loi de Newton. Pour déterminer une ombre, c'est le centre géométrique qui compte or il se trouve que la Lune contient, en sous-sol, des masses hétérogènes et que, ces deux centres ne coïncident pas tout à fait. En ajoutant, par expérience, quelques secondes d'angle de-ci de-là, on atteint finalement la précision professionnelle de ± 200 m. Nous en resterons là. Que de chemin parcouru par les astronomes depuis quelques millénaires ! Pour admirer l'éclipse il vous suffit alors de vous positionner sur le terrain, grâce à votre GPS à ± 5 m près avant de vous apercevoir que la météo ne vous est pas favorable ! Il y a une épaisse couche nuageuse, vous constaterez bien que la nuit tombe au beau milieu de la journée, mais rien de plus pour cette fois !

QUELQUES ÉCLIPSES CÉLÈBRES

Commençons par le futur. Comme la Lune s'éloigne de la Terre de quelques centimètres par an, elle finira par être trop petite pour masquer entièrement le Soleil. Ce sera la fin des éclipses totales... dans 600 millions d'années !

Pour obtenir une longue éclipse totale il faut, à la fois :

- un petit Soleil, ce qui se présente à l'aphélie (8) le 3 juillet de chaque année (9),
- une grosse Lune, ce qui se présente au périhélie (10), non synchrone avec les saisons.

Ceci se passera le 16 juillet 2186 au-dessus de la Guyane française, pour une durée exceptionnelle de 7 m 29 s. Celle du 11 août 1999 n'a duré que 2 m 23 s.

Examinons maintenant le passé.

Le 30 juin 1973, le Concorde volait à Mach2. Ce n'est pas mal, mais quand même insuffisant pour suivre l'ombre de la Lune. Cela a quand même permis de faire durer l'éclipse pendant 74 minutes !

Le 29 mai 1919, on profita de l'éclipse pour vérifier que la lumière d'étoiles était bien déviée par la masse du Soleil. C'était la première confirmation expérimentale de la théorie d'Einstein.

Le 1^{er} septembre 1645, des jésuites prédisent à l'empereur de Chine l'arrivée d'une éclipse. Impressionné par tant de science, il se propose de convertir tout son empire au catholicisme, à condition de pouvoir garder certaines coutumes locales. Le pape a... refusé !

Le 24 novembre 29, une éclipse pourrait peut-être nous permettre de dater avec précision l'âge du Christ, car on en parle dans les Saintes Écritures.

Enfin, le 21 octobre - 3784 le plus vieux manuscrit indien connu, nous relate le phénomène.

Si, à un endroit donné, il y a assez fréquemment des éclipses partielles, les éclipses totales sont très rares et pourtant, seul le spectacle de ces dernières est réellement inoubliable car il permet d'observer la couronne solaire dans toute sa splendeur. Au XX^e siècle il n'y a eu que trois éclipses totales observables en France :

- l'éclipse du 17 avril 1912 visible de l'ouest au nord-est, vers midi, sur une ligne joignant les Sables-d'Olonne à Liège.

- L'éclipse totale du 15 février 1961. Aux alentours de 8 h 30, pendant deux minutes, sur une bande large de 200 km alignant Bordeaux-Périgueux-Montélimar-Monaco-Florence. Les automobilistes, surpris par la nuit, ont dû s'arrêter et allumer leurs phares. Cette éclipse n'était pas complètement totale à Clermont-Ferrand mais elle l'était à Romagnat ! De nombreux clermontois un peu âgés s'en souviennent encore. Durant la phase obscure les lumières de la ville s'étaient allumées.

- L'éclipse du 11 août 1999, qui n'était totale que dans le nord de la France et donc partielle à Clermont-Ferrand.



Fig. 7 - L'éclipse de 1999 (photo Wikipédia et photo JeanChandezon)

LE PROBLÈME POSÉ PAR LES ÉCLIPSES HISTORIQUES

Lorsqu'on examine les textes anciens et que l'on calcule, avec les moyens du XIX^e siècle, la date et la position de l'éclipse, on s'aperçoit que la latitude coïncide parfaitement mais qu'il y a un glissement en longitude, d'autant plus important que l'éclipse est ancienne. Curieux ! Et si la rotation de la Terre avait été plus rapide dans le passé ? Cette hypothèse est confortée par diverses études indépendantes : la croissance des arbres et des coraux, le chronométrage de la rotation terrestre avec une grande précision, l'étude de la distance Terre - Lune depuis la pose d'un miroir, à sa surface, en 1969. La conclusion est sans appel : la durée du jour terrestre n'est pas constante, ce qui ne manquera pas de poser quelques problèmes de calendrier dans les prochains millénaires !

(1) Du grec *hélíos* : Soleil.

(2) On utilise couramment le terme « point vernal » pour désigner la direction du Soleil, vu depuis la Terre, le jour du printemps.

(3) Chercher à ce nom, sur internet, « how to compute planetary positions ».

(4) C'est d'ailleurs pour cette raison qu'une éclipse totale est possible... mais tout juste possible !

(5) La ligne des nœuds tourne sur elle-même en 18 ans, la situation n'est donc pas synchrone avec les mêmes mois d'une année sur l'autre.

(6) Pafnouti Tchebychev, mathématicien russe (1821 - 1894).

(7) Si t varie de 0h à 24h, $x = t/12 - 1$ varie de -1 à +1. On cherche alors l'angle a tel que $\cos(a) = x$. Le polynôme de degré n vaut alors $T_n = \cos(na)$.

(8) Du grec *apo hélíos* : loin du Soleil.

(9) Pas tout à fait car l'aphélie tourne en 25000 ans.

(10) Du grec *péri géé* : près de la Terre.

8 NOVEMBRE 2011

CENTIÈME ANNIVERSAIRE DU PRIX NOBEL DE CHIMIE ATTRIBUÉ À MARIE SKLODOWSKA-CURIE



SUZANNE GÉLY

Ancienne élève de l'ENS Ulm-Sèvres, Agrégée de Sciences Physiques, Présidente d'honneur de l'Adasta

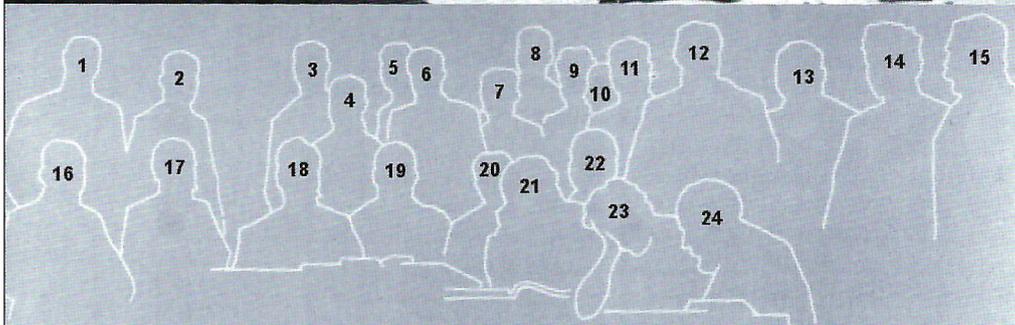
Les scientifiques du monde entier ont tenu à célébrer cet anniversaire en décidant que 2011 serait « l'Année internationale de la Chimie ».

Tout a déjà été dit et écrit au sujet de Marie Curie qui est la seule femme distinguée deux fois à Stockholm par l'attribution d'un prix Nobel : de plus elle fut la première femme à l'avoir reçu, une première fois en 1903, le prix étant partagé avec son mari et collaborateur Pierre Curie ainsi qu'avec Henri Becquerel, le découvreur des rayons uraniques.

Hélas, le jeudi 19 avril 1906, au début d'une après-midi pluvieuse, Pierre Curie meurt accidentellement renversé à Paris, rue Dauphine par une voiture à cheval... Marie, succédant alors à son mari au poste de Professeur de Physique, est nommée chargée de cours à la Sorbonne où elle est la première femme à enseigner ; elle était déjà depuis 1900 Professeur à l'École Normale Supérieure de Jeunes Filles de Sèvres. Sa conférence inaugurale à la Sorbonne, le 5 novembre 1906 est suivie par le Tout Paris... Après la mort de son époux, elle continue seule ses travaux de recherche, faisant sans cesse des dissolutions et cristallisations fractionnées de pechblende pour arriver enfin ! mais seulement en 1910 à isoler un solide d'un blanc éclatant, ayant les propriétés d'un métal : **le radium** dont elle détermine aussitôt le point de fusion 700°C.

Le 29 janvier 1911, Marie fait acte de candidature à l'Académie des Sciences, mais elle n'est pas élue ; c'est BRANLY, le père de la TSF qui obtient le fauteuil pour une voix seulement de majorité. Marie est humiliée et refusera de se représenter à l'Académie... Depuis cette date et à maintes reprises, les Présidents successifs de l'Académie ont fait publiquement leur *mea culpa*

N'oublions pas cette photo historique du Premier Congrès Solvay du début novembre 1911, tenu à Bruxelles où Marie a été invitée, seule femme, à côté des grands noms de la Physique à cette époque foisonnante de découvertes.



