AUVERGYE

ciences

N° 51 - DECEMBRE 2001

LA TRANSDUCTION VISUELLE
L'ÉNERGIE À L'HORIZON 2050
UNE PILE À COMBUSTIBLE

BULLETIN DE L'ADASTA

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

Au printemps 1986 une équipe de scientifiques créa l'ADASTA avec pour objectif de diffuser et promouvoir la culture scientifique et technique dans la région Auvergne, notamment auprès des jeunes.

Chaque année en octobre et ceci depuis 10 ans les Ministères de la Recherche et de l'Education Nationale lancent la Fête de la Science qui fait désormais partie des manifestations d'envergure nationale.

"La Fête de la Science contribue à développer la culture scientifique et technique, à améliorer la connaissance de la science pour chacun, à convaincre les jeunes de s'engager plus nombreux dans les études scientifiques" extrait du communiqué de presse du Rectorat de l'Académie de Clermont-Ferrand octobre 2001.

Comme chaque année l'ADASTA participe à l'élaboration du programme régional de cette fête de la science, et ouvre ses locaux pour présenter un ensemble d'activités. Cette année le thème du projet était le suivant : les sciences de l'artificiel : (Œuvre de H. A Simon Prix Nobel 1978)

- la modélisation des systèmes industriels
- les systèmes experts
- la traduction automatique

Une conférence de Monsieur Naranjo Professeur à l'Université Blaise Pascal sur l''Epistémologie des Sciences de l'Artificiel." vient compléter ce thème.

Nous nous réunissons régulièrement avec Monsieur le Recteur de l'Académie Chancelier des Universités de Clermont-Ferrand et le groupe "Culture Scientifique et Technique"; ce groupe est composé des représentants émanant de l'Inspection Académique et des



J.C Capelani

Universités, IUFM, DRRT, IFMA, CEVU, CRDP. La conclusion montre l'inquiétude grandissante de la désaffection de certains jeunes et en particulier les jeunes filles pour les carrières scientifiques.

A titre d'exemple à Clermont en 2001 les inscriptions en première année de DEUG scientifique baissent de 25 % soit - 200 étudiants ; depuis 1994 l'effectif a été divisé par 2. Toutes les filières sont touchées, notamment les sciences de la matière.

L'équipe d'animation scientifique de l'ADASTA dans ses locaux poursuit son action auprès des adultes dans les domaines de la physique, de l'informatique, de la biologie, etc.... et auprès des enfants de 6 à 11 ans par la mise en place "DES JEUNES POUSSES DE L'ADASTA."

Les jeunes pousses de l'ADASTA réaliseront des expériences scientifiques simples et fabriqueront des objets ou des jeux utilisant le phénomène expérimenté.

Ainsi l'ADASTA, grâce à ses animateurs bénévoles, œuvre pour vulgariser la science et la rendre attractive pour tous.

Le Président de l'ADASTA, J.C. CAPELANI



Comité de rédaction de la Revue Auvergne-Sciences

Président : Paul Avan - Rédactrice : Jocelyne Allée Membres : Jean-Claude Capelani, Luc Dettwiller, Paul-Louis Hennequin, Roland Jouanisson, Michel Naranjo.



Photo de Couverture : Le Puy-de-Dôme (Photo J.-C. Capelani)

# La transduction visuelle : du photon au message électrique

#### **Michel DOLY**

Professeur des Universités, facultés de médecine et de pharmacie, laboratoire de biophysique/unité Inserm 71, 28, place Henri-Dunant - BP 38 - 63001 Clermont-Ferrand.

La transduction visuelle ou phototransduction recouvre l'ensemble des événements physiologiques qui vont de la détection purement physique d'un photon jusqu'à la genèse d'un signal électrophysiologique. Il s'agit, en fait, de transformer une énergie radiative en une "énergie métabolique" à la base des transformations cellulaires indispensables à la mise en forme du message électrique.

La transduction visuelle est certainement le domaine de la biologie moléculaire qui s'est le plus enrichi depuis les vingt dernières années. Au-delà de la seule compréhension de l'enchaînement des différentes étapes de la perception rétinienne de la lumière, les progrès réalisés ont permis, d'une part, de savoir définitivement comment les vertébrés voyaient et, d'autre part, de mieux appréhender certains mécanismes moléculaires spécifiques tels que l'expression intracellulaire de la fixation d'une hormone sur son récepteur.

#### I. AU NIVEAU DE LA RÉTINE [3 ; 14 ; 19]

Les enchaînements des étapes, purement biochimiques, de la phototransduction au niveau d'un bâtonnet sont maintenant bien décrites, alors que certaines d'entre elles restent encore hypothétiques au niveau du cône.

Le bâtonnet (fig. 1) est une cellule extrêmement différenciée souvent assimilée à un véritable détecteur de photons de très grande sensibilité puisque, en moyenne, un seul photon est capable d'exciter un bâtonnet. Cette analogie se retrouve également au niveau de la morphologie de la cellule. La zone photosensible du bâton-

net correspond au segment externe alors que c'est le segment interne qui renferme la machinerie métabolique et génétique de la cellule. Le segment externe s'apparente à une véritable antenne de 30 µm à 50 µm de long qui correspond à la quasi-totalité de la masse totale de la cellule. Ce segment externe renferme, environ 2000 disques (ou saccules) de petite taille qui sont régulièrement empilés. L'axe de ces disques étant perpendiculaire au grand axe de la cellule, l'ensemble a une structure très ordonnée, quasicristalline. Cette très grande spécialisation du bâtonnet se retrouve au niveau de ses constituants biochimiques: la rhodopsine, pigment photosensible, représente environ 80 % du contenu de la cellule en protéines.

Le mécanisme de la phototransduction, qui a lieu en totalité dans le segment externe du photorécepteur, utilise deux particularités de la cellule :

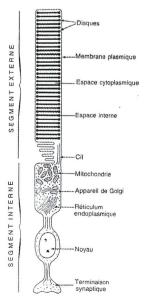


Figure 1 : Schéma d'un bâtonnet de rétine de mammifère.

- la membrane discale est totalement indépendante de la membrane plasmique du bâtonnet ;
- l'espace interdiscal est extrêmement réduit, souvent assimilé à une véritable synapse, ce qui assure une transmission rapide de l'information dans la cellule.

#### II. LES ÉVÉNEMENTS PHOTOCHIMIQUES [12]

Malgré la complexité des mécanismes de la phototransduction, ces événements constituent une étape incontournable. En effet, d'un point de vue purement physique, la rétine fonctionne comme un détecteur à photons. Or. quelle que soit la longueur d'onde des photons incidents sur un détecteur, leur détection implique obligatoirement leur absorption. Cette règle, à la base du fonctionnement d'instruments de physique de nature très variée, reste totalement valable dans le milieu vivant. Or. à ce niveau, le mécanisme le plus simple pour absorber des photons est d'utiliser une molécule photosensible, en l'occurrence le photopigment des bâtonnets qui est la molécule de rhodopsine.

C'est une molécule ayant une organisation bien spécifique, associant une partie protéique, l'opsine, à un groupement chromophore l'isomère 11-cis du rétinal (ou aldéhyde de la vitamine A). L'opsine correspond à un enchaînement de 348 acides aminés dont on connaît parfaitement maintenant la séquence. Cette protéine possède des propriétés enzymatiques, catalysant certaines réactions biochimiques. La molécule d'opsine est organisée en 7 hélices- $\alpha$  reliées par de courts segments polypeptidiques. Le groupement chromophore, lié à l'une des hélices- $\alpha$ ,

se trouve ainsi enfermé à l'intérieur de la molécule (fig. 2). Il comporte un noyau à 6 atomes de carbone et une chaîne latérale hydrocarbonée dite conjuguée car simple et double liaisons alternent régulièrement. L'isomère 11-cis, qui correspond à la molécule de rhodopsine sous sa forme fonctionnelle, est caractérisé par une chaîne latérale coudée entre les atomes de carbone 11 et 12.

La liaison associant opsine et 11-cis rétinal a des conséquences majeures en photochimie visuelle. En effet, l'opsine, comme la plupart des molécules protéiques, absorbe au maximum à 280 nm, pic caractéristique des acides aminés aromatiques. Cette longueur d'onde appartient au spectre des UV donc en dehors de celui de la lumière visible. Le 11-cis rétinal, seul, présente un maximum d'absorption caractéristique à 380 nm. Cette longueur d'onde se situe au tout début du spectre visible, à la limite supérieure du spectre UV. Ce maximum d'absorption traduit l'excitation des électrons- $\pi$  de la chaîne latérale conjuguée. Or, lorsque le 11-cis rétinal est lié à l'opsine, un tel environnement protéique est à l'origine d'une délocalisation des électrons- $\pi$  de la chaîne conjuguée. Ainsi, ces électrons, plus facilement excitables, pourront absorber des photons de longueur d'onde supérieure et être responsables du maximum d'absorption à 500 nm caractéristique de la rhodopsine. En d'autres, termes, c'est la délocalisation des électrons-π du 11-cis rétinal, induite par sa liaison à l'opsine, qui est responsable du maximum de sensibilité de la rétine à 500 nm en vision scotopique. La photochimie visuelle prend ainsi tout son sens.

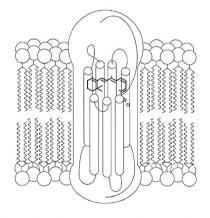


Figure 2 : Représentation schématique d'une molécule de rhodopsine au niveau de la membrane discale d'un bâtonnet.

La molécule de rhodopsine a une localisation bien spécifique dans le segment externe du bâtonnet. Il s'agit d'une protéine intrinsèque de la membrane discale. Les 7 hélices- $\alpha$  de l'opsine sont disposées suivant un axe

perpendiculaire à la membrane et le 11-cis rétinal se trouve vers le centre de la bi-couche phospholipidique, aligné dans le plan médian. Les deux extrémités libres de la molécule de rhodopsine sont immergées respectivement dans l'espace cytoplasmique et le milieu intrasacculaire (fig. 2).

Lorsque la molécule de rhodopsine absorbe un photon, il y a isomérisation de son groupement chromophore (fig. 3).

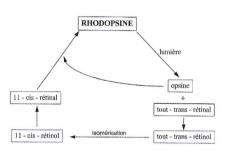


Figure 3 : Cycle de photo-isomérisation de la rhodopsine et de régénération à 1'obscurité.

L'énergie ainsi absorbée est suffisante pour faire passer le rétinal de sa forme 11-cis à sa forme tout-trans (sans coude au niveau de la chaîne conjuguée). Pour des raisons essentiellement stéréochimiques, l'association opsine/tout-trans rétinal n'est plus possible et cette liaison s'hydrolyse.

En fait, la photoisomérisation de la rhodopsine n'est pas directe. Plusieurs stades ont été identifiés, chacun d'eux correspondant à un photoproduit intermédiaire caractérisé par une conformation différente de l'opsine. Au cours de la transition métarhodopsine I → métarhodopsine II, l'information visuelle est transmise. La molécule de rhodopsine est très photosensible : l'absorption d'un photon est efficace en movenne une fois sur deux, alors que l'isomérisation spontanée reste extrêmement rare. Cette sensibilité est telle que lorsqu'un seul photon est incident sur la rétine, une molécule de rhodopsine est isomérisée au milieu de millions d'autres qui restent intactes.

Le cycle de régénération du photopigment a lieu à l'obscurité. Le tout-trans rétinal libéré est pris en charge par une isomérase pour redonner une molécule de 11-cis rétinal constituant le groupement chromophore d'une nouvelle molécule de rhodopsine. L'association opsine/rétinal étant thermodynamiquement spontanée, l'opsine joue le rôle d'un véritable piège à 11-cis rétinal.

Le départ de l'information visuelle au cours de la transition métarhodopsine  $I \rightarrow$  métarhodopsine II initie toute une succession d'événements biochimiques qui constituent la phototransduction.

#### III. LES ÉVÉNEMENTS BIOCHIMIQUES DE LA PHOTOTRANSDUCTION [1;2;23]

La transduction visuelle a lieu en totalité à l'intérieur du segment externe du bâtonnet.

La participation de l'acide guanvlique cyclique (GMPc) à la genèse de la photoréponse a été évoquée vers les années 1975. Le segment externe du bâtonnet contient, en effet, une grande quantité de GMPc ainsi qu'une phosphodiestérase (PDE), spécifique du GMPc et activée par la lumière. La question se posait alors de savoir si la diminution de concentration en GMPc lors de l'illumination, conséquence de l'activation de la PDE, était suffisante pour rendre compte des phénomènes électriques. Or, vers la fin des années 1970, il fut établi que l'absorption d'un seul photon était capable d'entraîner l'hydrolyse d'au moins 10<sup>5</sup> molécules de GMPc.

C'est au début des années 1980, que le mécanisme reliant la photoisomérisation de la rhodopsine à l'activation de la PDE a été découvert. Il s'agit d'un mécanisme qui rend compte du phénomène majeur d'amplification. Il n'y a pas interaction directe entre rhodopsine et PDE mais intervention d'une protéine qui module l'activité de la PDE et qui possède une activité GTP-asique sensible à la lumière. Cette molécule. dénommée Transducine (T), n'est autre qu'une variété bien spécifique de Gprotéine. C'est une protéine qui se trouve accolée à la face externe de la membrane sacculaire et dont l'activation correspond à l'échange GDP → GTP. A l'image des autres G-protéines connues, elle est constituée de 3 sousunités  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  et c'est la sous-unité  $\alpha$ qui, fixant le GTP, est responsable de l'activité de la molécule. L'échange GDP → GTP s'accompagne d'ailleurs de la libération de la sous-unité  $\alpha$ . L'absorption du photon par la rhodopsine apparaît donc plutôt comme une activation de cette molécule (R → R\*) qui correspond à une conformation bien précise de l'opsine ; l'hydrolyse du groupement chromophore n'intervient que beaucoup plus tard, après l'inactivation de la rhodopsine.

Enfin, il a été récemment démontré que le GMPc commande directement l'ouverture des canaux sodium de la membrane du segment externe : les mesures quantitatives montrent qu'en moyenne 3 molécules de GMPc sont nécessaires pour ouvrir un seul canal. Ces données, qui établissent une

action directe d'un nucléotide cyclique sur une perméabilité membranaire, furent longues à être admises car, pour la grande majorité des autres mécanismes connus, les nucléotides cycliques ne sont qu'un intermédiaire. Ils n'agissent pas directement sur la réponse finale, mais activent des enzymes (les kinases) qui iront modifier les canaux protéiques.

Schématiquement, donc, "la cascade biochimique" de la phototransduction correspond à 3 cycles, chacun ayant son amplification propre :

- le cycle d'activation et d'inactivation de la rhodopsine  $\odot$  :

- le cycle d'activation et d'inactivation de la PDE @ :

- le cycle d'hydrolyse et de synthèse du GMPc ©.

L'enchaînement des différentes étapes de la transduction visuelle est schématisé sur la figure 4.

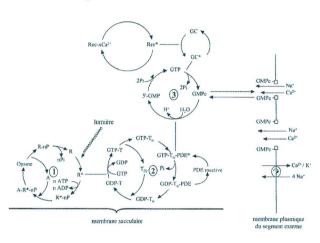


Figure 4: Les différentes séquences de la phototransduction à l'intérieur du bâtonnet : GC : guanylate-cyclase ; Rec : récovérine ; T : transducine ; R : rhodopsine ; A : arrestine : Pi : groupement phosphate inorganique ; P : groupement phosphate organique. ① : cycle de la rhodopsine ; ② : cycle de la phosphodiestérase ; ③ : cycle de l'acide guanylique cyclique (d'après Doly M Encycl. Méd. Chir. (Elsevier - Paris), Ophtalmologie, 21-026K-10, 1997).

Il y a des mécanismes d'activation et des mécanismes d'inhibition.

S'agissant de l'activation, la phototransduction proprement dite comprend:

- l'absorption du photon par la molécule de rhodopsine qui s'active : R → R\*
- R\* active à son tour la transducine : T-GDP  $\rightarrow$  T-GTP  $\rightarrow$  T $\alpha$ -GTP
- la sous-unité  $\alpha$  de la transducine va alors lever l'inhibition de la phosphodiestérase : PDE  $\rightarrow$  PDE\*
- celle-ci peut hydrolyser les molécules de GMPc en 5'-GMP
- la diminution de GMPc cytosolique provoque la fermeture des canaux Na<sup>+</sup> de la membrane du segment externe, à l'origine de son hyperpolarisation.

Cet ensemble d'événements dure environ 100 ms et reste localisé essentiellement à la membrane sacculaire. Chaque cycle a son coefficient d'amplification : c'est ainsi qu'un photon active environ une molécule de rhodopsine qui peut activer jusqu'à  $10^2$  transducine qui à leur tour activent  $10^2$  PDE responsables de l'hydrolyse de  $10^5$  GMPc ce qui provoque la fermeture de  $10^3$  canaux Na\* [18; 20].