1er Congrès Solvay – Novembre 1911

| | | | | | |
|----------------|---------------|----------------|-----------------------|---------------|-----------------|
| 1- Goldschmidt | 5- Lindeman | 9- Hostelet | 13- Kammerlingh Onnes | 17- Brillouin | 21- Perrin |
| 2- Planck | 6- De Broglie | 10- Herzen | 14- Einstein | 18- Solvay | 22- Wien |
| 3- Rubens | 7- Knudsen | 11- Jeans | 15- Langevin | 19- Lorentz | 23- Marie Curie |
| 4- Sommerfeld | 8- Hasenohrl | 12- Rutherford | 16- Nernst | 20- Warburg | 24- Poincaré |

Les invités d'Ernest Solvay, industriel belge richissime, sont à côté de Marie : De Broglie, Einstein, Goldschmidt, Kammerling-Onnes, Knudsen, Langevin, Lorentz, Brillouin, Nernst, Perrin, Planck, Poincaré, Rutherford, Sommerfeld... Pour les Physiciens d'aujourd'hui, ces noms restent encore familiers, car attachés à des lois ou des phénomènes toujours étudiés et approfondis...

Quelques jours plus tard, le 8 novembre 1911, le prix Nobel de Chimie est attribué à Marie pour la découverte du Polonium et du Radium...

Ces événements ont déjà été célébrés en 1996-1998 lors du Centenaire de la Découverte de la

Radioactivité et notre ami Roland Jouanisson avait rédigé, en mars 1996, un supplément au bulletin de l'ADASTA où il faisait l'historique et la chronologie des découvertes et de leurs applications dans tous les domaines matériels et médicaux... Aussi renvoyons le lecteur à ce document très précis, en rappelant la mémoire, le dévouement et le rayonnement scientifique de Roland Jouanisson.

Il faut souligner l'extraordinaire dévouement de Marie Curie : elle arrive à créer l'Institut du Radium ; il est prêt pour l'inauguration en août 1914 lorsque la guerre éclate ! Alors, elle se met au service de la France créant un service radiologique aux Armées...

Elle est décorée sur le front par le Roi des Belges Albert I^{er}... Elle a sauvé bien des vies et évité bien des amputations que les médecins militaires pratiquaient sans hésiter... En 1918, c'est la victoire, mais la France est dévastée, appauvrie. Plus d'argent pour la Recherche !

Alors Marie, sollicitée par des femmes américaines qui l'admirent profondément accepte d'aller aux Etats-Unis faire une tournée de conférences pour collecter de l'argent... Elle sait qu'en Amérique il existe environ 50 grammes de radium alors que la France n'en possède qu'un seul gramme !

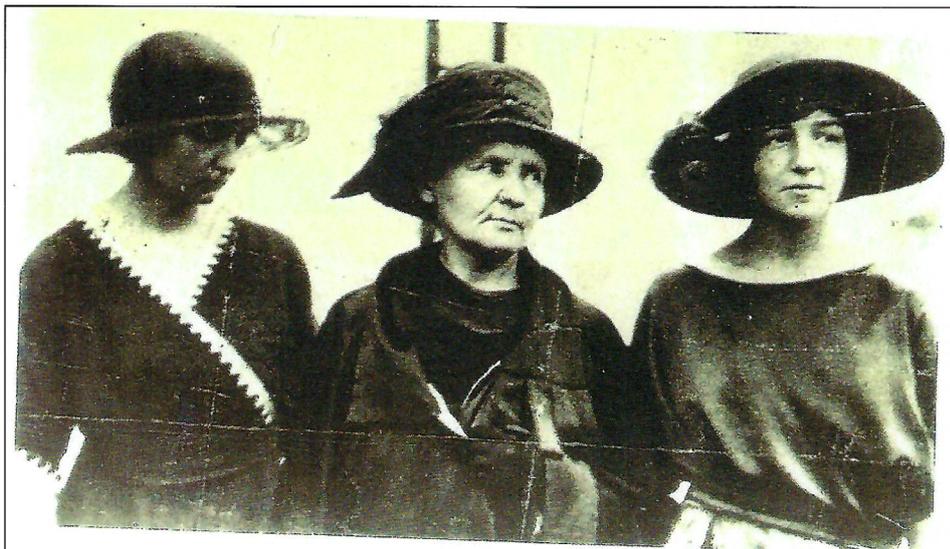
Une journaliste américaine Missy arrive à convaincre les femmes américaines fortunées, ayant vécu loin de la guerre, d'aider Marie à acquérir le radium qui lui manque... Cette campagne de presse organisée pour le voyage en Amérique de Marie suscite en France des initiatives analogues : 27 avril 1921, soirée à l'Opéra de Paris organisée par Sacha Guitry avec le concours de Sarah Bernhardt au profit de l'Institut du Radium...

Début mai 1921, départ triomphal pour l'Amérique sur le paquebot Olympic en compagnie de ses deux filles : Irène et Eve... Et c'est la deuxième photo illustrant ce texte : Ces trois femmes avec leurs chapeaux...

Le voyage aux USA dura 8 semaines et fut couronné d'honneurs et de succès financiers : Marie a reçu

non seulement de l'argent, mais aussi en cadeaux des minerais précieux, du matériel, des équipements scientifiques qui lui permettent de relancer ses recherches qu'elle poursuivra, avec courage, jusqu'à la fin de sa vie en 1934...

ces cendres au Panthéon à Paris le jeudi 20 avril 1995, en présence du Président de la République Française, François Mitterrand, du Président de la République de Pologne, Lech Walesa, de leur fille Eve Curie-Labrousse, de leurs petits-enfants, Hélène Langevin et



Eve Marie Irène
en partance pour les U.S.A. - Mai 1921

Marie Curie a, par ses travaux, magnifiquement œuvré pour la Science, mais aussi, par son exemple, pour la cause des femmes.

Pour terminer, rappelons qu'un hommage solennel a été rendu à Pierre et Marie Curie lors du transfert de leurs

Pierre Joliot, ainsi que d'un très grand nombre de personnalités du monde scientifique, politique, culturel et d'une foule nombreuse. Ils ont, par leurs travaux, ouvert à la science mondiale de nouveaux horizons et donné à la Médecine de nouveaux outils pour lutter contre la maladie.

ADASTA

Adhésions et Abonnements

Adhésions à titre individuel 30 €

Adhésions à titre collectif 80 €

L'adhésion donne droit à la revue Auvergne-Sciences, à des réductions sur les locations et les achats, à des invitations aux conférences et aux visites d'entreprises (une participation aux frais peut être demandée lors de certaines visites).

Permanences - elles sont assurées par les bénévoles :

lundi de 14h à 18h, mercredi de 9h à 12h

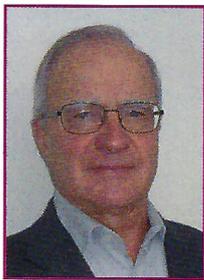
En cas d'absence laisser message sur répondeur ou E-mail.

Adresser le courrier : **ADASTA, Centre Riche-Lieu - 13, rue Richelieu - 63400 Chamalières**

Siège social - 10, rue de Bien-Assis - 63000 Clermont-Ferrand

Tél. 04 73 92 12 24 - E-mail : adasta@wanadoo.fr - Site internet : www.adasta.fr

Dépôt légal novembre 2011 - N° ISSN - 1166-5904



JEAN-LÉON IRIGARAY

*Extraits du livre **Savoirs et Société** de Jean-Léon IRIGARAY, professeur émérite des universités en retraite, ancien conseiller du recteur d'académie chargé de la formation continue des personnels*

Après avoir mené une carrière longue et active dans plusieurs domaines scientifiques, complétée par des formations suivies en histoire de l'art, il m'a semblé utile de partager, avec un large public, les très nombreux questionnements que pose notre vie sur cette Terre.

Certes, ce livre n'est pas exhaustif mais ma préoccupation constante a été qu'il ne suffit pas de produire des savoirs mais qu'il faut les rendre accessibles au moins à celles et à ceux que cela intéresse.

On sait, en tant que physiciens, qu'un déphasage ne produit rien de bon, en général !

Alors, à titre d'aperçu, je reproduis ici quatre chroniques de mon livre sur les deux cents qu'il contient.

1. Des matériaux qui se transforment en os
2. La caméra à positrons
3. Sur la pensée de Teilhard de Chardin
4. Plaisir d'apprendre.

1 - DES MATERIAUX QUI SE TRANSFORMENT EN OS

Dans la population occidentale vieillissante, on soulève régulièrement les problèmes de carences osseuses. En même temps, des personnes, sans doute très avisées, déconseillent de boire du lait alors que ce produit est riche en calcium et naturel de surcroît.