Les mécanismes d'inhibition portent également sur les 3 cycles de la transduction :

- la rhodopsine activée (R\*) est prise en charge par une kinase et phosphorylée. Sous cette forme, son inactivation n'est pas totale : elle peut encore catalyser l'activation de la transducine, mais très lentement. En fait, la rhodopsine activée par l'absorption d'un photon (R\*) présente un site fonctionnel au niveau duquel a lieu la fixa-

> tion de la transducine ou la phosphorylation; il s'agit donc d'un site commun, les deux processus étant en compétition. L'inactivation complète de la rhodopsine est assurée par une protéine. l'arrestine (A) (ou protéine 48 k ou antigène S) qui vient se fixer sur le photopigment phosphorylé bloquant ainsi définitivement le déroulement de la cascade;

- la transducine, comme toutes les G-protéines, possède la propriété

remarquable de s'auto-inactiver. La sous-unité  $\alpha$  de la transducine (T $\alpha$ ) est capable d'hydrolyser le GTP fixé en GDP. Cette activité GTP-asique se manifeste, bien sûr, avec une cinétique telle que la levée de l'inhibition de la PDE par  $T\alpha$ -GTP puisse avoir lieu. Dans ces conditions, après hydrolyse du GTP, la forme Tα-GDP se sépare de la PDE, devenue ainsi inactive, et peut se recombiner au complexe des deux sous-unités  $\beta$  et  $\gamma$  (T $\beta\gamma$ ) pour redonner une molécule de transducine. Cette présentation schématique du cycle de la transducine confère aux 2 sousunités  $\beta$  et  $\gamma$  (T $\beta\gamma$ ) un rôle secondaire permettant à la sous-unité  $\alpha$  (T $\alpha$ ) de se lier à la membrane sacculaire. Cependant, des travaux actuels montrent que le complexe  $\beta \gamma$  (T $\beta \gamma$ ) pourrait jouer un rôle métabolique direct en relation avec l'activité de la phospholipase  $A_2$  [9];

- le cycle du GMPc, enfin, correspond à la formation de 5'-GMP qui, après fixation de 2 groupements phosphate, peut redonner une molécule de GTP qui sera prise en charge par une cyclase. Il y a, en fait, un équilibre, dans le milieu cytosolique, entre le GMPc qui

maintient les canaux sodium ouverts et le GMPc en solution. C'est l'évolution de cet équilibre qui conditionne la fermeture des canaux [13; 24].

En vision photopique, au niveau du cône, la situation est à la fois plus simple et plus complexe.

Plus simple, parce que les saccules empilés dans le segment externe sont formés par des replis successifs de la membrane plasmique ne nécessitant donc pas, a priori, l'intervention d'un messager intracellulaire.

Plus complexe, en raison du caractère photopique du stimulus qui implique l'intervention d'un mécanisme d'analyse spectrale. La sensibilité spectrale des cônes est déterminée par la nature du photopigment qu'ils renferment, c'est-à-dire, à l'image de la rhodopsine, de molécules protéigues couplées à des groupements chromophores. La phototransduction des cônes obéit à un mécanisme voisin de celui des bâtonnets faisant intervenir une G-protéine avec transmission de l'information liée aux guanosides-phosphates. Enfin, on a également pu établir que la photoexcitation des cônes entraîne, à l'image des bâtonnets, une hyperpolarisation de la membrane de leur segment externe.

Longtemps controversée, la place et le rôle des ions calcium (Ca²+) dans la fonction du bâtonnet apparaissent maintenant primordiales [21].

Cette place doit être resituée dans le cadre plus général des mouvements d'ions qui ont lieu de part et d'autre de la membrane de la cellule. C'est ainsi que, s'agissant des ions sodium  $(Na^+)$ , potassium  $(K^+)$  et calcium  $(Ca^{2+})$ , il est possible de distinguer :

#### 1. Au niveau du segment externe :

- le courant d'obscurité ("dark current") représenté à 80 % par un flux entrant d'ions Na+ et à 20 % par des ions Ca²+. Ainsi, la spécificité des canaux sodiques de la membrane du segment externe n'est que partielle ce qui confère un rôle majeur aux ions Ca²+ dans l'adaptation de la cellule à la lumière. Ce courant d'obscurité correspond à un flux entrant d'ions Ca²+ d'environ 107 ions/seconde ;

- un contre-transport Na<sup>+</sup>/(Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>) qui module l'entrée de quatre ions Na<sup>+</sup> pour la sortie de un ion Ca<sup>2+</sup> et de un ion K<sup>+</sup>. Ce contre-transport, qui participe à l'homéostasie ionique de la cellule, est insensible à la lumière et reste limité puisqu'il ne concerne qu'environ 500 ions Ca<sup>2+</sup>/seconde.

**2.** Au niveau du segment interne : On retrouve une classique pompe Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup> qui couple la sortie de trois Na<sup>+</sup> à l'entrée de deux K<sup>+</sup> elle est dépendante du système ATP/ATPase et reste sans incidence directe sur les mouvements de Ca<sup>2+</sup> dans la cellule.

Les équilibres ioniques que nous venons de décrire sont profondément modifiés lorsque la cellule passe de l'obscurité à la lumière.

La chute du GMPc intracellulaire conditionne l'arrêt brutal du courant d'obscurité donc de toute entrée d'ions Ca²+ dans la cellule.

Le contre-transport Na<sup>+</sup>/(Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>) étant insensible à la lumière, les ions Ca<sup>2+</sup> continuent d'être expulsés hors du bâtonnet.

Enfin, on a pu mesurer une libération d'ions Ca²+ par les disques, mais qui reste très limitée. Il s'agit vraisemblablement d'une diffusion passive d'ions hors de l'espace intradiscal, dans le cytosol du bâtonnet, liée à des modifications de conformation de la rhodopsine au cours de sa photoisomérisation.

Ainsi, tout concourt à une chute de la concentration intracellulaire en ions  $Ca^{2+}$  à l'intérieur de la cellule ; des mesures spécifiques montrent que le passage de l'obscurité à la lumière correspond à une chute du  $Ca^{2+}$  intracellulaire de  $10^{-6}$  M à  $10^{-10}$  M.

L'excitation du bâtonnet par la lumière se traduit donc par une chute du Ca²+ intracellulaire due, pour l'essentiel, à l'arrêt du courant d'obscurité. Cette chute du Ca²+ a des conséquences fonctionnelles majeures. Elles ne peuvent se décrire qu'en tenant compte de l'état de cet ion dans la celule:

- une très faible quantité environ 300 nM est libre [Ca<sup>2+</sup>,] dans le cytosol;
- la plus grande partie est liée (environ 125 μM) :
- à la récovérine (90  $\mu$ M) qui est un activateur de la guanylate-cyclase (Gc) responsable de la cyclisation du GTP en GMPc (fig. 4) ;

 à l'arrestine (27 μM) qui fixe la rhodopsine phosphorylée pour désactiver totalement le photopigment;

- à la calmoduline à raison d'environ 8  $\mu M$ , cette dernière forme n'interférant pas directement avec la fonction propre du bâtonnet.

On comprend alors que, par l'intermédiaire de la récovérine et donc de la guanylate-cyclase, les ions Ca<sup>2+</sup> disponibles dans la cellule régulent la formation du GMPc (fig. 4). Il s'agit là d'un niveau d'intervention essentiel du Ca<sup>2+</sup> qui explique la propriété que le bâtonnet possède de s'adapter à la lumière [5; 6].

Dans la cellule photoréceptrice, ce phénomène d'adaptation à la lumière se traduit en termes d'amplitude et de cinétique de la photoréponse. En enregistrant, au niveau d'un seul bâtonnet, l'intensité du photocourant, en réponse à des stimulations lumineuses variables, on constate :

- que les intensités sont maximales à l'obscurité :
- qu'elles décroissent régulièrement lorsque le niveau d'éclairement ambiant augmente ;
- que la durée de la photoréponse est d'autant plus courte que la cellule est adaptée à la lumière.

En d'autres termes, le photorécepteur régule son niveau de sensibilité en fonction de la lumière ambiante. Cette régulation porte à la fois sur l'amplitude et la durée de la réponse, son but étant de préserver la fonction du bâtonnet afin qu'il reste fonctionnel même en adaptation totale à la lumière.

Des expériences récentes, utilisant des chélateurs du calcium, ont établi que ces modifications de la photoréponse disparaissent si les ions Ca²+ sont bloqués.

Ainsi, les ions  $Ca^{2+}$  apparaissent bien comme les messagers de l'adaptation [8 ; 17].

Le bâtonnet utilise donc deux messagers pour assurer sa fonction : le GMPc et les ions Ca2+. Leurs cycles sont en fait liés. L'entrée des ions Ca2+ correspond au courant d'obscurité (fig. 5) alors que leur sortie est due au contre-transport (Na+/[Ca2+, K+]). La cyclisation du GMP est le fait d'une guanylate-cyclase activée par la récovérine. Cette protéine activatrice n'est fonctionnelle que débarrassée des ions Ca<sup>2+</sup> qui l'entourent. C'est donc par son intermédiaire, exclusivement, que les cycles des deux messagers (Ca2+ et GMPc) sont en relation : c'est grâce à la récovérine que les ions Ca2+ règlent la synthèse du GMPc dans la cellule [16].

En fait, la régulation de la concentration en GMPc à la lumière est le résultat d'une boucle de rétrocontrôle exercée par les ions Ca2+ (fig. 6). La lumière, en fermant les canaux sodiques de la membrane du bâtonnet, entraîne une diminution du Ca<sup>2+</sup> intracellulaire. La récovérine devient fonctionnelle, activant la guanylate-cyclase. Celle-ci est responsable de la synthèse du GMPc dont la libération permet l'ouverture des canaux ioniques membranaires GMPc dépendants et donc l'entrée des ions Ca<sup>2+</sup> qui freinent la guanylate-cyclase en inhibant la récovérine.

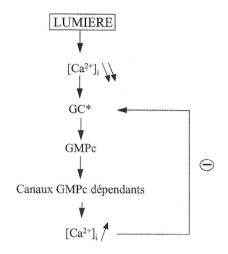


Figure 6 : Boucle de rétrocontrôle des ions calcium (Ca²+) sur la guanylate-cyclase (Gc) mettant en jeu la récovérine. GMPc : acide guanylique cyclique ; i : intracellulaire. (d'après Doly M Encycl. Méd.Chir. (Elsevier - Paris), Ophtalmologie, 21-026K-10, 1997).

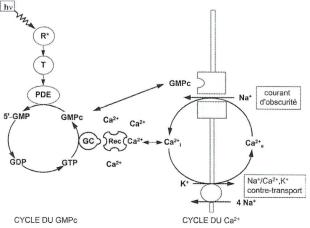


Figure 5 : Connexion par l'intermédiaire de la récovérine (Rec) entre le cycle du GMPc et celui des ions calcium (Ca2+) dans le segment externe d'un bâtonnet Na+ ion sodium ; K+ ion potassium ; hv : lumière ; R\* : rhodopsine activée; T : transducine; PDE: phosphodiestérase ; GDP : acide guanosine diphosphorique ; GTP acide guanosine triphosphorique: Gc : guanylate cyclase ; Ca2+i : calcium intracellulaire ; Ca2+ e : calcium extracellulaire. (d'après Doly M Encycl. Méd. Chir. (Elsevier - Paris). Ophtalmologie. 21-026K-10,

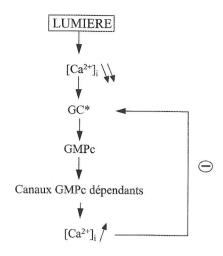


Figure 6: Boucle de rétrocontrôle des ions calcium (Ca<sup>2+</sup>) sur la guanylate-cyclase (Gc) mettant en jeu la récovérine. GMPc: acide guanylique cyclique; i: intracellulaire. (d'après Doly M Encycl. Méd.Chir. (Elsevier - Paris), Ophtalmologie, 21-026K-10, 1997).

Si on analyse, dans ces conditions, le contenu en GMPc du bâtonnet à la lumière, on constate qu'il est le résultat d'un équilibre entre deux séries de réactions initiées par la lumière (fig. 7):

- la lumière photoisomérise la rhodopsine (Rh) qui, via la transducine, active une phosphodiestérase (PDE) responsable de l'hydrolyse du GMPc: le taux de disparition est estimé à 0.30 mM/s;

- la lumière, en diminuant le Ca²+ intracellulaire, active, *via* la récovérine, une guanylate-cyclase (GC) responsable de la synthèse de GMPc: le taux d'apparition étant estimé à 0,23 mM/s.

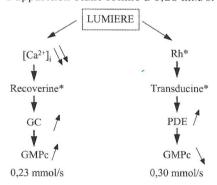


Figure 7 : Equilibre entre la synthèse de GMPc à la lumière liée à la chute des ions calcium (Ca²\*) et la disparition du GMPc liée à la photo-isomérisation de la rhodopsine. i : intracellulaire ; Gc guanylate cyclase ; Rh\* : rhodopsine activée ; PDE : phosphodiestérase. (d'après Doly M Encycl. Méd. Chir. (Elsevier - Paris), Ophtalmologie, 21-026K-10, 1997).

Donc, la concentration en GMPc du bâtonnet à la lumière est pratiquement stationnaire. Ce fait est dû aux ions Ca²+ qui adaptent ainsi la sensibilité de la cellule. Le retour à l'obscurité détruit brutalement cet équilibre au profit de la synthèse du GMPc.

Ainsi, à l'obscurité, le bâtonnet, très riche en messager, est particulièrement sensible aux photons lumineux alors qu'en ambiance photopique, il conserve une partie de la sensibilité à la lumière grâce à un équilibre, entièrement modulé par les ions Ca<sup>2+</sup>.

#### IV. LES ÉVÉNEMENTS ÉLECTROPHYSIO-LOGIQUES [4;10;11]

Parfaitement bien étudiée par Hagins au début des années 1970, la description de la réponse électrophysiologique spécifique du bâtonnet correspond au point de départ de toute une série de travaux qui, en une quinzaine d'années, devaient aboutir à la compréhension du fonctionnement de la cellule visuelle.

A l'obscurité, la membrane plasmique du segment externe du bâtonnet est peu polarisée : son potentiel de repos est de l'ordre de - 30 mV. Cette membrane est riche en canaux sodium et c'est principalement à son niveau qu'à lieu l'entrée des ions Na+ dans la cellule. A l'obscurité, il existe en permanence un flux d'ions Na+ entrant au niveau du segment externe et sortant au niveau du segment interne : c'est le courant d'obscurité (ou "dark current"). A l'aide d'un système ingénieux à 3 micro-électrodes, W. Hagins a suivi la modification de ce flux ionique au cours de l'excitation de la cellule. Il mesure, à la lumière, un courant sortant du segment externe et entrant au niveau du segment interne : c'est le photocourant (fig. 8).

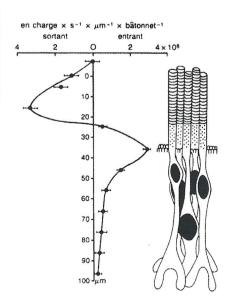


Figure 8 : Distribution spatiale du photocourant le long d'un bâtonnet (d'après Hagins W.A., 1979).

Ici, ce sont encore les ions Na<sup>+</sup> qui sont à l'origine du photocourant. Plus précisément, Hagins démontre que le photocourant correspond à une brusque chute de la perméabilité au Na<sup>+</sup> de la membrane du segment externe. Le potentiel de membrane atteint environ la valeur de -60 mV (fig. 9).

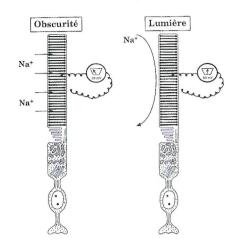


Figure 9 : Représentation du courant d'obscurité et du photocourant au cours de la transduction visuelle.

Ce fait est tout à fait remarquable et sensible. En effet, dans la plupart des cas, les cellules nerveuses excitables de l'organisme (le neurone par exemple) répondent à la stimulation par une dépolarisation membranaire, liée à une augmentation de perméabilité ionique ; c'est la raison pour laquelle certains auteurs ont suggéré, il y a une quinzaine d'années, que l'état de repos de la cellule photoréceptrice était l'éclairement et que sa stimulation correspondait au passage à l'obscurité. Par ailleurs, la sensibilité de la réponse électrique du bâtonnet est telle qu'un seul photon peut provoquer une variation du courant Na+ de l'ordre de 10<sup>-12</sup> ampères ce qui correspond à une réduction de courant transmembranaire du segment externe d'environ 106 à 107 charges par seconde. Ces valeurs sont proches des gains maximum atteints avec des photomultiplicateurs classiques.

Cette hyperpolarisation membranaire constitue la première réponse électrique de la cellule à l'excitation lumineuse. Localisée, initialement, au segment externe, elle se transmet par la suite le long du bâtonnet et constitue le potentiel tardif de récepteur ("late receptor potential") [7; 15; 22; 25].