On sait pourtant que la consolidation osseuse se fait essentiellement jusque vers l'âge de 20 ans : dans ma jeunesse, on distribuait du lait dans les écoles.

Par ailleurs, la densité osseuse et les propriétés mécaniques diminuent inexorablement avec l'âge (ex : l'ostéoporose). La matière osseuse du vivant est en constante destruction par les ostéoclastes et reconstruction par les ostéoblastes. Chez la jeune femme, un dérèglement du système hormonal au moment de la ménopause modifie cet équilibre en défaveur des ostéoblastes, ce qui peut entraîner des fragilités osseuses.

Il se trouve que dans ma carrière de chercheur, j'ai consacré plusieurs années à étudier les possibilités de réparation et de reconstitution osseuse. Des biomatériaux comme le corail, l'hydroxyapatite et les bio-verres ont démontré de réelles bonnes perspectives : ils acquièrent la composition chimique et la structure cristalline de l'os de manière étonnante, des brevets ont même été déposés.

Mais avant tout, ne vaudrait-il pas mieux faire de la prévention : alimentation riche en calcium et bien assimilable et des activités physiques régulières pour maintenir un bon rapport phosphocalcique ?

2 - LA CAMERA A POSITRONS

Notre monde est constitué de matière. Mais la physique nucléaire, et notamment, l'étude des particules élémentaires, nous apprennent que toute particule constituant de base de la matière a son alter égo, appelé la particule d'antimatière.

Au fond, ce serait son image avec une masse identique mais avec une caractéristique opposée comme la charge électrique. Par exemple, un électron de charge électrique négative, qui est sans doute la particule la plus connue des lecteurs, a une antiparticule de même masse mais de charge électrique positive : c'est le positron et c'est l'antimatière.

Je n'irai pas plus loin mais quelle application de ceci ?

Eh bien, dans les diagnostics de certaines maladies comme le cancer, ce phénomène trouve une utilisation : c'est la caméra à positrons.

En effet, certains radioéléments émettent ces positrons qui, en rencontrant des électrons, disparaissent pour donner des rayonnements gamma. La détection de ceux-ci avec une caméra permet de mieux localiser une tumeur et de la décrire avec précision.

Parfois, il y a loin de la théorie à une pratique mais on voit ainsi que l'antimatière a une réalité comme la

matière à laquelle nous sommes plus habitués.

3 - SUR LA PENSEE DE TEILHARD DE CHARDIN

Le savant a développé sa pensée sur la vie, suite à des recherches scientifiques de terrain :

«Notre univers serait inutile si nous le réduisons au très grand ou au très petit, c'est-à-dire aux deux seuls abîmes de Blaise Pascal... Un troisième abîme existe : celui de la complexité... C'est sur ces trois infinis qu'est bâti spatialement le monde : l'Infime et l'Immense sans doute mais aussi l'Immensément Compliqué...»

«Quel est l'effet spécifique du très grand complexe ? C'est ce que nous appelons la vie... la biologie ne serait pas autre chose que la physique du grand complexe.»

L'ordinateur le plus évolué ou les automates artificiels sont des systèmes «hautement compliqués» mais le cerveau d'un organisme humain est un système «extrêmement hautement compliqué».

Pour Teilhard de Chardin, l'évolution est une histoire de la complexité croissante, elle s'oppose à l'entropie, mesure de désordre qui déstructure. L'extrême complexité de l'homme manifeste donc la victoire de la vie sur l'inerte.

L'homme est au sommet de la complexité par son cerveau de 100 milliards de neurones et plus de 200 000 milliards de connexions entre eux (appelées synapses). Sa créativité est le fruit de son intelligence réfléchie. Etre de conscience et de responsabilité, l'homme ne peut être séparé de la société des hommes.

Une société humaine est plus complexe qu'un homme, qui est plus complexe qu'une cellule vivante, qui est plus complexe que les molécules qui la constituent.

Pour Teilhard de Chardin, dans *Le phénomène humain*, la vie n'est pas une

combinaison fortuite d'éléments matériels, mais la forme que prend la matière à un certain niveau de complexité. Il faut que cette complexité dépasse une valeur critique pour qu'elle soit visible.

Par exemple, si on chauffe un peu un morceau de fer, nos yeux n'observent rien et pourtant, il émet un peu de rayonnements. Par contre, à partir d'un certain seuil de température, le fer émet des rayons visibles par nos yeux. Il y aurait alors passage d'une nature inactive à une autre qui serait vivante et observable.

Ainsi, par sa vision du rôle de la complexité et de l'émergence qui s'en suit, le père Teilhard de Chardin a apporté un éclairage imaginaire sur l'évolution des êtres vivants.

4 - PLAISIR D'APPRENDRE

En quoi, l'homme moderne, considéré comme libre et autonome, a-t-il gagné sur l'homme ancien ?

Pour ne pas devenir son propre esclave, il est indispensable qu'il intègre l'acquisition de nombreuses connaissances comme étant des éléments de loisirs qui lui apportent du plaisir.

Il ne s'agit pas d'abandonner la vie quotidienne mais de l'éclairer par le sens et la beauté. Ainsi, il y aura ceux qui auront duré et ceux qui auront vécu.

La science décrit ce qui est, et non, ce qui doit être. Par contre, l'art vise à incarner certaines représentations de l'absolu dans le marbre, le bois, le bronze, la toile du peintre ou la musique. La surinformation des temps modernes ne remplacera pas le plaisir d'apprendre.

De cette alliance entre la science et la culture, naîtra le véritable progrès durable de l'homme.

Albert Einstein le professait déjà, il y a un siècle : «L'un des motifs les plus puissants qui ont conduit l'homme vers l'art et la science était celui d'échapper au quotidien».

*Ce livre **Savoirs et Société** est édité chez «Publibook», un éditeur parisien. On peut le trouver sur les sites internet (Publibook, Amazon, Chapitre, etc.) en tapant : irigaray jean-leon. Il est aussi en vente dans les librairies en France (et à Clermont : Gibert, les Volcans ...).*

Conférences et sorties Adasta 2011 - 2012

16 novembre 2011

La canopée, un monde nouveau offert à la Science

Conférencier : Bruno Corbara - Labo Microorganismes - CNRS Univ. B. Pascal-Clermont-Fd.

7 décembre 2011

Déficit auditif chez l'enfant

Conférencier : Paul Avan - Professeur Lab Biophysique Sensorielle - Université d'Auvergne - Clermont-Fd.

1^{re} quinz. déc. 2011

Suite visite Service médecine nucléaire Centre Jean Perrin (inscriptions en fonction des places restantes).

18 janvier 2012

Les cadrans solaires

Conférencier : Gérard Baillet - Ingénieur en opto-électronique, Membre de la SAF (Société Astronomique de France) et de la commission des cadrans solaires.

8 février 2012

Du ferroviaire à l'automobile, la traction électrique est-elle notre avenir ?

Conférencier : Francis Asporid - Ingénieur-Conseil SNCF et ancien membre de l'Association des Astronomes Amateurs d'Auvergne (4A).

21 mars 2012

Les nanotechnologies : Histoire d'Or à propos de l'usage des "nanos" dans l'artisanat ancien

Conférencier : Frédéric Chandezon - Ingénieur au CEA Grenoble.

25 avril 2012

Phyllotaxies : Comment les plantes disposent-elles les feuilles sur leurs tiges ?

Conférencier : Michel Gendraud - Professeur Honoraire de Physiologie Végétale à l'Université Blaise Pascal de Clermont Fd.

Des livres écrits par nos adhérents

Savoirs et Société

par Jean-Léon Irigaray – Ed. Publibook (cf article ci-contre).

Optique, une approche expérimentale et pratique

par Sylvain Houard - Ed. de boeck, juin 2011.

Né d'une expérience pédagogique en grande section de maternelle, ce livre propose une approche innovante de l'optique, à la fois expérimentale, technique, historique et pratique. Près de 500 photographies numériques en couleurs d'expériences permettent d'illustrer les phénomènes optiques de manière visuelle et concrète, en relation avec le texte. Des explications techniques détaillées sont fournies, mais privilégient l'approche physique à un formalisme excessif. Un chapitre entier est consacré à la couleur et à sa perception, sujet rarement abordé dans les ouvrages classiques. Une large place est faite aux phénomènes naturels - mirages, halos, arc-en-ciel, etc. - et aux applications scientifiques ou technologiques - télécommunications par fibre optique, verres correcteurs de la vision, microscope, lunette astronomique, télescope, interféromètres, lasers. Cet ouvrage de référence vise un large public au niveau du premier cycle universitaire et constitue une invitation au voyage, agréable mais détaillée.

Un exemplaire de ce livre est disponible à l'Adasta et peut être consulté.