La compréhension des mécanismes de la transduction visuelle est un des apports majeurs des années 1970-1980 en neurophysiologie. Le cheminement des concepts qui a abouti à la description globale du phénomène est tout à fait exemplaire. Il a fallu vaincre certaines idées reçues et revoir radicalement l'interprétation de nombreux résultats expérimentaux.

La rétine constitue un tissu neurosensoriel original. Tout d'abord au niveau du codage de l'information. Un stimulus purement physique, un flux de photons, caractérisés par leur longueur d'onde, est capable de donner naissance à des potentiels d'action dont la fréquence code pour l'intensité du flux initial. De plus, le fonctionnement de la rétine est, lui-même, original. Il associe des événements photochimiques tout à fait spécifiques à une succession d'activations enzymatiques amplifiant l'information initiale et enfin à des événements électrophysiologiques à l'origine de la mise en forme du message.

Les différentes étapes de la phototransduction ont d'ailleurs permis de comprendre d'autres phénomènes biologiques beaucoup plus généraux tel que la transduction hormonale.

# • • • • • BIBLIOGRAPHIE

- [1] CHABRE M. -Trigger and amplification mechanisms in visual phototransduction. *Annu Rev Chem.*, 1985, 14, 331-360.
- [2] CHABRE M. From the photon to the neuronal signal. *Europhys News*, 1985, 16, 1-4.
- [3] DAW N. W., BRUNKEN W. J., JENSEN R. J. The neurobiology of the inner retina. *In*: OSBORNE N, WEIBER R. Springer-Verlag, Paris, 1989, 363-374.
- [4] DAW N. W., JENSEN R. J., BRUNKEN W. J. Rod pathways in mammalian retina. *Trends Neurosci.*, 1990, 13(3), 110-115.
- [5] DIZHOOR A.M., RAY S., KUMAR S. et al. Recoverin: a calcium sensitive activator of retinal rod guanylate cyclase. *Science*, 1991, 915-918.
- [6] FAIN G. L., MATTHEWS H. R. Calcium and the mecanism of light adaptation in vertebrate photoreceptors. *Trends Neurosci*, 1990, 13, 378-384.
- [7] FALK G. The transmission ofrod signals to horizontal and bipolar cells. In: Neurocircuitry of the retina, GALLEGO A, GOURAS P. Elsevier, NewYork, Amsterdam, Oxford, 1985, 34-50.
- [8] FATT P. Decline of the calcium hypothesis of visual transduction. *Nature*, 1979, 280, 355-356.
- [9] FUNG B. K. K. Transducin: structure, function and mole in phototransduction. *In: Progress in retinal research*, OSBORNE N., CHADER G.J. Pergamon Press, Oxford, New York, Toronto, Sydney, Frankfurt, 1987, 151-177.

- [10] HAGINS W. A., PENN R. D., YOSHIKAMI S. - Dark current and photocurrent in retinal rods. *Biophys J.*, 1970, 10, 380-412.
- [11] HAGINS W. A. The visual process: excitatory mechanisms in the primary receptor cells. *Annu Rev Biophys Bioeng*, 1972, 131-158.
- [12] HARGRAVE P. A. Rhodopsin chemistry, structure and topography. In: Progress in retinal research 1. OSBORNE N., CHADER G.J. Pergamon Press, Oxford-New York, Toronto Sydney, Frankfurt, 1982, 1-51.
- [13] HURLEY J. B. Molecular properties of the cGMP cascade of vertebrate photoreceptors. *Annu Rev Physiol.*, 1987, 49, 793-812.
- [14] IMBERT M. Le codage rétinien de l'information visuelle. In Physiologie, pathologie et génétique oculaires 2. CHRISTEN Y, DOLY M, DROY-LEFAIX M.T. Springer-Verlag, Paris, Berlin, Heidelberg, New York, Londres, Tokyo, Hong Kong, 1991, XIII-XXVI.
- [15] JENSEN J. R., DAW N.W. Effects of dopaminergic agents on the activity of ganglion cells in the rabbit retina. *In Dopaminergic mechanisms in vision*, BODIS-WOLLNER, PICOLINO M, Alan R., Liss I., New York, 1988, 31-40.
- [16] KAUPP U. B., KOCH K-W. Role of cGMP and Ca<sup>2+</sup> in vertebrate photoreceptor excitation and adaptation. *Annu Rev Physiol.*, 1992, 54, 153-175.
- [17] KOCH K W. Biochemical mechanism of light adaptation in vertebrate photoreceptors. *Trends*

- Biochem Sci., 1992, 17, 307-311.
- [18] LAMB T. D. Transduction in vertebrate photoreceptors: the moles of cyclic GMP and calcium. *Trends Neurosci.*, 1986, 9, 224-229.
- [19] MASLAND R. L'architecture fonctionnelle de la rétine. *Pour la Science*, 1987, 112:94-104.
- [20] MILLER W. H. Molecular mechanisms of photoreceptor transduction. In: Current topics in membranes and transport 15, BRONNER F., KLEINZELLER A. Academic Press, New York, London, Sydney, San Francisco, 1981.
- [21] NAKATANI K, YAU K. W. Calcium and light adaptation in retinal rods and cones. *Nature*, 1988, 334, 69-71.
- [22] OSBORNE N. N., BARNETT N. L., GHAZI H., CALAS A., MAITRE M. -The neurobiology of the inner retina. In: OSBORNE N., WEILER R. Springer Verlag, Paris, 1989, 27-40.
- [23] SCHNAPF J. L., BAYLOR D. A. -How photoreceptor cells respond to light. *Sci Am.*, 1987, 256, 40-47.
- [24] STEIN P.J., RASENICK M. M., BITENSKY M. W. Biochemistry of the cyclic nucleotide-related enzymes in rod photoreceptors. *In: Progress m retinal research 1*, OSBORNE N.N., CHADER G.J. Pergamon Press, Oxford, New York, Toronto, Sydney, Frankfurt, 1982, 227-243.
- [25] STERLING P., FREED M., SMITH R. G. - Microcircuitry and functional architecture of the cat retina. *Trends Neurosci.*, 1986, 9, 186-192.

# Un point de vue sur les besoins et les approvisionnements en énergie à l'horizon 2050

# Par Pierre-René Bauquis

Président de l'Association Française des Techniciens et Professionnels du Pétrole (1999-2000) Vice-Président de l'Institut Français de l'Energie Chargé de mission auprès du président de TotalFinaElf

Bien qu'il existe des scénarios multiples et contrastés, la majorité des prévisionnistes nous indiquent que la consommation d'énergie primaire commerciale devrait environ doubler d'ici 2030, passant de 9 à 18 Gtep et environ tripler d'ici 2050, passant à 25 ou 30 Gtep. Selon ces études les énergies fossiles ne devraient plus représenter en 2050 qu'au mieux les deux tiers de ces consommations contre 85 % actuellement.

L'objet de cet article est de "revisiter" les hypothèses sous jacentes à cette vision de notre avenir sur le prochain demi-siècle et de proposer un point de vue sur le bilan énergétique de la planète en 2050. Ceci peut paraître illusoire, dans la mesure ou -par exemplenous ignorons quel pourrait être l'impact des ruptures technologiques éventuelles au-delà de 2010 ou de 2020, et l'impact des possibles ruptures économiques ou démographiques. Nous ignorons également -et c'est probablement le plus importantsi nous allons vers une humanité où les comportements rationnels finiront par déterminer les choix fondamentaux de société ou si l'irrationnel, sous toutes ses formes, gardera une très large place. Cela, nous ne le savons pas, mais l'avenir des énergies en dépend très largement : ce qui importe n'est en effet pas la réalité telle que définie par les scientifiques, mais ce que percoivent et ce que veulent les hommes. C'est là le cœur même de la démocratie et pour l'avenir des énergies c'est un facteur clef : toute la problématique du "développement soutenable" et les débats relatifs aux problèmes d'environnement en dépendent. L'acceptation ou non des risques liés à l'effet de serre, de ceux liés au nucléaire, de ceux liés aux transports individuels, détermineront la structure de nos consommations énergétiques dans un demi-siècle. De même l'acceptation ou non des risques liés aux modifications génétiques détermineront à ce même horizon les réponses qui seront apportées à la question de la "concurrence pour la terre" entre biomasses alimentaires et biomasses énergétiques.

La multitude des questions est telle que nous nous contenterons ici de quelques coups de projecteurs sur un petit nombre de questions clefs : la croissance économique, l'avenir démographique, la question des ressources et des réserves de carbone fossile (pétrole, gaz et charbon), la question de l'avenir des énergies renouvelables et de celui des énergies nucléaires. Nous proposerons en conclusion un "bilan énergétique 2050" qui n'a aucunement la prétention d'être plus exact que tous ceux qui existent déjà mais qui constituera la synthèse de nos réflexions.

#### LA CROISSANCE ÉCONOMIQUE

On a observé ces vingt dernières années un début de découplage entre croissance économique (mesurée par la croissance des PNB) et consommations énergétiques. Ce phénomène est lié d'une part à la dématérialisation des PNB et d'autre part aux économies

d'énergies, c'est-à-dire à l'efficacité énergétique toujours croissante des processus industriels et à l'amélioration de l'efficacité énergétique des consommations liées au chauffage ou la climatisation, à l'éclairage, à l'usage des appareils électroménagers ou des moyens de transports (automobiles, avions, etc.). Il existe cependant un facteur, venant jouer en sens inverse, qui résulte du fait que les augmentations de PNB se traduisent par une demande plus que proportionnelle des besoins ou désirs de transports ou des besoins ou désirs de confort. Ceci est vrai en particulier dans les économies émergentes dont les populations aspirent massivement à un mode de vie et de consommation qui est celui des pays les plus riches. Or ce sont précisément ces économies qui devraient représenter l'essentiel de la croissance économique et démographique du demi-siècle à venir.

Les résistances idéologiques qui pourraient se mettre en travers de ces aspirations (ultra-écologisme, nouvelles éthiques, relectures des grandes religions) ne paraissent pas aujourd'hui capables de modifier sensiblement ces aspirations véhiculées par une mondialisation des communications; mais qu'en sera-t-il au-delà de 2020?

Personne aujourd'hui ne peut le savoir, et c'est bien là une des difficultés majeures des prévisions à long terme : nous savons extrapoler des tendances par des modélisations plus ou moins élaborées, mais il est dans la nature même des ruptures comportementales de ne pas être modélisables.

#### L'AVENIR DÉMOGRAPHIQUE

Il n'est pas besoin de disposer de savantes études démographiques pour se souvenir qu'il y a cinquante ans Italiennes et Espagnoles avaient deux ou trois fois plus d'enfants que les Allemandes ou les Suédoises, alors qu'aujourd'hui les filles des mêmes Italiennes ou Espagnoles donnent naissance à encore moins d'enfants que leurs cousines allemandes ou suédoises. En l'absence de mouvements migratoires, elles n'assurent plus le renouvellement des générations.

Ces mêmes phénomènes de rupture dans les comportements en matière de natalité sont apparus plus récemment sur le reste du pourtour méditerranéen, en Tunisie, au Maroc, en Turquie. en Egypte et plus récemment encore mais très vigoureusement en Algérie. On ne voit pas pourquoi ces phénomènes n'iraient pas en s'amplifiant dans les années à venir et ne s'étendraient pas aux autres zones à fortes natalités. La question clef en matière de démographie se résume dans le concept un peu mystérieux du "désir d'enfants", phénomène très fortement culturel et donc rapidement variable à une époque où les schémas culturels évoluent eux-mêmes très vite, ceci même lorsque les schémas religieux restent peu modifiés. Ces schémas culturels sont très largement affaire de médias et sont en particulier liés à la mondialisation de la télévision qui projette déjà dans tous les villages de la planète un modèle d'idéal familial de type nord-américain ou européen.

Dans les vingt ou trente années à venir la diffusion d'Internet dans ces mêmes villages viendra encore renforcer la mondialisation des schémas culturels : grâce à l'énergie solaire photovoltaïque on peut parier que la majorité des tentes touarègues ou yourtes mongoles seront équipées dès avant 2020 de télévisions, de téléphones portables, et d'accès aux réseaux mondiaux d'information.

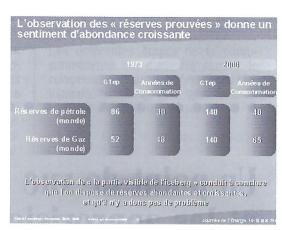
La question démographique étant au cœur de la problématique des besoins à long terme en matière énergétique, nous risquerons une sorte de pari, venant refléter l'impact possible des remarques cidessus : en 2050 la population mondiale sera plus probablement de l'ordre de 8 milliards d'habitants (± 2 milliards) que de 10 milliards (± 1 milliard) généralement envisagés.

#### LA QUESTION DES RESSOURCES ET DES RÉSERVES DE CARBONE FOSSILE

Cette question est une des plus controversées au sein des industries énergétiques: pessimistes et optimistes s'affrontent sur ce thème depuis plus de cinquante ans(1). On trouve en effet dès le début des années 1930 des articles sur l'épuisement prochain des réserves pétrolières, mais on trouve aussi en 1999 des articles tout aussi sérieux pour expliquer que ceci est un "faux problème" et qu'étudier l'épuisement des réserves n'a pas vraiment de sens. En effet, la raréfaction des réserves est par définition autocorrectrice, par le biais des hausses de prix engendrant tant la création de nouvelles réserves à partir d'un stock donné de ressources que la réduction de la demande.

• La question des réserves (quantités que l'on peut produire techniquement et économiquement) de carbone fossile, sous ses formes solides (charbon), liquide (pétrole) ou gazeux (gaz naturel) n'est pas un faux problème, mais un problème réel. Les ressources (quantités totales existantes en terre, qu'elles soient ou non économiquement productibles) constituent des stocks finis d'énergie solaire concentrée (biomasses fossiles) qu'on ne sait pas mesurer avec précision, en particulier en ce qui concerne les formes solides (charbon, lignite, schistes bitumineux, hydrates de gaz).

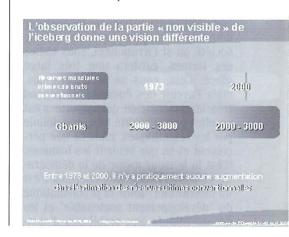
> • En revanche pour les formes liquides (pétroles) gazeuses les incertitudes sont nettement moins grandes et les "stocks en terre", ou ressources, sont probablement aujourd'hui estimables avec une meilleure précision, disons à plus ou moins 30 % près pour le pétrole et plus ou moins 50 % pour les gaz sous forme gazeuse (mais pas sous la forme solide que constituent les hydrates).



• Dans le cas des pétroles et des gaz dits conventionnels le processus de raréfaction progressive de la découverte de nouveaux gisements a été pratiquement occulté par trois phénomènes : l'ouverture de nouveaux territoires aux investissements internationaux dans le domaine de l'exploration et de la mise en production, la transformation progressive de ressources non conventionnelles en réserves conventionnelles (offshores profonds, ultra lourds, etc.). et surtout la réévaluation importante des réserves des gisements déjà découverts. Ce dernier phénomène a masqué deux faits : d'une part les visions en matière de réserves ultimes récupérables n'ont pratiquement pas changé au cours des 30 dernières années pour les pétroles dits conventionnels, d'autre part l'exploration ne renouvelait plus les volumes consommés.

Ces phénomènes de réévaluation ont eux-mêmes deux origines inextricablement liées : la sous-évaluation des volumes en place (ressources) au moment de leur découverte, et l'amélioration au cours du temps des taux de récupération espérés grâce à l'évolution technologique.

Au total les phénomènes rappelés cidessus expliquent pourquoi il se sera écoulé quelques trente années aux USA entre le moment où les nouvelles découvertes n'arrivaient plus à compenser l'augmentation des consommations (fin des années 30) et le début de la baisse des productions (début des années 70). Il paraît logique de penser que le même phénomène se reproduira à l'échelle de la planète.



• En se plaçant dans une optique de long terme, c'est à dire à l'horizon 2050, la distinction fine des ressources selon leurs catégories physiques (solides, liquides, gaz) n'a qu'un intérêt relatif puisqu'il existe des ponts technologiques permettant de transformer des ressources d'une catégorie en production d'une autre catégorie. En effet, on peut gazéifier du charbon ou des résidus pétroliers. et on peut produire des hydrocarbures liquides à partir de gaz (par exemple par conversion en produits pétroliers par des procédés type Fisher Tropsch, ou procédés de production d'oléfines à partir de méthanol, ou même homologation directe du méthane en essences). On a donc un "continuum" de ressources de carbone fossile d'où on pourra extraire une part plus ou moins grande de productions sous la forme que l'on désire pour alimenter les divers marchés, et ceci en fonction des paramètres techniques et économiques qui prévaudront en 2050. Parmi ces paramètres économiques, les contraintes liées à la préservation de notre environnement joueront un rôle majeur, et ceci bien avant 2050. Par exemple si d'ici 2010 ou 2020 apparaît un consensus sur la gravité de l'effet de serre, il faudra -sous une forme ou sous une autre (taxation, permis négociables, etc.)- que se concrétise un "coût" lié à l'émission de carbone dans l'atmosphère, afin que le marché assure une régulation rationnelle de ces émissions. L'apparition d'un coût lié à l'émission de carbone dans l'atmosphère, aujourd'hui jugée comme probable, viendrait handicaper légèrement la gazéification du charbon mais surtout handicaper massivement la "conversion" du gaz en liquides, que ce gaz soit naturel... ou résultant lui-même de processus de gazéification de solides (charbons, goudrons, biomasses, etc.). A l'inverse, ce coût d'émission du carbone viendrait, selon nombre d'auteurs. favoriser l'émergence d'une économie énergétique faisant une large place à l'hydrogène, ce qui suppose que nous sachions maîtriser à des coûts pas trop élevés la réinjection du gaz carbonique.

• En ce qui concerne le passage des ressources aux réserves nous insisterons sur le facteur qui nous paraît être le plus important, celui de la différence entre pétrole et gaz. En matière de pétrole les taux de récupération "naturels" ou primaires sont assez faibles en particulier pour les pétroles lourds : ils sont en fait nettement inférieurs à 30 % aujourd'hui, en moyenne, (toutes qualités confondues). Ils peuvent donc être

fortement améliorés dans l'avenir par la technologie, et ceci d'autant plus qu'il s'agira de ressources à forte densité ou à forte viscosité. Il n'en est pas de même en matière de gaz, produit pour lequel cette problématique qualitative n'existe pratiquement pas et pour lequel les taux de récupération "naturels" sont élevés, de l'ordre de 70 à 80 %, sauf cas marginaux de réservoirs de qualité très médiocre.

Il résulte de ces caractéristiques que dans une optique long terme, type 2050, on tend à sous-estimer les réserves pétrolières en sous-estimant la "création de nouvelles réserves" par amélioration des taux de récupération, en particulier pour les qualités les plus lourdes, comme l'illustre le début de la mise en valeur des bruts ultra-lourds ou bitumes de la ceinture de l'Orénoque au Venezuela.

Il en résulte aussi qu'on risque de faire l'erreur inverse concernant les réserves gazières : la technologie ne peut dans ce cas créer de nouvelles réserves par amélioration des taux de récupération, sauf de façon marginale (fracturation et drains horizontaux par exemple dans des réservoirs très peu perméables).

Dans le cas du gaz l'exploration étant moins avancée que pour le pétrole, les découvertes de nouveaux champs font que les statistiques de réserves continuent de croître, et elles pourront encore le faire pendant quelques années, peut être dix ou vingt. En revanche lorsque les consommations deviendront supérieures aux nouvelles réserves apportées par l'exploration, le déclin des réserves sera rapide et inexorable, sans que le progrès technologique ni la hausse des prix liée à la raréfaction n'y puissent rien faire ou presque.

Nous ajouterons quelques mots sur les formes solides du pétrole et du gaz, "réserves de demain" selon nombre d'auteurs. Il s'agit donc de savoir si, à l'horizon 2050 les schistes bitumineux ou les hydrates de gaz pourraient à cet horizon être transformés en réserves pétrolières ou gazières, pour les volumes importants. Nous avons de façon un peu conventionnelle choisi de faire figurer les seuls schistes bitumineux parmi les formes de carbone "solide" et non les sables bitumineux et pétroles ultra-lourds, même lorsque ceux-ci sont à l'état pâteux ou carrément "figé" du fait des conditions de températures dans les gisements (cas des sables de l'Athabasca au Canada). Cette distinction nous paraît justifiée au moins sur le plan pédagogique, car la différence entre sables

bitumineux et schistes bitumineux est importante. Les premiers sont de véritables pétroles bruts, ayant migré, qui se sont "alourdis" par oxydation ou biodégradation alors que les seconds sont en fait du kérogène ou si l'on veut des "roches mères" n'ayant pas achevé la transformation de leur matière organique en pétrole, et donc pour lesquelles les processus d'expulsion et de migration n'ont pas pu prendre place.

Quant à la contribution des schistes et des hydrates aux réserves à l'horizon 2050, nous pensons qu'à cette date ces deux ressources seront probablement encore les "réserves de demain".

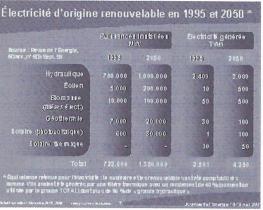
#### L'AVENIR DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

La fin du XX<sup>e</sup> siècle aura été la période de redécouverte de ces énergies ancestrales grâce à de nouvelles technologies de mise en œuvre, et nous sommes encore dans la phase initiale de ce phénomène. Le fait de se situer en ce moment dans une telle phase est peu propice à une bonne évaluation du potentiel de ces énergies au cours du demi-siècle à venir.

En effet dans la phase actuelle de redécollage de ces énergies on peut observer des taux de croissance très élevés, de 20 ou même 30 % par an, sur certaines filières tels le solaire photovoltaïque, l'énergie éolienne ou les biocarburants. La tentation est grande d'extrapoler sur une longue période des tendances récentes sur courte période en oubliant la fragilité de telles extrapolations.

Parmi les questions que pose l'avenir des énergies renouvelables, une des plus importantes est celle des types d'aides qu'il convient de mettre en œuvre pour accélérer leur développement. Tout d'abord en matière de recherches technologiques il convient de ne pas oublier que chaque domaine des connaissances progresse en fonction de sa logique propre, à un moment donné.

Les énergies renouvelables aujourd'hui requièrent des efforts de recherches, mais ces efforts pour être efficaces doivent relever d'une logique très décentralisée et irriguer une multitude de petites équipes. Il ne s'agit donc pas, si on veut être efficace, de crédits massifs venant se déverser sur ce secteur : ce ne sont pas les laboratoires de recherche, ni les entreprises qu'il convient de subventionner, mais pour un temps le prix des énergies qu'elles fourniront sur les marchés. On est là dans une logique presque aux antipodes de celle de la recherche nécessaire au développement des énergies nucléaires qui, elles, nécessitent le recours à des dépenses massives et fortement centralisées en matière de recherches et de développement.



En ce qui concerne les énergies renouvelables la bonne approche est celle des "certificats verts" ou autres méthodes analogues permettant d'ajouter une prime à la valeur de l'électricité produite par les filières renouvelables ou seulement certaines de ces filières si l'on veut cibler fortement ces mécanismes d'aide. Nous ne passerons pas en revue les diverses filières des énergies renouvelables, et présenterons directement nos propres conclusions.

Celles-ci sont résumées sous forme de deux tableaux de synthèse relatifs au bilan des énergies renouvelables qui seraient converties en électricité à l'horizon 2050 et comparant celui-ci au dernier bilan cohérent, relatif à l'année 1995. En première approche ce bilan devrait recouvrir environ les 4/5 des énergies renouvelables consommées à l'horizon 2050.

La conclusion à tirer des deux tableaux ci-dessus est qu'à l'horizon 2050 les énergies renouvelables —hors grande hydraulique- n'auraient qu'un rôle d'appoint en matière de bouclage des bilans énergétiques. Même avec un effort important force est de constater qu'entre 1995 et l'an 2050 la part des énergies renouvelables dans les bilans électriques devrait décroître... et non pas croître sensiblement comme beaucoup le pensent.

Ceci ne signifie pas qu'il ne faille pas s'y intéresser, bien au contraire, mais il ne faut pas pour autant penser que ces énergies offrent une alternative crédible à l'autre famille d'énergies non fossiles que constituent les énergies nucléaires. Il existe cependant une possibilité de croissance nettement plus forte des énergies renouvelables que ce que nous avons envisagé ici, qui serait celle d'une percée technologique des modifications génétiques venant bouleverser les perspectives en matière de biomasses. A fortiori la mise au point de la synthèse chlorophyllienne pourrait, elle aussi, avoir un impact majeur.

Electricité d'origine renouvelable en 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère con municipal de la 1995 et 2050 \*

Bortinitégenère

#### L'AVENIR DES ÉNERGIES NUCLÉAIRES

Nous utiliserons ici tout à la fois le singulier et le pluriel mais la conclusion de ce paragraphe indiquera pourquoi nous avons choisi une formulation plurielle dans notre titre. Tout d'abord rappelons le bilan de cette énergie à ce jour : elle assure 18 % de la production électrique mondiale, soit 6 % de la consommation énergétique.

Globalement, le parc mondial actuel de centrales nucléaires est de type relativement homogène, puisqu'il s'agit pour la quasi totalité de centrales à fission "classiques", non surgénératrices, avec des variantes de filières dans lesquelles nous n'entrerons pas sauf pour rappeler le poids très dominant de l'une d'entre elles, celle des centrales à eau pressurisée (PWR). Ces centrales utilisent des cycles à uranium enrichi et des combustibles soit classigues à 3,5 % d'uranium 235 soit de type MOX incorporant du plutonium. Elles sont d'un très bon niveau de fiabilité. Cette industrie n'a connu qu'un seul accident majeur au niveau mondial : celui de la Centrale de Tchernobyl, que les hommes du nucléaire qualifient "d'accident soviétique" et non "d'accident nucléaire". Cependant par cette formule ils mettent en évidence le possible talon d'Achille des centrales nucléaires en matière de fiabilité : ce n'est pas d'une défaillance technique que pourrait provenir un risque majeur, mais plutôt de conditions humaines ou politiques aberrantes (attentats, guerres civiles ou non civiles, etc.). Nous savons par contre calculer le risque de défaillance d'une centrale exploitée dans des conditions normales, risque mesuré en termes de probabilité de décès entraîné par une telle défaillance. On sait ramener ces risques proprement techniques à des niveaux inférieurs à ceux permettant à n'importe quelle autre grande activité industrielle d'opérer, sans parler de risques acceptés beaucoup plus élevés comme la consommation du tabac, l'usage de la voiture

automobile ou la profession de plombier-zingueur.

Une autre objection classique faite au nucléaire est relative aux inconnues des fins de cycles : que faire des combustibles irradiés, - retraités ou pas -, stockage des déchets, démantèlement des centrales et autres installations nucléaires après leur fin de vie. Sur ces questions, il y a clairement un défaut de communication de l'industrie nucléaire qui sait déjà ou

saura résoudre ces problèmes soit en ayant recours à des techniques déjà au point, soit dont on est raisonnablement certains qu'elles pourront l'être dans des délais satisfaisants, et à des coûts tels qu'ils ne remettent pas en cause les ordres de grandeur des prix de revient du kWh nucléaire.

La troisième grande question est celle des réserves en combustibles fossiles, c'est à dire avec les cycles actuels, celle des réserves en uranium. Il se trouve heureusement que l'on peut abaisser très fortement la "teneur de coupure" ou richesse minimum des minerais exploités (à la limite, l'eau de mer est un minerai d'uranium), sans accroître fortement le prix de revient du kWh nucléaire, le coût du combustible entrant pour un faible pourcentage dans ce prix de revient.

Deuxièmement, si le renchérissement lié à la raréfaction des ressources devenait une contrainte, on devrait pouvoir en 15 ou 20 ans relancer la filière des surgénérateurs qui permettent de multiplier de façon très importante, (de l'ordre de 30 à 40 fois) la quantité d'électricité produite à partir d'une quantité donnée d'uranium. A ce sujet il est surprenant de voir abandonné le prototype le plus élaboré au plan mondial de cette filière, c'est à dire la Centrale Superphénix. Sachant qu'un problème de réserves d'uranium pourrait se poser vers 2050 et que par ailleurs ce type de réacteur devrait contribuer à la solution des problèmes de "fin de cycle" des combustibles nucléaires, il paraît difficile de comprendre la rationalité de cette décision. La logique et l'application "du principe de précaution" face au risque de l'effet de serre auraient voulu au contraire que cette centrale soit exploitée sur longue période et au maximum de sa capacité d'utilisation jugée "sûre" par les autorités compétentes. Ceci aurait permis de tirer sur 30 au 40 années toutes les leçons

d'une véritable utilisation industrielle : évaluation des coûts réels d'exploitation et de maintenance, problèmes de vieillissement, de fiabilité, etc. La valeur d'une telle expérience aurait largement justifié une exploitation à long terme de cette centrale, même si cette exploitation avait entraîné un coût annuel net, ce qui en marginal paraît d'ailleurs peu vraisemblable.

Enfin l'avenir du nucléaire, à long terme, ne se réduit pas aux seuls cycles déjà actuellement prouvés au plan industriel. Il y a tout d'abord le besoin de disposer d'ici 2010 ou 2020 de centrales nucléaires de petites puissances (100 à 500 MW), de grande fiabilité et faciles à opérer : la filière haute température avec refroidissement à l'hélium paraît aujourd'hui bien placée pour répondre à ces besoins. On peut par ailleurs envisager des cycles différents, qui diminueraient encore les risques de surchauffe et de fusion du cœur d'un réacteur, tel celui proposé par le prix Nobel de physique Carlo Rubia : il s'agit de réacteurs dits "à spallation" dont le fonctionnement nécessite un flux extérieur de particules et qui donc s'arrêteraient automatiquement dès que l'on sortirait d'une certaine plage de conditions opératoires. Il y a ensuite pour le très long terme la fusion : sans entrer dans les débats relatifs à la "fusion chaude" et ceux ayant trait à la "fusion froide", on peut cependant penser que ces énergies viendront probablement à leur tour sur le long terme élargir la riche palette des énergies nucléaires. Voilà pourquoi nous avons préféré la forme plurielle d'"énergies nucléaires" plutôt que de recourir au singulier dans le titre de ce paragraphe.

En résumé il paraît impossible de considérer l'énergie nucléaire comme un accident de l'histoire énergétique sans lendemain : celle-ci sera à nouveau au cœur de nos préoccupations bien avant 2050.

#### UNE VISION DU BILAN ÉNERGETIQUE MONDIAL À L'HORIZON 2050

Nous partirons de l'approche suivante : nous essaierons d'évaluer quelles pourraient être les productions des diverses énergies fossiles en 2050, compte tenu des réserves et des coûts, et par différence avec une fourchette d'évaluation des besoins d'énergie, quelles devraient être les quantités à fournir à cet horizon par les énergies non carbonées.

Voyons donc tout d'abord ce que pour-

raient être en 2050 les productions d'énergies fossiles.

En ce qui concerne le charbon, les contraintes ne sont pas liées aux "ressources" (quantités en terre) mais aux réserves d'une part (quantités économiquement exploitables en 2050) et aux problèmes de contraintes d'émission de gaz carbonique d'autre part, sans oublier les émissions de soufre, de méthane, de particules et de cendres, facteurs de pollutions non seulement locales mais également régionales et planétaires. On peut en effet retenir l'essentiel des particules émises dans de futures centrales électriques fonctionnant au charbon (en particulier si on recourt à la gazéification) mais on ne peut les retenir pour des millions de foyers domestiques. La même chose est vraie pour le soufre, et en ce qui concerne le méthane il ne faut pas oublier qu'une exploitation charbonnière est un gisement de "coal bed methane" produisant directement dans l'atmosphère.

Compte tenu des coûts très élevés de la logistique charbonnière terrestre, encore plus élevée à l'unité d'énergie transportée que celle du gaz, une bonne partie des ressources ne seront pas convertissables en réserves à l'horizon 2050, même en tenant compte du potentiel de production convertissable en électricité sur les lieux de production (avec ou sans gazéification). Par ailleurs, et c'est probablement le plus important, les renseignements dont on dispose sur les réserves de charbon laissent supposer des confusions entre réserves et ressources. Il serait temps que cette industrie s'astreigne à faire cette distinction sur des bases raisonnablement homogènes avec celles utilisées par les gaziers, qui par contre ne publient presque rien sur leurs ressources...

Du fait de ces divers facteurs et sans qu'il soit possible d'entrer ici dans une démonstration, la production mondiale de charbon et lignite pourrait passer de 4.8 Gt (soit 2.2 Gtep/an) à une fourchette de 8 à 10 Gt (soit 4 à 5 Gtep/an), à l'horizon 2050 : ceci suppose, et c'est là une hypothèse discutable, que les contraintes relatives à l'émission de  $\rm CO_2$  dans l'atmosphère n'auront pas un impact majeur. Nous faisons donc le pari que les hommes accepteront un risque "effet de serre" bien supérieur à ce qui paraî-trait aujourd'hui comme "raisonnablement acceptable".