EN ROUTE VERS LA VOITURE ÉCOLOGIQUE

L'AUTOMOBILE FACE AU DÉFI ÉNERGIE - CLIMAT

JOSEPH BERETTA
PSA Peugeot Citroën
Affaires Publiques & Environnement
Délégué énergies, technologies et émissions automobiles

Suite à la conférence de Joseph Beretta à l'IFMA, organisée par l'ADASTA et l'IESF-Auvergne le 9 juin 2011, nous vous proposons une présentation du contenu de son intervention.

Les temps changent pour l'automobile, ils ont même déjà changé : hausse du coût de l'énergie, envolée du prix des matières premières, pénurie de pétrole annoncée, contraintes réglementaires et consuméristes de plus en plus fortes. Dans ce contexte agité, l'industrie automobile se doit d'évoluer.

Aujourd'hui dans le monde, les transports terrestres ne représentent que 9% des gaz à effet de serre. En France, ceux-ci atteignent 30% des émissions de CO₂ et l'automobile seule 18%.

Pourtant la France est bien placée en Europe avec en 2007 une moyenne de 149 g/km de CO₂. PSA Peugeot Citroën, grâce à son offre produit et à sa politique active en matière de réduction des émissions de CO₂ affiche ainsi le meilleur résultat en Europe avec 141 g CO₂/km en moyenne¹.

Mais quand le prix du pétrole s'envole - il a été multiplié par 4 en 4 ans - on se rappelle alors la très forte dépendance au pétrole des transports et plus encore de l'automobile. Dans le monde la moitié du pétrole est utilisé dans les transports. L'automobile pour sa part, y a recours à 98%.

L'énergie et le climat sont des questions au centre des préoccupations de tous les acteurs du secteur, consommateurs, industriels et pouvoirs publics.

L'idée d'une voiture «écologique» qui consomme peu d'une énergie renouvelable, qui ne pollue pas et ne coûte pas plus que nos véhicules actuels fait chemin ; mais sommes-nous prêts à une telle rupture technologique qui risque de bouleverser notre mode de vie ?

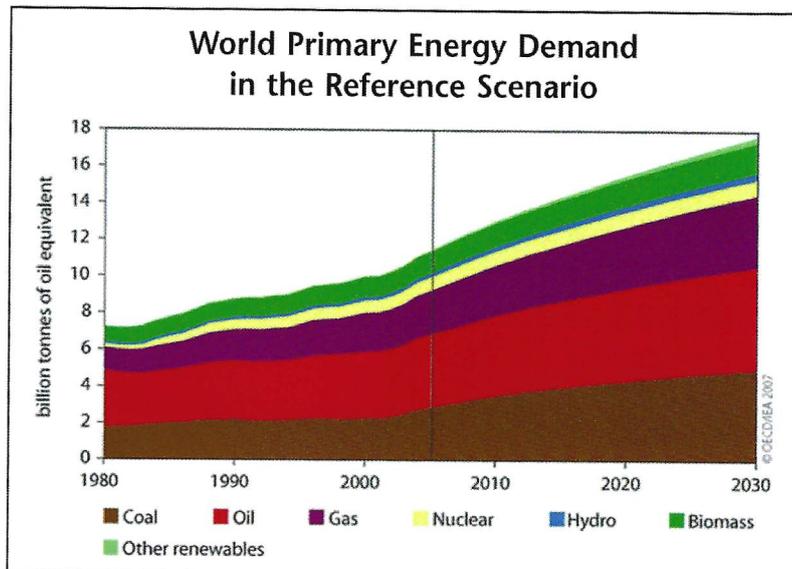
Comme le progrès technologique ne peut pas être considéré en soi comme une rupture car son impact est progressif, suivant le rythme de la diffusion des technologies, quelle est donc la route à suivre pour déployer massivement cette voiture écologique ?

CONTEXTE GÉOPOLITIQUE MONDE ET OCDE

L'énergie et la mobilité sont des éléments essentiels des économies modernes. Le lien entre croissance économique et demande en énergie est établi de manière robuste par différentes études². Une demande croissante d'énergie est à prévoir entre 2009 et 2030.

Dans son rapport, «Perspectives énergétiques mondiales 2007», l'Agence internationale de l'énergie prévoit que la demande mondiale d'énergie augmentera de 30% d'ici à 2030. Les combustibles fossiles resteront largement prédominants. Ils représenteront 85% de l'augmentation de la demande. Deux tiers de cet accroissement viendra des pays émergents comme la Chine et l'Inde. Cette évolution aura un impact très important sur les prix du pétrole.

La consommation de gaz naturel devrait doubler d'ici à 2030, il en sera de même pour le charbon qui affichera la plus forte hausse en valeur absolue.



Scénario IEA 2007

Ces tendances sont de mauvais augure pour les émissions cumulées de dioxyde de carbone (CO₂) et le changement climatique. Les États-Unis et les pays de l'Union européenne représenteront encore la plus grande part de la consommation, mais la Chine enregistrera à elle seule une grande partie de la hausse future.

La demande d'énergie sera croissante dans les prochaines années alors même que les disponibilités en produits pétroliers raffinés resteront tendues encore pour quelques années, le temps que l'industrie pétrolière adapte ses moyens de production à l'évolution de la demande mondiale. Ensuite nous ne serons plus très loin du fameux «peak oil» le point où la production de brut commencera à diminuer. Le prix de l'essence et du diesel restera élevé car le brut devrait rester durablement au-dessus de 100 \$ le baril.

Nos sociétés, et tout particulièrement les transports routiers, devront faire face aux très importants défis de l'énergie et du climat.

Climat : l'effet de serre et réchauffement climatique

Si, jusqu'à présent, réduire rapidement l'intensité énergétique était une priorité absolue, aujourd'hui, le défi est de diminuer non pas forcément la densité énergétique de la croissance mais sa densité en énergie fossile pour diminuer les émissions de CO₂. Toutes les solutions qui permettent d'utiliser moins d'énergie fossile doivent être explorées.

Énergie : le prix et la disponibilité

L'envolée récente du prix de l'or noir qui a atteint 140 \$ le baril en juin 2008, oblige en effet à prendre réellement conscience d'une situation que nous avons souvent tendance - inconsciemment - à occulter jusque-là. Même si nous savions bien que le déclin du pétrole devait se produire au

cours de ce siècle, l'AIE (l'Agence internationale de l'énergie) prévoyait une poursuite de la hausse de la production jusqu'en 2030, prévision controversée par Total qui annonce un plafonnement de la production pétrolière à partir de 2025 à 100 millions de barils par jour, avant de se mettre à décroître. Cela signifie que les prix du pétrole resteront élevés.

Il nous faut maintenant trouver d'autres sources d'énergie pour commencer à remplacer à court terme les usages spécifiques du pétrole, notamment pour les transports.

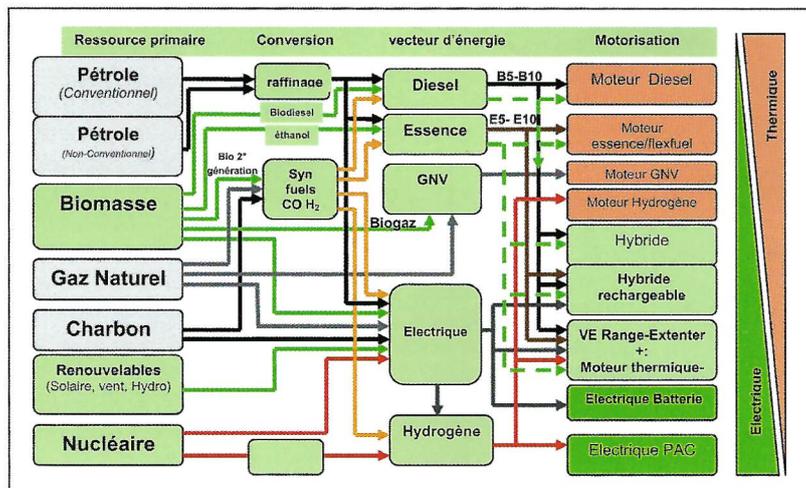
Il est donc nécessaire d'élargir le panel des énergies utilisées par l'automobile.

CONCEPT DU « WELL TO WHEEL »

Si le panel des énergies primaires utilisables pour les transports est important, pour les technologies de motorisation, deux technologies seulement sont en compétition : le moteur thermique et le moteur électrique.

Ces technologies se déclinent des moteurs essences et diesels à la pile à combustible en passant par le moteur électrique et toutes les possibilités d'hybridation.