En ce qui concerne le pétrole, nous pensons que les contraintes liées à la question des réserves commenceront à se manifester assez rapidement, disons entre 2010 et 2020. En effet, à

cet horizon, il sera devenu clair pour la majorité des observateurs que les nouvelles découvertes ne pourront plus renouveler les consommations et que la croissance des réserves et des productions repose essentiellement sur deux phénomènes : l'accroissement des réserves des gisements conventionnels déjà découverts et la transformation croissante de ressources non conventionnelles en réserves conventionnelles (essentiellement les bruts ultra lourds et les bitumes, pour 500 à 1000 milliards de barils de nouvelles réserves d'ici 2050 et les offshores profonds et ultra profonds pour 100 à 200 milliards de barils). Cette prise de conscience devrait anticiper la raréfaction physique par des effets de hausses de prix venant limiter les niveaux de production : nous pensons que la production mondiale actuelle de 3,7 Gtep pourrait au mieux augmenter d'un peu plus de 30 % pour atteindre un pic de 5 Gtep entre 2010 et 2020 avant de décliner assez rapidement vers 4.5 Gtep en 2030. En 2050 cette production d'hydrocarbures liquides devrait se trouver ramenée à un niveau proche du niveau actuel, soit quelques 3,5 Gtep, auxquelles pourraient s'ajouter des quantités relativement marginales provenant de la conversion en liquides pétroliers de gaz naturel ou de gaz de synthèse (obtenus à partir de charbon, de biomasse ou de déchets). Le scénario cidessus paraît cohérent avec ce que l'on sait aujourd'hui non seulement des réserves prouvées de pétrole mais des ressources et des réserves ultimes.

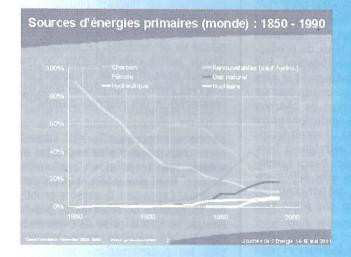
En ce qui concerne le gaz naturel. notre connaissance plus imprécise du volume en terre des "ressources ultimes" rend plus incertaines les prédictions. Cependant là aussi le problème en matière de réserves se posera lorsque se fera la prise de conscience que les découvertes ne remplacent plus les consommations. Après une impression de grande abondance en matière de réserves qui devrait durer jusque vers 2010-2020 l'acuité de la prise de conscience pourrait être plus vive encore que pour le pétrole du fait du moindre jeu de la réévaluation des réserves des gisements déjà découverts que pour le pétrole. Rappelons en effet que des deux facteurs sous jacents à ces réévaluations, c'est à dire la sous-estimation ou sous déclaration initiale et le jeu de l'amélioration des taux de récupération, seul le premier joue en pratique pour le gaz. Ceci ne veut pas dire que ce jeu soit sans importance : il a par exemple été majeur dans le cas de Groningue dont les "réserves initiales" ont triplé en 30 ans. En revanche il a été pratiquement nul pour Frigg ou pour Lacq dont les réserves réelles - bien connues

puisque les deux gisements sont désormais épuisés ou presque - sont en gros identiques aux estimations données dès les premières années de production. La première question à se poser est donc de savoir si Urengoï et les gisements de la péninsule de Yamal ou North Dome-South Pars se comporteront en matière de réserves comme Groningue ou comme Frigg...Nous pensons que dès avant 2010 la seconde hypothèse sera la bonne et que le jeu des réestimations ultérieures sera très limité. La seconde question à se poser en matière de gaz est de savoir si l'exploration à finalité gazière nous réserve dans les vingt ou trente années à venir l'équivalent dans le monde d'une dizaine de nouvelles provinces du type de celle de la Bolivie... ou une cinquantaine. Notre sentiment penche pour la première de ces hypothèses. Un autre facteur viendra limiter le "pic" des productions gazières au plan mondial, à savoir la rigidité physique des chaînes gazières et l'importance des investissements liés à ces

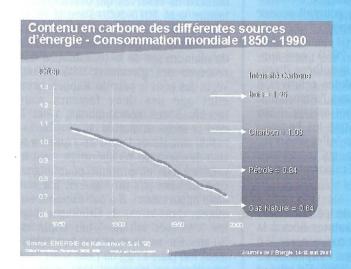
chaînes. Dans la pratique, on ne développera pas des nouveaux grands pipelines ou des nouvelles usines de liquéfaction pour des situations dans lesquelles ces infrastructures ne seraient pas correctement utilisées pour une trentaine d'années en moyenne. Le pic ou plutôt le plateau de production maximum de gaz, dont la durée pourrait être de 30 à 40 ans, devrait être atteint vers 2015-2025 et durer jusque vers 2050-2060 avant que ne s'amorce le déclin de la production mondiale de gaz. Ce déclin pourrait encore être retardé si l'exploration des tranches profondes des bassins sédimentaires réservaient d'importantes surprises ou si les évolutions technologiques permettaient à cet horizon de convertir les ressources d'hydrates en réserves : ces deux possibilités paraissent dotées d'une faible probabilité.

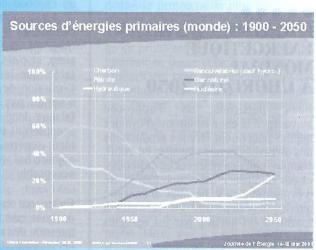
On peut chiffrer ce plateau au double ou un peu plus du double des productions mondiales actuelles, soit environ à 4,5 Gtep/an. D'après nos estimations

précédentes le panorama des productions d'énergies fossiles en 2050 pourrait donc se présenter comme suit : charbon 4,5 Gtep, Pétrole 3.5 Gtep et Gaz 4.5 Gtep, soit un total d'énergies fossiles de 12,5 Gtep. Face à ces 12,5 Gtep, la demande à satisfaire serait selon les scénarios classiquement avancés de l'ordre de 25 à 30 Ĝtep - et selon notre perspective plus modeste en particulier du fait d'hypothèses démographiques moins élevées  $(8 \text{ Ghab} \pm 2 \text{ versus } 10 \pm 1) - \text{de l'ordre}$ de 18 Gtep (soit quand même le double des 9 Gtep actuelles). Avec cette hypothèse, le déficit à combler par les énergies non carbonées serait encore considérable, de l'ordre de 5.5 Gtep. Si, comme nous l'avons estimé, les énergies renouvelables ne peuvent apporter qu'une contribution de l'ordre de 1 à 1,5 Gtep, on voit que le déficit à combler dès 2050 par les énergies nucléaires serait de l'ordre de 4 à 4,5 Gtep, donc majeur. L'ensemble de ces conclusions peut se résumer dans le tableau de synthèse ci-après.









# **ÉPILOGUE**

Nombre de problèmes importants pour l'évolution des industries énergétiques sur le court ou le moyen terme ont été délibérément écartés des thèmes évoqués ici.

Ainsi nous n'avons pas parlé des guestions de géopolitique, de la concentration géographique des réserves, des fusions et acquisitions, ni de la diversification des activités des sociétés pétrolières, gazières ou électriques. Nous n'avons pas non plus évoqué la riche problématique de la séquestration du carbone : pièges à carbone "décarbonisation" forestiers. hydrocarbures, injection du gaz carbonique dans les aquifères ou les grands fonds marins, centrales électriques à oxygène afin de ne pas diluer le gaz carbonique par l'azote de l'air. et nombre d'autres thèmes connexes.Ces thèmes, pour intéressants qu'ils soient, nous ont en effet paru relativement secondaires quant à la problématique du mix énergétique à l'horizon 2050.

Nous n'avons pas non plus évoqué la question de la compétition entre génération électrique centralisée (grands barrages, grandes centrales au charbon, au gaz, ou nucléaires) et décentralisée (énergies renouvelables, piles à combustibles, petites cogénérations, microturbines... ou même microcentrales nucléaires). Cette question ne nous semble pas non plus devoir être déterminante quant au mix énergétique à l'horizon 2050. Ce point de vue peut surprendre, mais il ne faut pas oublier que les microturbines, comme probablement les piles à combustibles fixes consommeront essentiellement du gaz naturel. De même les piles à combustibles embarquées (automobiles) seront probablement des piles à hydrogène, mais cet hydrogène sera lui-même très probablement produit à partir d'hydrocarbures. Rappelons que pour produire en pratique de l'hydrogène... il faudra produire massivement du gaz carbonique. En effet la source de cet hydrogène la plus plausible sera le reformage (ou autre conversion chimique) soit de liquides pétroliers ou dérivant du pétrole si cette conversion se fait à bord des véhicules, soit de gaz si la production d'hydrogène se fait en amont des véhicules dans les stations de distribution, soit plus en amont encore dans des centrales génératrices d'hydrogène où on pourra le produire à partir de pétrole, de gaz, de charbon ou de biomasse. Comme l'objectif sera probablement de "séguestrer" le gaz carbonique (réinjection, etc.) pour éviter de le renvoyer dans l'atmosphère, on voit l'intérêt de générer cet hydrogène "en amont" des véhicules et non à bord de ceux-ci.

Seule une véritable panique relative aux conséquences de l'effet de serre (qu'il s'agisse d'effets réels ou supposés) et des coûts très élevés de séquestration du gaz carbonique pourraient justifier un recours rapide à l'autre filière potentielle de génération d'hydrogène, c'est-à-dire un recours à la filière nucléaire. Dans un tel scénario catastrophe - au demeurant très improbable - la demande d'énergie électrique d'origine non fossile, donc essentiellement nucléaire, viendrait à exploser. On regretterait alors amèrement d'avoir perdu vingt ou trente années d'expérience du cycle des surgénérateurs.

Nous voudrions pour conclure insister sur deux points qui nous semblent essentiels quant à l'avenir des diverses énergies.

Le premier point est celui des teneurs en gaz carbonique de l'atmosphère dans les prochaines décennies et des conséquences potentielles en matière de changements climatiques. Nous avons illustré graphiquement les conséquences en matière de teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère de notre vision 2020-2050 du mix énergétique mondial : la hausse de cette teneur, déjà passée en moins de deux siècles de 280 à 360 ppm, se poursuivra pour atteindre quelques 500 ppm à l'horizon 2050 (disons 450 à 550 ppm en 2050).

Nous pensons que cela est désormais pratiquement inévitable, quelles que puissent être les politiques qui seraient mises en œuvre dans les vingt ans à venir, du fait de la grande inertie des systèmes énergétiques (rôle des "effets de parc", tant en ce qui concerne les systèmes de consommations que les systèmes de productions énergétiques). Nous ignorons largement les effets climatiques potentiels de telles teneurs en CO<sub>2</sub>, alors que celles-ci n'avaient pas dépassé 300 ppm au cours des 400.000 dernières années. pourtant riches en variations climatiques. Malgré les progrès de la modélisation climatique, il y a là une inconnue majeure. Mais, quelles que soient les conséquences, mineures, importantes ou même catastrophiques, il va falloir nous adapter.

Le second point qui nous paraît important à souligner est celui d'une complémentarité croissante à l'avenir des énergies fossiles et des énergies nucléaires. Cette complémentarité est dès aujourd'hui claire en ce qui concerne les usages respectifs de ces deux familles de ressources énergétiques. Les hydrocarbures liquides ont

en effet une triple vocation naturelle:

- une vocation de matière première (pétrochimie, chimie, solvants, etc.);
- une vocation majeure pour la fonction de mobilité (terrestre, aérienne, maritime) liée à leur très forte "compacité énergétique";
- une vocation pour l'approvisionnement des besoins énergétiques "hors réseaux" (usines isolées, fermes, plantations, etc.) mais relativement importants, liée au bas coût de transport des hydrocarbures liquides; pour les faibles demandes ce seront les énergies renouvelables et en particulier le solaire photovoltaïque qui devraient s'imposer.

Quant au nucléaire, sa vocation quasi exclusive aujourd'hui et pour les vingt ou trente ans à venir est la production d'électricité là où les besoins sont importants et suffisamment concentrés.

Si on se projette vers 2050, de nouvelles complémentarités devraient apparaître entre énergies fossiles et nucléaires. Il faudra en effet pousser toujours plus avant les taux de récupération des gisements pétroliers, en particulier de ceux contenant des bruts lourds ou ultra lourds, et peutêtre même recourir - comme au début du XX<sup>e</sup> siècle - aux schistes bitumineux. Pour réaliser ceci en émettant un minimum de CO2 on peut présager que le recours à des calories "non fossiles" sera nécessaire et que ces calories seront - d'une façon ou d'une autred'origine nucléaire. Le même raisonnement devrait s'appliquer aux procédés "Gas to liquids" (GTL) dont l'autoconsommation énergétique dans leurs variantes actuelles (35 à 45 % d'autoconsommation) rendra leur développement non économique Sİ contraintes pénalisant les émissions de CO<sub>2</sub> venaient à se développer.

Là aussi l'apport de calories nucléaires - ou directement d'hydrogène d'origine nucléaire(\*) - devrait offrir une solution élégante, assurant une longue pérennité aux hydrocarbures liquides quelles que soient les filières d'utilisations finales : moteurs à combustion interne, turbines, piles à combustibles... ou même utilisations spécifiques de simple combustion.

Une autre complémentarité entre hydrocarbures et hydrogène d'origine nucléaire devrait se développer lorsque le coût de ce dernier deviendra compétitif par rapport au coût complet (c'est-à-dire intégrant les externalités tels les coûts éventuels d'émission de  $\mathrm{CO}_2$ ) de l'hydrogène produit à partir d'énergies fossiles. Cette complémen-

tarité serait la fourniture d'hydrogène aux grands centres de raffinage et de pétrochimie, tant pour les besoins d'"upgrading" de bruts lourds ou ultra-lourds que pour les besoins d'allègement et de désulfuration poussée des diverses coupes pétrolières ou pétrochimiques.

Cependant, même si grâce au nucléaire on peut espérer disposer, vers 2050, d'hydrogène en quantités massives et à un coût raisonnable, cet hydrogène devrait rester un "mauvais" vecteur énergétique pour les raisons de fond déjà explicitées...

On peut alors se prendre à rêver d'autres complémentarités entre une industrie nucléaire source d'hydrogène et l'industrie pétrolière : la meilleure façon de "compacter" énergétiquement l'hydrogène serait en effet de lui adjoindre du carbone, en recréant synthétiquement des hydrocarbures.

Ce serait là une version écologique du procédé Fisher Tropsch!

Au-delà de ces remarques qui peuvent paraître quelque peu paradoxales - et qui sont contraires aux pensées dominantes du temps présent - nous soulignerons pour terminer que même si l'effet de serre ne venait pas engendrer des contraintes majeures quant à nos sources d'énergies à l'horizon 2050 - et c'est bien ce que nous avons supposé en acceptant une croissance relativement forte du charbon pour pouvoir "boucler les bilans" - on voit apparaître au-delà de 2020 un véritable basculement des grands équilibres énergétiques. Après une phase de croissance forte des hydrocarbures (pétrole et gaz) jusque vers 2020, c'est le nucléaire qui dès 2030 est contraint de prendre le relais de la satisfaction de l'accroissement de nos besoins d'énergies. Mieux vaut le savoir et donc s'y préparer.

(\*) Il existe déjà un prototype de réacteur nucléaire expérimental "HTTR" dédié à la production d'hydrogène : ce réacteur de 30 MW de puissance thermique a divergé au Japon en 1998 ; après des difficultés il aurait redémarré en 2000.

Nota: L'auteur remercie tout particulièrement pour leurs remarques et suggestions Paul Alba, Emmanuelle Bauquis, Denis Babusiaux, Jean-Claude Boudry, Georges Dupont-Roc, Jacques Foos et Roland Geoffrois.

Nota: Ce texte a été initialement publié dans la Revue de l'Energie (numéro spécial 50ème anniversaire N° 509-Sept. 1999). La publication originale ne comportait pas les graphiques et tableaux et l'épilogue a été développé par rapport au texte d'origine

(1) Publications de l'auteur relatives à la question des réserves pétrolières :

Revue de l'IFP, vol. 27, n° 4, juillet-août 1972, pages 631-658: Les réserves de pétrole et les perspectives de production à moyen et long terme par P.R. Bauquis, R. Brasseur, J. Masseron.

Energies n° 35. Printemps 1998 pages 11 et 12 - L'effet de serre et les réserves énergétiques. What future for extra heavy oil and bitumen : the Orinoco Case 17th Congress of the World Energy

Council, Houston, September 1998

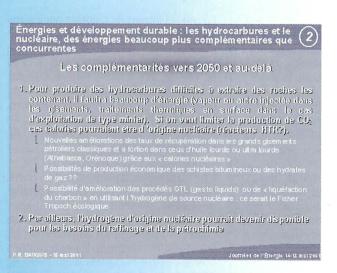
Energies et développement durable : les hydrocarbures et le nucléaire, des énergies beaucoup plus complémentaires que concurrentes

Du bon usage de chaque source d'énergie

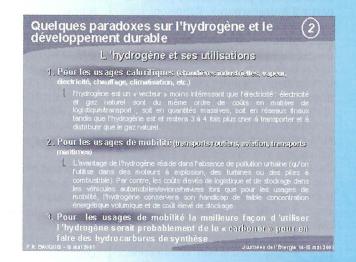
1. Les hydrocarbures liquides sont des ressources limitées et mieux vaut les utiliser essentiellement la où leurs caractéristiques de hante densité énergétique et de richesse chimique sont pleinement valorisées, c'est-à-dire :

[ les transports (terrestre, aériens, martimes)
[ comme matière première (petrochame, chimie, bitumes, solvants, etc.)