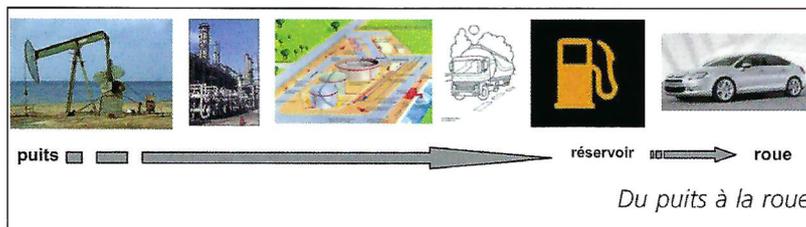
Le schéma suivant présente toutes les routes possibles pour passer d'une énergie primaire donnée à la technologie de chaîne de traction véhicule adapté. Toutes ces routes ne sont pas équivalentes vis-à-vis de leurs impacts énergie/climat.



Panorama des énergies

Les différents processus pour extraire, transformer et acheminer l'énergie jusqu'au véhicule présentent des rendements et des rejets de gaz à effet de serre qu'il y a lieu de prendre en compte. Dans le passé le calcul était simple pour les transports car le pétrole était omniprésent, et raisonner au niveau du véhicule pour les rejets de CO₂ était suffisant. Mais lorsque l'on parle d'électricité, les rejets au niveau du véhicule sont nuls et l'on doit s'intéresser à la filière amont. Il en est de même pour les biocarburants qui, par la photosynthèse, stockent du CO₂ qu'il faut prendre en compte dans le bilan global.

La diversification des énergies primaires oblige à utiliser les approches « well to wheel », du puits à la roue.



RAISONNER GLOBAL

Les perspectives offertes par les différentes énergies et technologies moteur sont très larges, le choix du couple énergie technologique est au coeur des débats, et nous devons raisonner globalement. Pour nous permettre de faire les choix dans cette multitude de solutions, il nous faut développer des indicateurs pertinents qui permettent la compréhension et la décision.

Nous pouvons alors parler de déterminants de l'automobile dans le contexte énergie - climat comme :

- Les rejets de CO₂ du puits à la roue.
- Le rendement du processus global.
- Les coûts du couple énergie/technologie automobile

Tout cela remis dans le contexte local de manière à intégrer dans les critères les usages clients (le besoin social de mobilité liée au développement économique) et la dimension géopolitique qui nécessite une politique Climat économiquement équilibrée entre les secteurs intégrant les principes d'un développement durable.

Ceci va se traduire au premier ordre par la spécialisation du couple énergie - technologie moteur pour optimiser son empreinte énergie/climat et nous allons maintenant comparer quelques solutions énergie-moteur.

LES TECHNOLOGIES

Toutes les technologies ne sont pas équivalentes vis-à-vis des différentes énergies disponibles

Ci-dessous une comparaison entre les principales possibilités des filières essence, diesel et électrique. Les calculs sont réalisés du puits à la roue, le premier graphe compare la consommation énergétique globale en Méga Joule et le second les rejets de CO₂ le tout ramené au km pour un véhicule de taille moyenne (Citroën C4, Peugeot 308).

Nous pouvons identifier clairement les couples énergie-moteur présentant une empreinte énergie-climat minimale.

Comme notre intuition pouvait nous le laisser penser, les hybrides et les électriques sont les plus performants.

Mais pour que cette analyse soit objective, il faut intégrer les autres critères comme :

- Les coûts du couple énergie/technologie automobile.
- L'usage possible de ce couple énergie/technologie.

Le coût

Le coût des technologies est un facteur déterminant vis-à-vis de la « pervasion » de la technologie (taux de pénétration dans le marché).

Car quel est l'intérêt de proposer une technologie très performante si sa pervasion est faible, son impact global sur l'empreinte climat énergie le sera aussi.

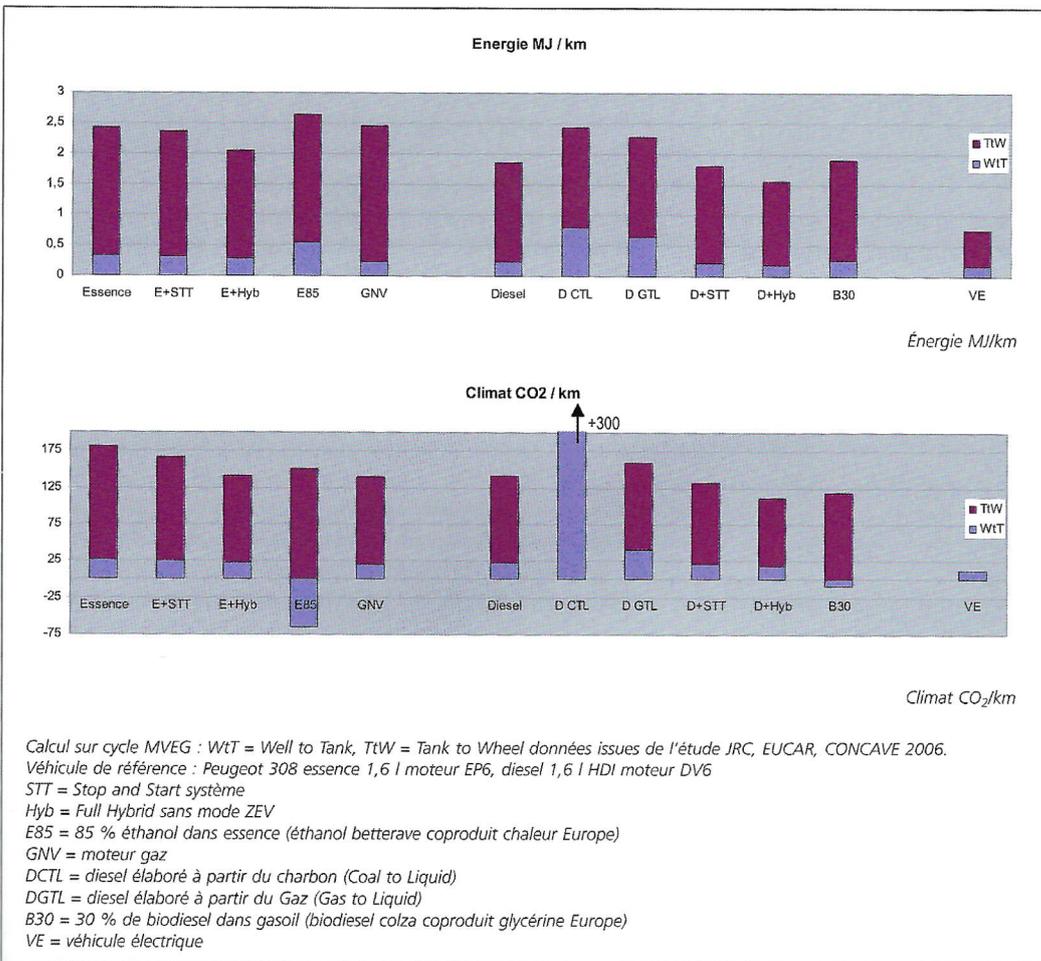
Le graphe suivant donne un ordre d'idée du coût énergie-climat-technologie, toujours pour le même type de véhicule.

On constate une concentration d'un ensemble de technologies tels que : E85, HDI, Hybride essence GNV2, etc. qui semble difficile à discriminer. Pour cela nous devons donc envisager un autre critère qui peut être l'usage.

L'usage

Toutes ces énergies ne sont pas égales vis-à-vis d'un usage dans les transports.

Le pétrole est encore l'énergie la plus facile à transporter (c'est un liquide) et possède un pouvoir



fonction de son efficacité, ses émissions etc.

Nous voyons là que l'utilisation des énergies alternatives apporte des contraintes nouvelles par rapport à la polyvalence du pétrole.

QUELLES SOLUTIONS CONCRÈTES ?

C'est donc encore et toujours à court terme du côté des économies d'énergie que le potentiel est le plus important.

Donc priorités aux économies d'énergie et à l'introduction progressive des énergies alternatives.

L'objectif de PSA Peugeot Citroën est de mettre :

«La meilleure technologie au service de ses clients, au bon endroit et au meilleur moment.» Dans cette optique, le Groupe souhaite mettre très rapidement sur le marché des véhicules différents et innovants pour mieux répondre à ces attentes.

Les motorisations thermiques

Elles ne sont pas hors jeu. D'importantes avancées ont été réalisées et les travaux se poursuivent dans de nombreux secteurs.

Frottements, matériaux, poids

Ces dernières années, d'importants travaux ont été réalisés pour alléger et réduire les frottements des moteurs thermiques.