2. Pour les usages thermiques y compris la production d'électricité, l'utilisation d'hydrocarbures liquides n'est pas une bonne valorisation (sauf cas des « fonds de baril », ou cas de consommateurs éloignés des réseaux énergétiques ou ceux dont les réseaux (l'approvisionnement sont défaillants)
[ les hydrocarbures gazeux sont une meilleure solution dans certains cas et pour le court et moyen terme mais après 2050, il y oura très probablement des problèmes de ressources
[ le nudéaire est la meilleure solution dans d'autres cas dés aujourd'hui (pays développés à bonne culture de sûreté) et devre l'être de taçon très large à l'horizon 2020 - 2050 (besoin de petits réacteurs « fail sa le »)



# Quel ques paradoxes sur l'hydrogène et le développement durable Hydrogène et fondamentaux économiques 1. L'hydrogène est et restera cher à produire, tant aujourd'hui que demain: L'aujourd'hui et jusque vers 2030-2050, il sera produit à partir d'énergies fossiles, à un coût de l'ordre de 5 à 10 fois (par unité d'énergie) celui des énergies fossiles servant à la produire. Demain, disons après 2030, il sera progressivement produit à partir du nucleaire, soit par la voie electrolytique, soit par des voies thermiques directes de décomposition de l'eau. 2. L'hydrogène est cher à transporter et à stocker, et le restera. L'aujourd'hui comme demain, son transport par conduite coûte et coûtera 10 à 15 fois plus cher à l'unité d'energie transportée que celui des hydrocarbures liquides (les lois de la thermodynamique sont ce qu'ettes sont). Le stockage (soit sous pression, soit cryogénique, soit sous formes chimiques, soit adsorbé) peut voir son coût abassé… mais restera beaucoup plus cher que celui des hydrocarbures liquides.



# Hommage à Herbert A. Simon, Prix Nobel d'Économie en 1978

# Monsieur Michel Naranjo

Professeur de l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand

**L**le 9 février de cette année 2001, qui est aussi celle du 100ème anniversaire du prix Nobel, est décédé un des plus prestigieux précurseurs des Sciences de l'Artificiel : Herbert A. Simon, Professeur à Carnegie University. Agé de 84 ans, il est décédé à la suite de problèmes cardiaques. Ces dernières publications datent de la fin 2000, et nous donnons également dans cette brochure le texte d'une très intéressante interview donnée en octobre où il indique ses vues sur l'avenir de l'ordinateur d'ici cinquante ans.

Bien que sa recherche soit classée dans le domaine de l'informatique pour l'économie, ses modèles sont empruntés à la résolution des problèmes, les sciences de la décision, la psychologie cognitive. A partir des concepts d'intelligence Artificielle, l'évolution de sa pensée prépare l'ère de la Vie

Artificielle.

Son œuvre d'Universitaire, à Carnegie Mellon depuis 1949, a permis la création et la renommée internationale de plusieurs Instituts au CMU : l'Ecole Supérieure d'Organisation Industrielle. l'Ecole d'Informatique, le Collège des Humanités et Sciences Sociales ainsi que le Département de Psychologie. Ses travaux dont un apercu est donné dans la bibliographie ci- après, a montré la clarté de sa vision sur le développement des Sciences de l'Artificiel et a influencé des milliers de chercheurs à travers le monde. Outre le Prix Nobel en 1978, il a reçu en :

- 1975 le Prix A.M. Turing pour l'ensemble de son œuvre en informatique,

Médaille Nationale (Américaine) des Sciences;

- 1993 le Prix de l'Association Américaine de Psychologie ;

- 1994 il fut l'un des 14 scientifiques étrangers membre de l'Académie des Sciences Chinoise;

- 1995 le prestigieux congrès IJCAI (International Joint Conférence on Artificial Intelligence) lui décerna le prix d'excellence en recherche. Il reçut également la même année le Prix de la Société Américaine de l'Administration Publique;

- il fut nommé Docteur Honoris Causa 24 fois et membre d'un très grand nombre de sociétés savantes dans le monde.

Byron Spice, éditeur de www.post-gazette. com, a interviewé il y a tout iuste un an. le Prix Nobel 1978 : Herbert A. Simon lors d'un Symposium en informatique à Carnegie Mellon

Q: Do you consider your Nobel work on bounded rationality to be your most significant contribution science?

A: Not specifically that, but it really is very closely related to the work I do in computer science. I like to think that since I was about 19 I have studied human decision making and problem solving. Bounded rationality was the economics part of that. When computers came along. I felt for the first time that I had the proper tools for the kind of theoretical work I wanted to do. So I moved over to that and that got me into psychology.

O: So you have moved from field to field as you could bring new tools to bear on your study of decision making?

A: I started off thinking that maybe the social sciences ought to have the kinds of mathematics that the natural sciences had. That works a little bit in economics because they talk about costs, prices and quantities of goods. But it doesn't work a darn for the other social sciences; you lose most of the content when you translate them to numbersSo when the computer came along -- and more particularly, when I

LE CENTIÈME **ANNIVERSAIRE** DU PRIX NOBEL : L'ÉTONNANT TESTAMENT DE L'INVENTEUR DE LA DYNAMITE :

"Tout le reste de la fortune réalisable que je laisserai en mourant sera employé de la manière suivante : le capital placé en valeurs mobilières sûres par mes exécuteurs testamentaires constituera un fonds dont les revenus seront distribués chaque année à titre de récompense aux personnes qui, au cours de l'année écoulée, auront rendu à l'humanité les plus grands services. Ces revenus seront divisés en cinq parties égales. La première sera distribuée à l'auteur de la découverte ou de l'invention la plus importante dans le domaine de la physique; la seconde à l'auteur de la découverte ou de l'invention la plus importante en chimie ; la troisième à l'auteur de la découverte la plus importante en physiologie ou en médecine ; la quatrième à l'auteur de l'ouvrage littéraire le plus remarquable d'inspiration idéaliste ; la cinquième à la personnalité qui aura le plus ou le mieux contribué au rapprochement des peuples, à la suppression ou à la réduction des armées permanentes, à la réunion ou à la propagation des congrès pacifistes. Les prix seront décernés : pour la physique et la chimie par l'Académie suédoise des sciences, pour la physiologie ou la médecine par l'Institut Karolinska de Stockholm, pour la littérature par l'Académie de Stockholm, et pour la défense de la paix par une commission de cinq membres élus par le Parlement norvégien. Je désire expressément que les prix soient

décernés sans aucune considération de nationalité, de sorte qu'ils soient attribués aux plus dignes, scandinaves ou non."

understood that a computer is not a number cruncher, but a general sys tem for dealing with patterns of any type -- I realized that you could formulate theories about human and social phenomena in language and pictures and whatever you wanted on the computer and you didn't have to go through. this straitjacket of adding a lot of numbers. That seemed to me a tremendous breakthrough. The first rules of science is if somebody delivers a secret weapon to you, you better use it.

Q: In 1957, you made the famous prediction that a computer would be the world chess champion within 10 years. [IBM's Deep Blue wouldn't beat the human champ until 1997] Do you have a guess when a computer will make a Nobel-worthy discovery?

A: I'm pausing to think if that's already happened.

I've spent a good deal of my last

20 years looking at decision making and problem solving involved in scientific discovery. We took major historical scientific discoveries and we said what would it take to write a computer program that, given no more information than the guy who made the discovery had, would make the same discovery?



We focused on 19th century physics and chemistry. So, for example, we said [17th century mathematician Johannes] Kepler had some data, then available to all astronomers, on the distances of the planets from the sun and the periods of their revolution around the sun. He had that for the five inner most planets. And he started to do whatever he did, and after a while he decided that the periods went up with the square of the distances. And he published that.

The fit isn't very good. So 10 years later, he went back to it. In a couple of months, he said, oh, the period really goes up as a three-halves power of the distance, [the square of the orbital periods are proportional to the cube of their distances from the sun]. That gives you a great fit, so great that we still accept the law, [Kepler's third law of planetary motion].

So we had a little computer program called BACON, named after Sir Francis, and all we gave it were those five data points --five distances and the corresponding periods. And we said to BACON, see if you can find a pattern there. And in a couple of seconds, BACON had it.

So, what did BACON do? Did it try out all possible functions? Well, that's nonsense. No, in fact it got it on the third or fourth try.

Well, Kepler certainly would have gotten a Nobel prize. What about the computer? It didn't know anything Kepler didn't know. So evidently, it had to have similar power. And it didn't do it by brute computer strength. It had a way of generating patterns, it makes a try, it compares the try with reality and then makes an adjustment.

### Q: So a computer could someday deserve a Nobel?

A: I see no deep reason why not. We already have a world champion chess player, though that one I would not claim does it in a humanoid way, although it certainly does not do it by brute force. It uses a combination of computer speed and just a load of chess knowledge.

But forget about Nobel prizes: they aren't really very important. One of my former students. Raul Valdes-Perez [a CMU senior research computer scientist] wrote a program called MECHEM. You give it what you know about the inputs and outputs of a chemical reaction but you don't know how the reaction comes about. You ask MECHEM for hypotheses about that reaction and it will give you a set of hypotheses [listing potential steps the reaction may followl. Its ideas are interesting enough so that its results on several occasions have been published in chemical journals.

#### PRIX NOBEL : LES 26 LAURÉATS FRANÇAIS :

Médecine: Alphonse Laveran (1907): Alexis Carrel (1912); Charles Richet (1913); Charles Nicolle (1928) François Jacob (1965); André Lwoff (1965); Jacques Monod (1965); Jean Dausset (1980). Physique Henri Becquerel (1903) Marie Curie (1903); Pierre Curie (1903); Gabriel Lippmann (1908); Jean Perrin (1926) ; Louis de Broglie (1929); Alfred Kastler (1966); Louis Néel (1970) ; Pierre-Gilles de Gennes (1991); Georges Charpak (1992); Claude Cohen-Tannoudji (1997). Chimie: Henri Moissan (1906); Marie Curie (1911); Victor Grignard (1912); Paul Sabatier (1912);

# *Q:* Can computers help people act more rationally?

Frédéric Joliot-Curie (1935) ; Irène

Joliot-Curie (1935); Jean-Marie

Lehn (1987).

A: Anything that gives us new knowledge gives us an opportunity to be more rational.

Human knowledge has been changing from the word go and people in certain respects behave more rationally than they did when they didn't have it. They spend less time doing rain dances and more time seeding clouds.

But the big thing we have learned is that humans are very good at learning about a lot of patterns that show up in the world and associating what they know about the world with them. It's what a doctor does. He learns what measles looks like so that he can call it measles -- preferably in Latin, though -- and then get access to all that information in his [mental] encyclopedia.

We know people are good at searching for things very selectively, that is, using various rules of thumb to narrow down their searches. One of my big interests has been to see how we can give computers those capabilities. Because I don't care how big and fast computers are, they're not as big and fast as the world.

# *Q:* If computers can think for themselves, do people become expendable?

A: Computers thinking don't make you expendable. I think the real worry is, does this destroy what's valuable or precious about human beings? And that derives in turn from some idea that to be valuable you have to have a unique property -- you have to be different in some respect -- and that when anybody threatens human difference, whether it's Darwin or Galileo or whoever, there's a very strong reaction.

I think the mistake is in basing one's claim to worth on uniqueness. Most of us really aren't horribly unique. There are 6 billion of us. Put 'em all in one room and very few would stand out as individuals. So maybe we ought to think of worth in terms of our ability to get along as a part of nature, rather than being the lords over nature.

#### Q: Will machines find us expendable?

A: Well, expendability is a slightly different question. What happens at the time when they can make all the things we want to have made or can afford to have made within the earth's capacity? What do we do about it? Well, first we ought to understand how human beings behave under those circumstances.

There are plenty of historical examples. In every slave civilization there have been a group of people who didn't have to work for a living. So what did they do to make life significant for themselves?

A few of them found very ingenious things to do that really excited them and kept them busy and the fact that they didn't have to do them never bothered them. Science, in England at least, was a gentleman's game as late as the 18th century and some people found it kept them very happy.

And then there are some who focused on the usual verities of life -- family, home, relations with other people -- and when you look at the upper classes of those societies they were about as happy or unhappy as people usually are. Some extravagantly happy, some extravagantly unhappy.

So we're going to have to think about how you grow people up who find exciting things to do when there's nothing that has to be done. We're dangerously close to that for half of our society right now.

But here again, you see, technology may create a condition, but the questions are what do we do about ourselves.

We better understand ourselves pretty clearly and we better find ways to like ourselves.

# Q: So, in the next 50 years, we have the potential to create our own utopia or our own hell?

A: More likely a bit of both.



# L'ADASTA à EXPO-SCIENCES du 16 au 19 mai 2001

Compte rendu de Madame Suzanne Gély

**P**our la 5° fois (en 1992-1994-1997-1999 et 2001) l'ADASTA a participé à Expo-Sciences, salle polyvalente de Gournon, en

- initiant des projets ;

- trouvant des établissements scolaires partenaires ;

- accompagnant les enseignants dans leur démarche pédagogique ;

- aidant à la réalisation matérielle des stands pendant les

4 journées de l'exposition.

La préparation a commencé dès juillet 2000, et avec l'aide de Monsieur Jean-Pierre Garcia, nous avons pu mettre en œuvre deux projets qui ont connu un vrai succès.

SUR LA PISTE DES SUCRES (Lycée Monanges, Clermont-Ferrand, sous le patronage de l'ADASTA).

Pour tout savoir sur les sucres :

- la photosynthèse : sucre stocké dans la racine (betterave), la tige (canne à sucre), la sève (érable du Canada) ;

- les propriétés physico-chimiques ; solubilité, polarisation rotatoire, abaissement du point de congélation de l'eau ;

- le rôle des sucres dans l'alimentation ; aspect sanitaire (hypoglycémie, diabète, obésité, carie dentaire).

MESURES PHYSIQUES (LP Pierre Boulanger, Pont-du-Château, sous le patronage de l'ADASTA, et en partenariat avec l'Atelier Industriel de l'Aéronautique).

Pour mesurer, il faut être précis, exigence illustrée par des instruments simples ou sophistiqués, des films et des démonstrations.

Les stands patronnés par l'ADASTA ont reçu de nombreux visiteurs.



Le stand du LP Pierre Boulanger

Il faut remercier:

- Franck Dorléac et Delphine Demore, du lycée Monanges, qui se sont beaucoup investis pour le sucre ;

- le Directeur de la Sucrerie Bourdon, qui a mis à disposition des panneaux, ainsi que des sucreries destinées à récompenser les réponses exactes aux questionnaires proposés aux visiteurs :

- Monsieur Lacoste, Directeur de l'Ecole de Chimie, et Monsieur Troin qui ont volontiers prêté du matériel expérimental (banc Koffler, modèles moléculaires...);

- Madame Durantin, Proviseur du LP Pierre Boulanger, son



Un auditoire attentif

équipe d'enseignants, Madame Boissonnet, Directrice du Laboratoire de l'AIA, et ses collaborateurs, qui ont équipé magnifiquement un stand de haute technologie, axé sur la mesure, mettant à la portée des visiteurs des maquettes d'équilibrage de roues, de climatisation etc...

De son côté, l'ADASTA a fourni un CD Rom, une vidéocassette, de la documentation sur le sucre, très appréciés du

public.

Le planétarium de l'ADASTA avait été installé à côté de l'exposition, au centre aéré de Cournon où eurent lieu des séances d'astronomie animées par Monsieur Renoux.

Enfin l'ADASTA a présenté sur le stand de l'atelier mathématique du Collège de Monanges une maquette en bois du sautoir de la machine de Pascal réalisée sous la direction de P. L. Hennequin.

Samedi 19 mai à 16 h, a eu lieu la remise des prix par les membres du Conseil Scientifique d'Expo-Sciences, parmi lesquels Monsieur Guy Robert représentait l'ADASTA. Nos deux stands ont reçu chacun un prix de 1000 francs, et un diplôme de participation à Expo-Sciences 2001.

Nos félicitations vont à tous ceux qui ont œuvré pour faire une vraie fête de ces journées où l'ADASTA a pleinement rempli sa mission de popularisation scientifique.



Le stand du lycée Monanges

# En hommage à Blaise Pascal, importante participation de l'ADASTA aux PASCALINES Clermont-Ferrand 30 juin 2001



Suzanne Gély et Hélène Berthelier font une démonstration

Pour célébrer les Pascalines, à la demande de Madame Dossat, présidente du Comité d'Organisation, l'ADASTA s'est fortement impliquée, le 30 juin 2001, dans la présentation d'expériences évoquant les travaux scientifiques de Blaise

- Dans un stand installé place de la Victoire à Clermont-Ferrand, Madame Suzanne Gély et Mademoiselle Hélène Berthelier ont réalisé de nombreuses expériences ludiques mettant en évidence le phénomène de pression.

- A la maison du Tourisme de Clermont-Ferrand, Monsieur Paul-Louis Hennequin a présenté la machine à calculer de Pascal.

- Enfin l'ADASTA a reproduit la mesure de la pression atmosphérique, à Clermont-Ferrand et au sommet du Puy-de-Dôme, expérience que Pascal avait imaginée et fait réaliser par son beau-frère Périer en 1648.

#### DES EXPÉRIENCES SUR LA PRESSION, PLACE DE LA VICTOIRE

Dans leur stand, Suzanne Gély et Hélène Berthelier ont accueilli de nombreux visiteurs de tous âges, visiblement très intéressés par les démonstrations suivantes :

- mise en évidence de la pression atmosphérique par des expériences simples :

#### LA FONTAINE DE HERON

#### Matériel

- Un pot à confiture à demi rempli d'eau, avec un couvercle traversé par 2 pailles dont l'une affleure à l'intérieur du couvercle. Bien visser le couvercle du pot
- Un bocal n° 1 vide.
  Un bocal n° 2 plein d'eau colorée.

#### Expérience

- Renverser le pot sur les bocaux de façon que la paille la plus longue plonge dans le bocal n° 2.
- Observer : le bocal n°2 se vide pendant que le bocal n° 1 se remplit.

#### Interprétation

En renversant le pot, l'eau qu'il contient s'écoule, mais il se crée dans le pot une dépression qui aspire l'eau du bocal plein pendant que l'eau continue à couler dans le bocal initialement vide.



Le public participe aux expériences

- la fontaine de Héron (physicien mathématicien vivant à Alexandrie vers le 1er siècle après J.-C.)
- le siphon ;
- les ludions :
- comment percer des ballons sans les crever etc.

TABLEAU

Rue de Bien-Assis Place de la Victoire La Font-de-l'Arbre Col de Ceyssat Puy-de-Dôme

#### PRÉSENTATION DE LA PASCALINE À LA MAISON DU TOURISME

C'est en 1642 que Blaise Pascal a conçu sa première machine arithmétique dans le but d'aider son père. Cet instrument était capable d'effectuer les opérations d'addition et de soustraction grâce à de simples mouvements de roues. La pascaline présentée à Clermont-Ferrand est une reproduction à l'échelle trois réalisée par le Conservatoire National des Arts et Métiers. Elle possède 4 roues permettant d'afficher l'unité, la dizaine, la centaine et le millier.

Les deux inventions majeures de Blaise Pascal sont d'une part le "sautoir", mécanisme complexe assurant le report automatique des retenues et les deux suites de chiffres complémentaires sur les tambours de l'afficheur, l'une pour les additions et l'autre pour les soustractions.

Dix panneaux d'exposition réalisés par l'ADASTA présentaient les 8 exemplaires connus de la "pascaline" (dont les deux du musée du Ranquet), le détail des mécanismes et l'exécution des opérations.



Paul-Louis Hennequin pendant son exposé.

Une maquette à échelle 8 du sautoir, réalisée par l'ADASTA permettait de comprendre son fonctionnement et aussi les irrégularités possibles.

Un public de tout âge attentif et curieux est venu écouter les explications claires et documentées de Paul-Louis Hennequin.



Mise en place de l'expérience à la Font-de-l'Arbre

Départ rue de Bien-Assis



Dès le matin un bus a été mis à la disposition d'une cinquantaine de personnes rue de Bien-Assis, où se trouvent les locaux de l'ADASTA, et où s'élevait aussi autrefois le château de Blaise Pascal aujourd'hui disparu. Ce petit groupe se proposait de refaire l'expérience de mesure de la pression atmosphérique de Blaise Pascal. Au moyen d'un tube de Torricelli renversé sur une

cuve à mercure, il s'agissait de vérifier si la hauteur de mercure dans le tube diminue avec l'attitude, c'est-à-dire montrer que la pression atmosphérique est en relation avec la hauteur de la colonne d'air au-dessus du lieu considéré. Les membres de l'ADASTA, parmi lesquels Michel Naranjo, directeur scientifique, Jean-Claude Capelani, président, Guy Robert, secrétaire, ont procédé à des mesures à la Font-de-l'Arbre, puis au sommet du Puyde-Dôme, et chacun put constater que les résultats étaient bien conformes à ceux de l'expérience historique.

Favorisée par un agréable beau temps la journée a été jugée intéressante et fructueuse par tous, animateurs et visiteurs



Mesure à 1442 m d'altitude

#### **DE MESURES** altitude hauteur en m de mercure en mm 359 732 407 721 809 696 1078 670 1464 650



# L'Institut Prométhée effet lumineux produit par un Kaléïdophone de l'Institut Prométhée

#### L'ADASTA est jumelée avec l'INSTITUT PROMETHEE de l'Université Technologique d'Etat de Kazan (Russie)

Lors de la conférence "Prométheus 2000: a Destinity of Light-Music on the Treshold of a new Century "qui s'est tenue à Kazan dans la semaine du 2-6 octobre, 2000, Bulat Galeyev, Directeur de l'Institut Prométhée et Michel Naranjo, Directeur Scientifique de l'ADASTA ont exprimé le vœu que leurs deux Instituts conservent un lien privilégié dans le but d'échanges réguliers.

#### L'INSTITUT PROMÉTHÉE

Scriabine, compositeur russe, est considéré comme le pionnier de la "musique des lumières". Il a été le premier à transcrire dans une partition l'effet lumineux en incluant une ligne "lumière (Luce)" Kandinsky a été fasciné par des relations qu'il percevait entre les couleurs et les sons. Se basant sur ces supposées relations entre l'art plastique et la musique, des artistes, chercheurs, techniciens développent, depuis 1962 à l'Institut Prométhée de Kazan, une passionnante activité scientifique dans le domaine de l'association de la musique et la couleur incluant :

- Une étape avant-gardiste de prédiction des courants de l'esthétique et la psychologie ;
- Le développement des matériels techniques nécessaires ;

• Une expérimentation artistique sur la base de ces techniques.

Bulat Galeyev nous a confié une trentaine de photos présentant un échantillon des réalisations de l'Institut Prométhée. Vous les trouverez dans notre site web:

http://perso.wanadoo.fr/adasta/prometheus

#### LA CONFÉRENCE

Cette conférence était dédiée à l'analyse et la synthèse des expérimentations dans le domaine de la musique colorée durant le XXème siècle, et a permis des discussions sur les perspectives de cet art, associé au puissant développement des technologies.

Une attention particulière a été donnée au phénomène de synesthésie.

#### Adhésions et Abonnements

Adhésions à titre individuel  $26 \in$  Adhésions à titre collectif.  $80 \in$ 

L'adhésion donne droit au service gratuit du bulletin et à des réductions sur les différents services rendus par l'Association (publications, stages, visites,...)

Permanences : L'A.D.A.S.T.A. a de nouveaux horaires d'ouverture : Lundi 14 H 00 à 18 H 00 ; Mardi 8 H 00 à 12 H 00, 14 H 00 à 17 H 00 ; Mercredi 8 H 00 à 12 H 00, 14 H 00 à 18 H 00 ; Jeudi 8 H 00 à 12 H 00; 14 H 00 à 17 H 00 ; Vendredi 8 H 00 à 12 H 00 Adressez le courrier à

ADASTA, 19, rue de Bien-Assis - 63100 Clermont-Ferrand Tél. 04 73 92 12 24 - Fax 04 73 92 11 04

E-mail: adasta@wanadoo.fr

Site Internet: http://perso.wanadoo.fr/adasta

# Première démonstration d'une pile à combustible stationnaire en France

FIRST DEMONSTRA-TION OF A STATIONARY FUEL CELL IN FRANCE

### Philippe MATHEVON

*EDF - Pôle Industrie - Division Recherche et Développement Site des Renardières Ecuelles 77818 Moret-sur-Loing Cedex* 

#### **Bernard COURAUDON**

EDF GDF Services - Centre de Saint-Mandé 55-59, rue du Commandant René-Mouchotte - 94160 Saint-Mandé



#### Summary:

Electricité de France is managing in collaboration with Gaz de France a demonstration of a new CHP (Combined Heat and Power) technology, the fuel cell. It is the first stationary fuel cell installed and operated in France. The fuel cell is installed in an urban area, in the city of Chelles situated 20 km to the east of Paris; the fuel cell is connected to the low voltage distribution electrical grid and to the city heating

The principles of operation, the technical features of the fuel cell installed in Chelles and its advantages are presented. The celui communication made on the project to the inhabitants and the insertion l'élecconditions of the fuel cell into its trolyse. environment are also reported. Les piles à The development prospects combustible for stationary fuel cells sont donc des are discussed. générateurs électro-

chimiques d'électricité, qui à la différence des batteries, n'ont pas besoin d'être rechargées, puisqu'elles fonctionnent tant qu'elles sont alimentées en combustible et en air.

On distingue les piles à combustible stationnaires (cas de la pile de Chelles) et les piles à combustible embarquées (pour des applications telles que la traction automobile). Dans le cas des piles stationnaires, l'hydrogène est généralement obtenu par transformation chimique du gaz naturel. Dans le cas des piles embarquées, le combustible privilégié pourrait être le méthanoi ou l'essence. L'oxygène est prélevé dans l'air ambiant.

Il existe différents types de piles à combustible, qui se distinguent principalement par leur température de fonctionnement et la nature de l'électrolyte (liquide ou solide) utilisé pour conduire l'électricité entre les électrodes

- les piles à membrane échangeuse de protons (PEMFC),
- les piles à acide phosphorique (PAFC),
- les piles à carbonates fondus (MCFC),
- les piles à oxydes solides (SOFC) qui fonctionnent respectivement à 80-100° C, 200° C, 650° C et 800-1000° C.

# **RÉSUMÉ**

Electricité de France mène en collaboration avec Gaz de France une action de démonstration d'une nouvelle technique de cogénération, la pile à combustible. Il s'agit de la première pile à combustible stationnaire installée et exploitée en France. La pile est installée dans un milieu semi-urbain, à Chelles en Seine-et-Marne; la pile est raccordée au réseau électrique Basse Tension et au réseau de chaleur de la ville.

Nous présentons d'abord dans cet article les principes de fonctionnement d'une pile à combustible, les caractéristiques de la pile installée à Chelles, ainsi que les avantages de la technique. Ensuite, nous nous intéressons à la communication qui a été faite aux Chellois sur le projet et aux conditions d'insertion de la pile à combustible dans son environnement. Enfin, nous concluons sur les perspectives de développement pour la pile à combustible stationnaire.

# 1. CONTEXTE

Electricité de France et Gaz de France mènent une action de démonstration d'une nouvelle technique de cogénération, la pile à combustible. Il s'agit de la première pile à combustible stationnaire installée et exploitée en France.

Parmi les technologies de piles à combustible existantes, c'est la pile à acide phosphorique (PAFC) qui a été

retenue, car c'était à l'époque de la décision la seule technologie à avoir atteint le stade pré-commercial et à permettre une démonstration à un coût acceptable. La pile fonctionne au gaz naturel.

La pile est installée dans un milieu semi-urbain, à Chelles en Seine-et-Marne. L'énergie électrique produite par la pile (200 kW $_{\rm \'el}$ ) est fournie au réseau exploité par le Centre EDF GDF SERVICES de Saint-Mandé. L'énergie thermique produite (200 kW $_{\rm th}$ ) est utilisée par le réseau de chaleur local, qui assure le chauffage et l'alimentation en eau chaude sanitaire d'une partie de la ville de Chelles.

Electricité de France et Gaz de France ont créé pour cette opération de démonstration un Groupement d'Intérêt Economique, GEPPAC, dont le rôle est l'acquisition, l'installation et l'exploitation de la pile à combustible.

Le projet associe la Division Recherche et Développement d'EDF, la Direction de la Recherche de Gaz de France, et le centre EDF GDF SER-VICES de Saint-Mandé.

#### 2. PRINCIPES D'UNE PILE À COMBUSTIBLE

Le principe de la pile à combustible a été découvert en 1839 par William Grove. Il s'agit de produire de l'électricité et de l'eau à partir d'hydrogène et d'oxygène. C'est le principe inverse de Trois parties principales constituent une pile à combustible alimentée en gaz naturel et produisant un courant électrique alternatif:

- L'unité de transformation du gaz naturel en hydrogène intermédiaire, appelée reformeur.

Dans le cas de la pile à acide phosphorique (PAFC), le gaz naturel, composé principalement de méthane  $CH_4$ , est d'abord transformé en hydrogène  $H_2$  et monoxyde de carbone CO $CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$  (réaction de vapo-reformage).

Ensuite le reste du CO réagit avec l'eau :  $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$  (réaction de "shift").

- La partie génératrice d'électricité (courant continu) et de chaleur, appelée cœur de pile,

Le cœur de pile est formé d'un empilement de cellules électrochimiques. Chaque cellule comporte une anode, un électrolyte et une cathode.



Figure 3: module de production d'une pile ONSI PC25-C

Une partie de la chaleur produite par les cellules électrochimiques est récupérée et valorisée. La pile à combustible fonctionne ainsi comme un système de cogénération (production simultanée d'électricité et de chaleur pouvant être réutilisée).

de seconde génération, issues de la première génération représentée par les modèles A et B.

Environ 150 piles ONSI de modèles A, B ou C sont en fonctionnement dans le monde, principalement aux Etats-Unis et au Japon - Les premières (modèle A) ont été mises en service il y a 6 ans.

L'ensemble des piles à combustible ONSI ont cumulé plus de 2,7 millions d'heures de fonctionnement. Deux piles installées au Japon ont fonctionné 9 500 heures sans arrêt. Une quarantaine de piles ont dépassé 6 mois de fonctionnement ininterrompu. Deux piles ont cumulé chacune plus de 40 000 heures de fonctionnement.

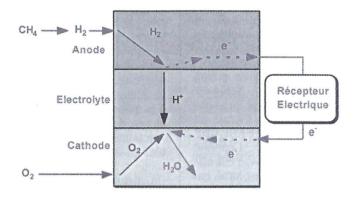
Il y a actuellement 20 piles ONSI en fonctionnement en Europe. Certaines sociétés électriques ou gazières européennes comme Sydkraft en Suède, Hamburgische Electrizitäts-Werke/Hamburger Gas-Werke en Allemagne ou les Services Industriels de Genève en Suisse possèdent leur propre PC25 depuis plusieurs années. La plupart des piles se trouvent en Allemagne, mais des opérations ont lieu également en Suède, Italie, Suisse, Danemark et Autriche.

Dix de ces piles sont des modèles PC25C (1 en Suède et 9 en Allemagne).

La pile fournit d'une part de l'électricité sous forme de courant triphasé en 400V/50Hz, et d'autre part de l'eau chaude à une température de  $80^\circ$  C. La puissance électrique est de  $200~\text{kW}_\text{\'el},$  la puissance thermique maximale sortie est de  $200~\text{kW}_\text{th}.$  La puissance est modulable.

A puissance nominale, la consommation de gaz naturel est d'environ 50 Nm³/h. Le rendement électrique de

Figure 2: Principe de fonctionnement du cœur de pile



Dans le cœur de pile, l'hydrogène se décompose à l'anode en ions  $H^+$  et en électrons  $e^ (2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-)$ . L'ion  $H^+$  traverse l'électrolyte et réagit avec les électrons et  $O_2$  à la cathode

 $(O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O)$ .

- Le convertisseur électronique assurant le transformation du converti

- Le convertisseur électronique assurant la transformation du courant continu en courant alternatif triphasé.

#### 3. CARACTÉRISTIQUES DE LA PILE INSTALLÉE À CHELLES

La pile installée à Chelles est une pile PC25 modèle C fabriquée par la compagnie américaine ONSI, joint-venture créé par United Technology Corporation et Toshiba.

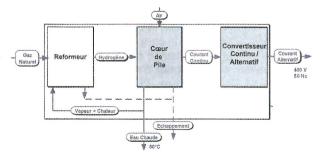


Figure 1 : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible

La PC25 est une pile à acide phosphorique, de puissances électrique 200 kW et thermique 200 kW, fonctionnant au gaz naturel. ONSI possède une chaîne de production robotisée de fabrication des modèles PC25. Le modèle C correspond aux piles

la pile est de 40 % PCI (Pouvoir Calorifique Inférieur), et ce sur une large gamme de puissance.

Les équipements permettant la production d'électricité et de chaleur se présentent extérieurement en 2 modules. Le premier, le module de production, comporte tous les éléments participant à la transformation du gaz naturel en électricité et chaleur. Le second, le module de refroidissement, a pour but de permettre le fonctionnement normal de la pile (production d'électricité jusqu'à 200 kW $_{\rm el}$ ) en cas de faible demande d'énergie thermique du réseau de chaleur.