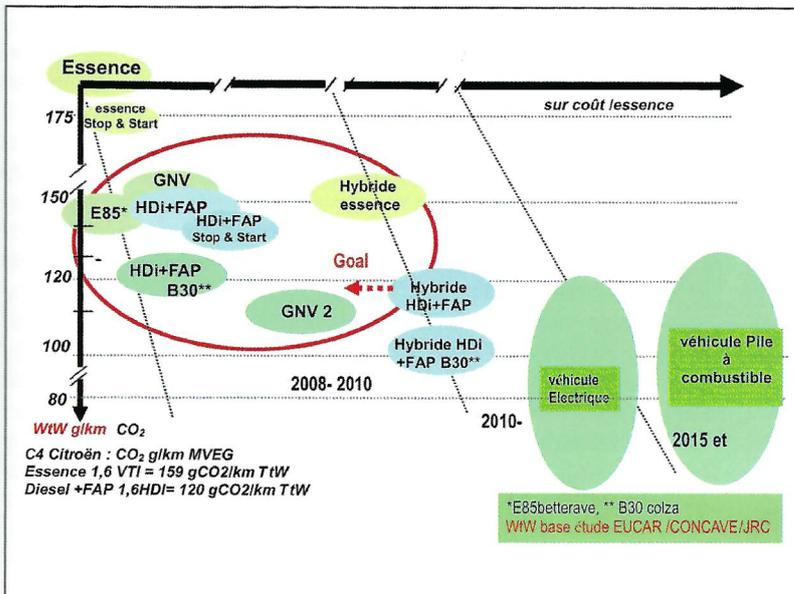
Ceci c'est traduit par des gains de rendement de l'ordre de 5%.

Le downsizing (réduction de cylindrée à couple identique) a permis des gains significatifs en consommation et poids des moteurs.

Diesel : des progrès encore possibles pour les motorisations moyennes et fortes

PSA Peugeot Citroën est leader mondial du Diesel à injection directe. L'expertise mondialement reconnue du Groupe dans les motorisations diesel s'appuie sur une politique d'innovation liée tant au moteur lui-même qu'aux techniques de dépollution mises en oeuvre. Depuis plus de 15 ans, PSA Peugeot Citroën poursuit ses investissements de R&D pour développer et diffuser largement de nouvelles générations de moteurs diesel dotées de l'injection directe à haute pression et à rampe commune. Pour exemple, le succès des motorisations HDi qui équipent aujourd'hui plus de 8 millions de véhicules. Elles procurent en effet :

- une économie de consommation de plus de 20% par rapport à un moteur diesel d'ancienne génération, induisant une diminution équivalente des émissions de CO₂ ;
- un agrément de conduite obtenu par un couple disponible à bas régime, dans un environnement sonore et vibratoire qui n'a plus rien à envier au moteur essence ;
- un excellent bilan environnemental obtenu par la maîtrise précise de la combustion que permet le « common rail » et par l'utilisation de systèmes de dépollution très



Panorama technologie/CO₂/coûts

calorifique élevé. Aucune autre énergie ne présente un profil aussi attrayant.

Par exemple, le gaz ou l'hydrogène sont plus compliqués à exploiter, aussi bien dans une voiture que dans une station-service car il faut les comprimer à 200, 300 voire 700 bars pour l'hydrogène. Le tableau suivant compare quelques-unes de ces énergies.

L'introduction des énergies alternatives telle que le GNV ou l'électricité si elles présentent des avantages (CO₂, rendement, coût d'usage) va limiter l'usage même du véhicule. (Temps de remplissage, autonomie, volume utile...).

Il ne faut plus raisonner uniquement avec l'énergie pétrole qui est polyvalente. Il deviendra nécessaire de spécialiser le couple énergie/moteur pour un usage donné en

| Énergie | kWh/kg | kWh/l | Temps de remplissage | Autonomie km |
|-------------------------------|--------|-------|----------------------|--------------|
| Essence (Liquide) | 12 | 9 | 1 à 2 mn | 600 |
| Diesel (Liquide) | 12 | 10 | 1 à 2 mn | 900 |
| Biocarburant E85 (Liquide) | 8 | 6 | 1 à 2 mn | 420 |
| Biocarburant B30 (Liquide) | 11 | 9 | 1 à 2 mn | 860 |
| GNV (Gazeux, 200b) | 2,2 | 2,5 | 3 à 5 mn* | 210 |
| Électricité (Électrochimique) | 0,12 | 0,25 | 6 h ou 15 mn** | 90 |
| Hydrogène (gazeux, 700b) | 3 | 4 | 5 à 10 mn* | 450 |

* Station public régulé avec stockage intermédiaire; ** avec charge rapide

Tableau énergies/usage. Véhicule type 308/C4 : réservoir volume 60 litres

performants. La technologie HDi est depuis 2000 alliée à un système de dépollution très performant, le Filtre à Particules (FAP), qui élimine définitivement les particules diesel - quelles que soient leurs tailles - en les ramenant au seuil du mesurable (0,004 g/km). Ces véhicules ont été mis en conformité avec la réglementation Euro 5 bien avant septembre 2009, date de son entrée en vigueur.

Essence : des avancées rapides à moyen terme

La nouvelle gamme de moteur 4 cylindres essence PSA (série EP en partenariat avec BMW) a gagné en performances et a réduit les émissions polluantes. Par exemple, les nouveaux moteurs EP6 (1,6l) sont dotés des avancées technologiques les plus récentes en termes d'architecture (contrôle variable des soupapes et turbocompresseur, injection directe, attelage mobile basse consommation...), d'alimentation et d'injection, permettant à la fois d'améliorer l'agrément de la conduite, de réduire de 15% la consommation et les émissions de CO₂.

Ces moteurs se distinguent par leur disponibilité, leur frugalité et leurs faibles émissions polluantes.

Pour compléter cette gamme vers le bas, une nouvelle famille de moteurs essence « 1 litre 3 cylindres » dont la puissance ira de 70 à 100 CV est en cours de développement.

Ces moteurs apporteront une réduction très significative des consommations et des émissions de CO₂.

L'objectif est de proposer sur le marché des véhicules dont le niveau d'émissions de CO₂ sera inférieur à 100g/km sans technologie additionnelle et à coût réduit. Par l'adjonction de technologies additionnelles (STT, réduction de masse, ...) des émissions de l'ordre de 90g CO₂/km pourront être atteintes.

Les Biocarburants

En adoptant une directive visant à promouvoir l'utilisation des biocarburants, l'Union européenne a confirmé que le XXI^e siècle se tournera vers les énergies renouvelables.

Les biocarburants sont par nature des énergies renouvelables et ils présentent le double intérêt d'allonger les réserves de pétrole et de réduire les émissions de gaz à effet de serre (- 20% à - 80% en fonction de la nature de la plante, du lieu de production et de son climat).

Il existe deux grandes familles :

- l'éthanol, alcool issu des céréales ou de la betterave, compatible avec l'essence ;
- le biodiesel (Diester) ou Ester Méthylque d'Huile végétale (EMHV), issu des plantes oléagineuses comme le colza ou le soja, compatible avec le gazole.

Cette 1^{re} génération de Biocarburants (ou agro-carburants) présente un potentiel limité en terme de capacité totale de production. Elle est sujette à controverse en termes

d'efficacité environnementale (de nombreuses études contradictoires sont disponibles).

Les biocarburants de 1^{re} génération n'en constituent pas moins la seule solution à court terme permettant de diminuer significativement les émissions globales de CO₂ du parc automobile.

Il faut cependant que ces biocarburants respectent eux-mêmes des critères stricts de durabilité incluant le gain de CO₂ (mini 35% pour E100 ou B100 du puits à la roue), l'efficacité

énergétique, la compétition avec les cultures alimentaires, la biodiversité, l'affectation des surfaces dont la déforestation... ; ces critères sont en cours de définition au niveau de la Commission Européenne et du CEN.

Ainsi l'intérêt des biocarburants de 1^{re} génération est confirmé pour l'automobile :

L'Europe et la France confirment un bilan CO₂ global favorable (absorption de CO₂ lors de la photosynthèse), qui contribue à limiter l'effet de serre du puits à la roue (Étude 2008 ADEME/MEDAD contexte France : B30 - 17% et E85 - 40% de CO₂ WtW) ; et maintiennent leur plan de marche avec quelques adaptations :

- Europe : pour les transports utilisation d'énergie renouvelable (incorporation de biocarburants 1^{re} et 2^e génération, utilisation de GNV ou hydrogène) : 5% en 2010 et 10% en 2020.

- France : incorporation de biocarburants 1^{re} et 2^e génération en énergie (PCI) : 5,75% en 2008, 7% en 2010 et 10% en 2015.

En conséquence, il faut choisir les bonnes filières de biocarburants de 1^{re} génération en terme d'impacts globaux et rester en deçà des volumes qui mettent ces filières en concurrence avec l'alimentaire. Ces biocarburants sont compatibles avec pratiquement toutes les technologies moteurs.

Dans les motorisations modernes leur utilisation est possible jusqu'à 10% en volume de biodiesel dans le gazole et jusqu'à 10% en volume d'éthanol dans l'essence sans modification de la technologie des moteurs.

Les moteurs HDi du groupe PSA sont quant à eux compatibles sous certaines conditions³ jusqu'à 30% biodiesel dans le gazole (B30), la réduction des émissions de particules est alors de - 19%.

Au Brésil, PSA Peugeot Citroën propose sur ses véhicules essence la technologie Flex-Fuel qui permet un fonctionnement avec des quantités variables d'alcool dans l'essence, allant de 22 à 100%. Pour l'Europe des véhicules Flex-Fuel compatibles avec les conditions du marché, permettant de fonctionner avec un taux d'alcool de 0 à 85% (E85) sont aujourd'hui commercialisés dans les pays où ce carburant est distribué.

Dans le futur (2015), la 2^e génération issue de la Biomasse lignocellulosique permettra d'atteindre les quotas de 10% européen en 2020 tout en respectant les critères de durabilité.

Cette 2^e génération qui utilisera la filière biomasse pour obtenir des carburants synthétiques (BTL, Synfuel, MTSynfuel)⁴ présente un potentiel important vis-à-vis du CO₂ (gain de 85% de CO₂ WtW). Cette 2^e génération est complètement compatible avec tous les moteurs (jusqu'à

100 % sans modification) et elle peut être mélangée avec la première génération et les carburants fossiles.

À court terme, l'incorporation à faible taux E10 et B10 (max 10% en volume) est la voie qui présente le meilleur impact en termes de coût, rapidité, efficacité pour diminuer les émissions de CO₂.

Ainsi l'incorporation de :

- 1 tonne de bio diesel colza permet d'éviter 2,5 tonnes CO₂.
- 1 tonne de bio éthanol betterave permet d'éviter 1 tonne CO₂.

Le GNV (Gaz Naturel Véhicule)

Véritable alternative aux carburants traditionnels, le GNV s'en distingue par son haut pouvoir calorifique, ses émissions réduites de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre (- 20 % à - 25 % d'émissions de CO₂ par rapport à un moteur essence équivalent) - ainsi que le faible bruit émis lors de sa combustion.

En raison de sa disponibilité mondiale, le GNV peut être considéré, comme un carburant alternatif à l'avenir prometteur, tant en Europe que sur des marchés plus lointains tels le Mercosur, la Chine et l'Iran. Il peut donc aider à la diversification des approvisionnements énergétiques. Le bilan CO₂ est d'autant plus favorable que le gaz est consommé près de son lieu d'extraction. Ceci explique le potentiel de certains marchés (Iran, Chine...).

Le GNV reste un carburant fossile. Pour le long terme les filières biogaz sont prometteuses.

Le biogaz est un mélange composé essentiellement de méthane (typiquement 50 à 70 %) et de gaz carbonique, avec des quantités variables d'eau et d'hydrogène sulfuré (H₂S).

Le biogaz carburant est donc du bio méthane utilisé comme carburant vert pour véhicules. Sa partie énergétique est du méthane biologique, il s'agit donc tout simplement de GNV renouvelable. Le biogaz est produit par la fermentation de matières organiques animales ou végétales en l'absence d'oxygène. Il présente le double intérêt de traiter les déchets organiques industriels ou agricoles, les boues d'épuration et de produire de l'énergie.

PSA Peugeot Citroën propose des véhicules utilitaires (Berlingo, Partner) pouvant fonctionner au gaz naturel depuis près de 10 ans et élargit également son offre aux voitures particulières (C3GNV, C4 Picasso pour l'Italie, 206 GNV assemblée en Iran...).

Les motorisations électriques

PSA donne la priorité au déploiement de technologies électriques les plus immédiatement généralisables sur les marchés comme le STT⁵. Pour les autres technologies présentant un surcoût encore important, la question des incitations et du soutien des pouvoirs publics est centrale pour le démarrage de ces marchés.

Le STT (Stop and Start)

Partant du constat qu'en ville, un véhicule est à l'arrêt, moteur tournant, environ 30% de son temps, PSA Peugeot Citroën propose déjà sur plusieurs véhicules (Citroën C2, C3...) un premier niveau d'hybridation, le Stop & Start. Cette technologie permet de couper le moteur et de le redémarrer en une fraction de seconde. Le STT procure en ville une réduction de consommation allant jusqu'à 15%. Cette technologie présente le meilleur ratio surcoût technologique/gain environnemental et peut donc être généralisée facilement et rapidement. PSA a programmé pour Le STT un déploiement massif à partir de 2010.

«À terme, il ne devrait plus y avoir de moteur thermique sans STT.»

Les Full hybrides

PSA a présenté sous la forme de deux démonstrateurs (307 et C4 hybrides HDi) début 2006 la technologie hybride HDi. L'hybride HDi associe à un moteur diesel HDi 1,6 l doté d'un filtre à particule (FAP), un système Stop & Start de dernière génération et y ajoute un moteur électrique, un onduleur, des batteries haute tension et une électronique de contrôle dédiée. La transmission est assurée par une boîte manuelle pilotée.

La consommation moyenne de ces démonstrateurs hybrides HDi est de 3,4 l de gazole aux 100 km et les émissions de CO₂ sont de 90 grammes par km. Le gain obtenu en comparaison d'un véhicule similaire équipé d'une chaîne de traction hybride essence est de 1 litre aux 100 km sur cycle mixte, soit près de 25 % en moins. PSA Peugeot Citroën mettra sur le marché des véhicules Hybrides HDi dès 2011 sur des modèles «distinctif» et «premium». Le concept «Hypnos» de Citroën et «La Prologue» de Peugeot présentés au mondial de l'automobile en sont une illustration.



Concept Citroën HYPNOS

Les Véhicules électriques

Ils ne présentent aucun rejet de CO₂ sur leurs lieux d'utilisation, les véhicules électriques de première génération équipent déjà bon nombre de flottes en milieu urbain. Ils ont connu leur principal succès en France comme à l'étranger auprès des entreprises et collectivités locales bénéficiant d'un parc de petits utilitaires destinés à accomplir des missions précises dans les villes. PSA était le leader mondial dans les années 1995-2005, aujourd'hui cette expérience nous permet de valoriser de manière objective les avancées et progrès techniques et économiques des batteries, principal déterminant du succès du véhicule électrique.

Ainsi, l'amélioration des technologies batteries (énergie massique et volumique accessible en Li-ion) et le début de baisse de leur coût sont autant d'éléments émergents en faveur du retour des véhicules électriques.

De plus, la prise de conscience collective, les aides et incitations fiscales, les péages urbains, et les restrictions urbaines pour les véhicules thermiques vont favoriser de nouveaux marchés particulièrement adaptés aux véhicules électriques.

À terme, moins de performances et de vitesse seront demandées à ce type de véhicules typiquement urbain.

Les premiers clients potentiels sont les flottes entreprises ou les collectivités qui peuvent revendiquer un usage intensif, avec peu de distances entre recharges, qui sont sensibles au coût global d'utilisation, et motivés par leur image environnementale. Le tout bien sûr, si le bilan économique global est sensiblement identique ou légèrement supérieur aux véhicules thermiques Diesel. On peut aussi en complément, espérer voir le développement de flottes urbaines en auto-partage, mais les volumes resteront faibles.

Malgré ces signes encourageants, des freins limitent encore le développement en masse de véhicules électriques : les batteries dont le prix reste élevé, en conséquence les véhicules électriques sont très chers, et avec une autonomie limitée.

Pour accroître la viabilité des projets de véhicule électrique, accélérer leur introduction, et atteindre rapidement des volumes significatifs dans ces marchés qui resteront pour encore plusieurs années des marchés de niche, les coopérations industrielles sont une des solutions pour partager les efforts de développement et les investissements de fabrication.

PSA sera au rendez-vous pour proposer des solutions viables et durables sur ces marchés émergents.

DEMAIN, L'USAGE PRINCIPAL DÉTERMINERA LE CHOIX DU COUPLE ÉNERGIE/TECHNOLOGIE

Automobile et intermodalité urbaine

La voiture est un facteur de mobilité indissociable de la ville. Plébiscitée par 70 % des Européens pour sa souplesse d'utilisation, la voiture est aujourd'hui confrontée à une double problématique. Elle doit répondre à une augmentation continue des besoins de mobilité tout en contribuant à l'amélioration de la qualité de vie dans des villes de plus en plus étendues.

Pour PSA Peugeot Citroën, l'enjeu de la mobilité urbaine est de concilier ville, qualité de vie, besoin de mobilité et liberté individuelle. Dans cette optique, il est nécessaire d'apporter de nouvelles réponses en termes d'offres et de concilier l'usage des transports en commun et des transports individuels, pour permettre à chacun d'opérer un arbitrage plus efficace entre différentes propositions. Ces propositions portent sur :

- le développement de nouveaux modes d'utilisation de l'automobile et du véhicule utilitaire, pour le déplacement des personnes comme celui des marchandises, en favorisant l'intermodalité et la multimodalité des transports ;

- l'optimisation des déplacements grâce au développement de l'information en temps réel pour le conducteur sur les conditions de circulation et les stratégies de fluidification du trafic.

Pour améliorer la mobilité urbaine, il faut organiser à la fois la circulation des personnes, des marchandises et le stationnement urbain.

Il faut assurer un équilibre entre les impératifs de mobilité et la préservation de l'environnement. Ainsi, PSA Peugeot Citroën étudie de nouveaux modes de transports urbains. Le concept Taxi du futur en est une illustration en termes d'accès et de connectivité.

Location courte durée *intra-muros*

L'idée de mettre à la disposition du public des véhicules adaptés à la mobilité urbaine date des années 90 ; Liselec (Libre Service ELECTrique) en est un exemple. Liselec est un système d'utilisation en libre-service de véhicules électriques dans les villes auprès d'un réseau de clients abonnés.

Ce projet connaît une application concrète dans la communauté d'agglomérations de La Rochelle depuis 1999. Plus de 380 personnes utilisent les 50 véhicules Liselec (des Peugeot 106 et Citroën Saxo électriques), répartis sur 6 stations situées en des points névralgiques de la ville : gare SNCF, campus universitaire, port, centre-ville. Le retour d'expérience des projets sur les vélos en libre-service incite les municipalités à réfléchir et elles lancent des appels d'offres pour des services de véhicules urbains électriques en libre-service. Paris et Lyon sont les deux villes les plus avancées dans cette démarche.

Technologies et usages

Comme nous venons de le voir certaines technologies n'affichent des gains que dans un usage urbain ou péri urbain.

C'est le cas des solutions STT et hybride. Un full hybride devra être majoritairement utilisé en ville, surtout s'il repose sur une motorisation essence. De même le diesel reste le meilleur choix pour les trajets route et autoroute où le moteur fonctionne à charge constante. L'électrique présente le meilleur rendement dans tous les cas d'usages mais la technologie des batteries limite son autonomie et donc la réserve à un usage urbain.

CONCLUSION

Pour déployer massivement la voiture écologique, ce n'est pas une route qui s'offre à nous, mais bien un réseau dense de différentes solutions, et les choix d'aujourd'hui conditionneront les résultats de demain en termes d'énergie/climat.

«La voiture écologique de demain sera plurielle».

Dans ce choix complexe quelques vérités émergent :

- Élargir le panel des énergies (GNV, Biocarburants, électricité).
- Augmenter l'efficacité énergétique (principalement des motorisations thermiques).
- Raisonner «global» du puits à la roue (en CO₂, énergie et coûts) pour les énergies alternatives.
- Identifier les conditions de l'introduction sur le marché des nouvelles technologies (hybrides, électriques,...) et des nouveaux vecteurs énergétiques (électricité, biocarburants, gaz, hydrogène).
- Optimiser le couple énergie-technologie en fonction de l'usage.

Dans ce contexte, PSA souhaite consolider sa position de n° 1 de la voiture écologique, et poursuit sans relâche une politique réaliste d'adaptation de ses technologies aux différentes sources d'énergies en fonction des zones de commercialisation et du contexte local des ressources disponibles.

Le développement des énergies alternatives constitue un facteur clé pour la réduction des émissions de CO₂, donc de l'effet de serre, mais permet aussi de réduire la dépendance au pétrole.

Pour cela il faut des solutions techniques efficaces, et économiquement abordables.

Ainsi pour l'Europe, PSA Peugeot Citroën prévoit :

- D'amplifier sa R&D sur les moteurs thermiques en proposant des véhicules toujours aussi performants et plus économes.
- De déployer de façon massive des technologies hybrides avec la commercialisation de 1 million de Stop & Start dès 2011 suivi de la commercialisation de véhicules hybrides HDi.
- D'être au rendez-vous du véhicule électrique.

1. Source T&E.

2. Infrastructures de transport, mobilité et croissance étude du CAE (Conseil d'Analyse Économique).

3. L'intensité énergétique relie la consommation d'énergie à la croissance économique. Dans le passé la consommation globale d'énergie a crû moins vite que l'activité économique. Il faut donc de moins en moins d'énergie pour produire autant en valeur.

4. PCI : pouvoir calorifique inférieure ; 5,75 % en PCI = 8,6 % en volume.

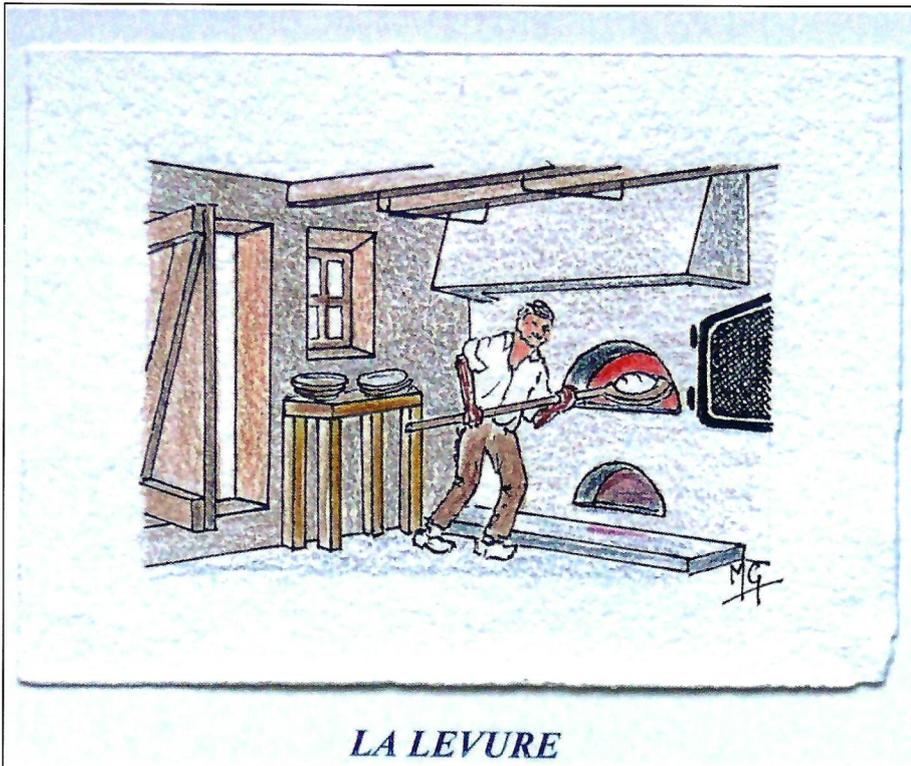
5. Entretien renforcé et qualité du mélange.

6. BTL = Biomass To Liquid, Synfuel = Synthetic fuel, MTSynfuel = Methanol-to-Synfuel.

7. STT = Stop and Start.

Histoires de plantes et autres ...

Par Michel Gendraud (dessins et textes)



LA LEVURE

Au hameau, chauffer le four tenait du rituel. La veille au soir, l'aïeule mélangeait dans le pétrin farine, sel et eau. Le moment venu, elle ajoutait le mystérieux Levain, pâte boursouflée gardée en cave depuis la fois dernière. Au matin, prêt à enfourner, le pain chargeait les paillasses et le Levain gardait son secret.

Le secret, le voilà. Dans le Levain est une petite vie, la Levure, cousine de la Morille, qui coupe en deux le sucre de la pâte fraîchement pétrie et façonne chacune des moitiés en alcool et gaz carbonique. Par cette fermentation, la Levure obtient la demi-dîme d'énergie qui lui permet de proliférer toute la nuit. Au matin, une boule de pâte levée, futur Levain, rejoint la fraîcheur de la cave. Pour le reste, la cuisson au four anéantit la vie, évapore l'alcool, fige les bulles en mie et dore la croûte du pain.

La Levure a toujours fermenté les sucres. Depuis que l'agriculture existe, elle échange avec l'Homme, un peu de sucre contre un bon pain, contre un bon vin, contre une bonne bière. Et avec les biotechnologies, un peu de mélasse contre un biocarburant... Quelle chance d'avoir connu la Levure par le mystère du Levain dans le pétrin d'une chaumière des Combrailles.



L'AZOLLE DES RIZIERES DU VIETNAM

Minuscule et flottante, l'humble Fougère se ramifie à la surface de l'eau de la rizière où vit, libre, Anabaena, bactérie bleue en chaînette. Dans chaque feuille d'Azolle, tout contre l'eau, est une crypte garnie de poils où entre la bactérie. Alors un poil la reconnaît, s'y accroche et la retient.

Dès lors, alimentée en sucre, la chaînette transforme ses maillons pour qu'ils fixent l'azote de l'air. Ils en fixent tant qu'ils en cèdent à la Fougère qui, à la fin de sa végétation, libère cet azote, engrais pour le riz.

Vers l'an mille le moine Khong Minh Khong sauva son pays de la famine en montrant les bienfaits de la Fougère et plus tard, les paysans construisirent un

temple à l'Azolle. Cet édifice, implanté à La Vân, fait partie des circuits touristiques du Vietnam. On y célèbre la reine de l'Azolle, la bactérie en chaînette n'est pas mentionnée.