On distingue dans le module de production :

- le système de transformation du gaz naturel en hydrogène intermédiaire, composé principalement d'une unité de désulfuration du gaz naturel et des réacteurs catalytiques de vapo-reformage et de "shift".
- la partie génératrice d'électricité et de chaleur, appelée "cœur de pile".
   Cette partie est formée de 250 cellules électrochimiques disposées en série. La surface de chaque cellule est de 1 m². La température de fonctionnement des cellules est de 200° C.
- le convertisseur électronique assurant la transformation du courant continu en courant alternatif triphasé 400 V/50 Hz.

Le module de production est un parallélépipède de 5,5 m x 3 m sur 3 m de hauteur. Le poids de la pile est de 18 tonnes et celui du module de refroidissement est de 850 kg.

Les options proposées par le constructeur pour ce matériel sont principalement la récupération d'une eau à plus haute température (120° C), la production directe d'eau chaude sanitaire et la possibilité de fonctionner en îlotage.

L'installation fonctionne automatiquement.

#### 4. AVANTAGES DE LA PILE À COMBUSTIBLE

La pile à combustible constitue un système de production décentralisée d'électricité et de chaleur au rendement élevé, très peu polluant et pratiquement sans nuisances sonores :

- les rendements électriques sont plus élevés que pour d'autres systèmes de cogénération ils sont compris entre 35 et 50 % PCI selon les types de piles (jusqu'à 70 % si la pile est couplée à une turbine), alors qu'ils sont de 25 à 30 % pour les moteurs à gaz de puissance similaire. Le rendement total (électrique + thermique) est d'environ 80 %. - les processus mis en jeu pour la transformation du gaz naturel en hydrogène dans le reformeur puis pour son utilisation dans le cœur de pile (réactions électrochimiques) se déroulent à des températures trop basses pour générer des oxydes d'azote. Les émissions d'oxydes de soufre  $\mathrm{SO}_x$  et d'imbrûlés sont nulles les émissions d'oxydes d'azote  $\mathrm{NO}_x$  et de monoxyde de carbone  $\mathrm{CO}$  sont négligeables (cas de la pile de Chelles  $\mathrm{NO}_x < 1$  ppmv et  $\mathrm{CO} < 5$  ppmv).

 le meilleur rendement électrique se traduit également par une diminution de la quantité de dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> produite par kWh par rapport à un autre moyen de production utilisant la même énergie fossile.

- de par leur principe de fonctionnement (absence de moteur ou de turbine), les piles à combustible génèrent moins de bruit que les autres types de cogénérateur. Le processus électrochimique ne génère pas de bruit ; les émissions sonores de la pile à combustible proviennent uniquement des auxiliaires du système, comme les ventilateurs, les pompes de circulation et le convertisseur électronique. Sans aucune protection acoustique, le niveau de bruit généré par la pile de Chelles serait de 60 dBa à 10 mètres.

#### 5. COMMUNICATION SUR LE PROJET

....

EDF et Gaz de France ont présenté début 1998 le projet d'installation de la pile à combustible à Chelles dans le journal de la ville. Les principes de fonctionnement d'une pile, les objectifs du projet et l'intérêt porté par EDF et Gaz de France sur les piles à combustible ont été expliqués aux Chellois.

Afin de convaincre les habitants de l'utilité de la pile à combustible, une réunion publique ouverte aux habitants des quartiers avoisinants la pile a été organisée en juin 1998. Plus de deux cents Chellois ont répondu présents. Lors de cette réunion, des responsables d'EDF et Gaz de France, de l'ADEME, un exploitant suisse utilisant une pile à combustible depuis 5 ans, ont présenté la pile à combustible et ont répondu aux questions posées par les habitants.

Enfin une visite a été organisée par EDF et Gaz de France à Hambourg en Allemagne en septembre 1998, afin qu'une trentaine de Chellois (élus de la majorité et d'opposition, représentants d'associations de protection de l'environnement, de parents d'élèves...) puissent découvrir "de visu" une pile en fonctionnement. Ces représentants ont notamment pu discuter avec des riverains, qui habitaient à quelques mètres de la pile.

Si certains représentants étaient restés inquiets après la réunion publique (taille de l'installation, nuisances sonores, sécurité...), les discussions avec les bénéficiaires allemands de cette nouvelle technologie qu'est la pile à combustible, les ont complètement rassurés. Les représentants ont donné un avis favorable à l'opération de démonstration de la pile à Chelles à l'issue de la visite

# 6. CONDITIONS D'INSERTION DE LA PILE DANS SON ENVIRONNEMENT

La pile à combustible a pour intérêt majeur de permettre une production simultanée d'électricité et de chaleur avec des rendements énergétiques élevés et des émissions atmosphériques très faibles.

Le quartier de Chelles où est installée la pile dispose des atouts indispensables à l'implantation d'une pile à combustible : une densité importante au niveau de l'habitat avec des besoins locaux en électricité et en chaleur. D'autre part, l'existence d'un réseau de chaleur urbain facilitait l'installation de la pile et la valorisation de la chaleur qu'elle produit. L'électricité (200  $kW_{\rm \acute{e}l}$ ) et la chaleur (200  $kW_{\rm th}$ ) produites par l'installation servent en apport aux réseaux d'électricité et de chaleur de Chelles.

Le quartier présentait également l'avantage d'être très peu bruyant, en particulier la nuit, et les qualités de silence de la pile peuvent donc y être mises en évidence,

C'est pourquoi EDF et Gaz de France ont proposé à la ville de Chelles d'accueillir cette première démonstration de pile à combustible en France. La ville de Chelles, très intéressée par le projet, a mis à disposition le terrain et s'est associée à la communication sur le projet.

Concernant la pile elle-même, le module de production est fabriqué en pré-série aux Etats-Unis par ONSI Corporation. La pile a donc dû être adaptée et modifiée pour une utilisation en France. Ceci concerne notamment la certification d'appareils à pression par la DRIRE.

En ce qui concerne les conditions d'installation, la pile est raccordée au réseau de gaz naturel existant (4 bar), par l'intermédiaire d'un poste de détente 4 bar / 20 mbar. La pile est connectée en Basse Tension à partir du transformateur HT/BT desservant les habitations proches. L'énergie thermique est récupérée au moyen de l'échangeur de

chaleur intégré au module de production de la pile. La pile nécessite également un raccordement en eau (eau de ville), et utilise de l'azote lors des opérations de démarrage et d'arrêt; l'azote est approvisionné en bouteilles.

La conception du module de production est telle qu'il peut être installé directement en extérieur. A Chelles, un bâtiment a été réalisé afin de mieux intégrer visuellement l'ensemble des équipements de la pile dans son environnement, L'architecture du bâtiment a été définie en collaboration avec la Mairie de Chelles. Le bâtiment a également fait l'objet d'une étude acoustique complète.

L'exploitation de la pile ne nécessite pas de personnel permanent, puisque l'installation fonctionne automatiquement et peut être contrôlée à distance. Un système de télésurveillance relié à un poste de contrôle fonctionne 24 heures sur 24. Seules les opérations de maintenance nécessitent la présence de personnel sur place, spécialement qualifié pour intervenir sur l'installation.

# 7. PERSPECTIVES POUR LA PILE À COMBUSTIBLE STATIONNAIRE

La pile à combustible peut constituer une solution alternative à de nombreuses techniques de productions locales d'électricité et de chaleur à partir de gaz naturel telles que des moteurs à explosion, des turbines à gaz, mais avec un rendement plus élevé (et donc des économies d'énergie) et avec des nuisances très faibles. C'est pourquoi EDF mène actuellement, en collaboration avec Gaz de France, cette opération de première démonstration d'une pile à combustible stationnaire en France, qui permet d'acquérir une expérience d'exploitation pratique d'une pile à combustible, en tant que générateur d'énergie répartie.

Il s'agit aussi de mieux évaluer les rendements énergétiques de la pile, la disponibilité de l'installation, sa durée de vie, les coûts d'exploitation et de maintenance, et de mesurer la qualité de l'énergie électrique fournie.

Chelles a été choisie pour cette opération de démonstration, et ses habitants sont les premiers en France à bénéficier de cette technique prometteuse mais pas encore compétitive qu'est la pile à combustible.

En effet les qualités de la pile à combustible ne doivent pas faire oublier son coût actuellement très élevé (actuellement prés de 30 000 F par kW électrique pour les piles les moins chères). Seule une baisse considérable de ce coût d'investissement pourra permettre un développement réel de la pile à combustible.

Les recherches et développement en cours sur les piles à combustible embarquées pourront contribuer à cette baisse du coût d'investissement (de par l'effet de grande série qui résulterait d'une production pour l'automobile) et donc au succès et à la diffusion des piles à combustible stationnaires pour la production décentralisée.

#### Adhésions et Abonnements

26€

.....80 €

L'adhésion donne droit au service gratuit du bulletin et à des réductions sur les différents services rendus par l'Association (publications, stages, visites,...)

Permanences : L'A.D.A.S.T.A. a de nouveaux horaires d'ouverture : Lundi 14 H 00 à 18 H 00 ; Mardi 8 H 00 à 12 H 00, 14 H 00 à 17 H 00 ; Mercredi 8 H 00 à 12 H 00, 14 H 00 à 18 H 00 ; Jeudi 8 H 00 à 12 H 00, 14 H 00 à 17 H 00 ; Vendredi 8 H 00 à 12 H 00 Adressez le courrier à

ADASTA, 19, rue de Bien-Assis - 63100 Clermont-Ferrand Tél. 04 73 92 12 24 - Fax 04 73 92 11 04

E-mail : adasta@wanadoo.fr

Site Internet: http://perso.wanadoo.fr/adasta

# Philosophie et physique

# Monsieur Jean Claude Pariente

Professeur honoraire à l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand



Je voudrais tout d'abord remercier amicalement le président Capelani pour m'avoir invité à parler devant les membres de l'Adasta. Le dialogue entre physiciens et philosophes n'est pas courant aujourd'hui, et il fallait sa grande ouverture d'esprit pour lui donner une nouvelle chance de s'établir. Je n'ai cependant pas accepté son invitation sans avoir beaucoup hésité, car elle m'apparaissait comme un véritable défi à relever pour quelqu'un qui. comme moi, ne possède pas une connaissance solide de la physique. Mais finalement, il m'a semblé qu'il ne fallait pas laisser passer une occasion de discussion entre deux disciplines qui ne devraient pas plus s'ignorer aujourd'hui qu'elles le faisaient jadis.

Pour lancer cette discussion, je me propose de procéder en deux étapes, dont la première sera consacrée à un petit parcours historique qui permettra de rappeler comment ont évolué les relations de la physique et de la philosophie. Je pourrai ensuite mieux développer l'examen d'un des problèmes que la physique pose à la philosophie. A travers ces deux étapes, je ne pourrai évidemment donner que des indications sommaires, laissant éventuellement à la discussion la possibilité de les approfondir un peu.

#### 1. QUELQUES MOTS D'HISTOIRE

L'histoire des relations entre physique et philosophie peut être résumée autour de trois grandes étapes, dont la première irait en gros de l'Antiquité au XVIe siècle, la seconde du XVIe au XVIIIe - XIXe siècle, et la troisième de cette période à nos jours.

Dès le début de la réflexion philosophique, il a été acquis que l'un des objectifs fondamentaux de la philosophie était d'expliquer les phénomènes naturels, et les autres objectifs qu'on lui assigne couramment, par exemple, de donner les règles d'une conduite morale, ou de déterminer les rapports de l'âme et du corps, ne se sont dégagés que lentement de cet objectif fondamental de rendre compte de la nature. Cela dit, il ne faut pas croire que les premiers penseurs avaient de la nature la même représentation que nous, et en particulier il ne faut pas croire qu'ils opposaient aussi nettement que nous le faisons la nature comme ensemble de phénomènes objectifs, donnés, observables et mesurables et, disons, l'ordre humain avec sa subjectivité, sa variabilité, et les difficultés qui se présentent quand on tente de le soumettre à un traitement quantitatif. La nature était plutôt pour eux un principe commun à tous les phénomènes, et la philosophie devait mettre en évidence le principe en question, et montrer comment il rendait compte des phénomènes connus. Parmi ces phénomènes, celui qui attire le plus l'attention est celui du changement : une grande partie des réflexions des Grecs porte sur ce problème envisagé dans sa dimension conceptuelle avec Parménide (vers 480) qui en nie la possibilité, dans sa dimension mathématique avec Zénon d'Élée (vers 445) qui se demande ce que doit être l'espace s'il est la scène sur laquelle se produit le changement, et enfin dans sa dimension proprement physique et, en particulier, astronomique, représentée, elle, par beaucoup de théoriciens. Mais, ici aussi, il faut se garder de toute confusion avec la notion moderne de changement : quand nous pensons au changement, c'est le changement local, le déplacement, que nous visons. Pour les Grecs, et Aristote (384-322) recueille ici leur pensée, le changement est certes local, mais il y a d'autres variétés de changement, comme le changement qualitatif (la couleur de la peau change dans la passion ou la maladie), le changement selon la quantité (celui de l'enfant qui grandit, ou du malade qui maigrit) et enfin le changement selon l'être, c'està-dire la génération et la corruption, la naissance d'un être et sa mort. Une explication du changement doit s'appliquer à toutes les variétés ainsi distinguées, et c'est là un des principaux points de rupture entre la Physique d'Aristote et la nôtre.

Un autre point cependant mérite d'être également signalé. Il s'agit cette fois d'une thèse concernant la cosmologie : Aristote admet que les mouvements des corps célestes n'obéissent pas aux mêmes lois que ceux des corps terrestres. Les premiers sont parfaits, car, dotés de continuité, ils sont invariables et circulaires. Les seconds sont imparfaits, car, quand ils sont naturels et non pas contraints, ils ne se font que vers le haut ou vers le bas, vers le haut comme le mouvement naturel de l'air ou du feu, vers le bas comme le mouvement naturel de la terre ou de l'eau; se faisant selon des directions privilégiées, ils ne peuvent pas avoir la perfection des mouvements célestes. Le temps me manque pour donner une idée même vague des solutions qu'Aristote apporte pour répondre aux problèmes qu'il se pose, mais je tiens à dire que son œuvre de physicien reste le témoignage grandiose du premier effort fait par l'humanité pour faire du changement autre chose qu'une affection superficielle ou qu'une transformation irrationnelle et totalement fortuite des objets.

Sautons alors une vingtaine de siècles. Au XVIe siécle s'ouvre un âge d'or dans les relations de la physique et de la philosophie, qui durera à peu près jusqu'au XVIIIe-XIXe siècle. C'est en effet une période au cours de laquelle il n'est pas de grand philosophe qui n'apporte une contribution personnelle aux progrès de la connaissance scientifique, ou qui au minimum ne se montre capable d'en suivre personnellement les découvertes ; et réciproquement, il n'est pas alors de grand savant qui ne se montre capable de couronner ses recherches proprement scientifiques par une réflexion de nature philosophique. J'illustrerai rapidement la première partie de ces propos en rappelant quelques faits : c'est à Descartes (1596-1650) que nous devons la première formulation de la notion de quantité de mouvement (mv) et l'affirmation de sa conservation dans les déplacements; c'est Leibniz (1646-1716) qui donne la première définition scientifiquement utilisable de la force vive ou énergie en en faisant une fonction du carré de la vitesse (1/2 mv²) et en lui associant également une loi de conservation ; à la fin de cette période E. Kant (1724-1804) médite sur la signification philosophique de la mécanique de Newton, et va jusqu'à élaborer une hypothèse cosmogonique qui anticipe en plusieurs points sur celle que fera Laplace au début du siècle suivant.

Du côté maintenant des savants, la période s'ouvre et se prolonge par des œuvres tout à fait considérables, celle de Galilée (1564-1642) et celle de Newton (1643-1727) sans oublier les recherches de Pascal (1623-1662) en mathématiques pures ou en physique : les uns comme les autres ne séparent pas leurs travaux scientifiques d'une réflexion philosophique car il s'agit à cette époque de mettre en place les cadres de pensée à l'intérieur desquels puisse se déployer l'idée nouvelle qu'on se fait alors de la connaissance scientifique. C'est la tâche commune à laquelle se consacrent alors physiciens et philosophes, et on peut dire qu'elle est achevée à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle : il aura fallu près de deux siècles pour mettre fin à la conception antique de la nature et de sa connaissance, et pour imposer à leur place la représentation sur laquelle nous vivons encore pour une grande partie. J'essaierai de caractériser brièvement les innovations de la pensée moderne à cet égard.

Elle repose d'abord sur l'affirmation d'une unité des phénomènes naturels : où qu'ils se produisent, ils obéissent aux mêmes lois, et, en particulier, il n'y a pas lieu de postuler que les mouvements des corps célestes soient d'une nature différente de ceux qui se produi-

sent sur la Terre. Cette affirmation repose sur une combinaison d'analyses théoriques et sur une invention technique. D'un côté, l'irruption du copernicanisme qui, en rendant pensable le mouvement circulaire de la Terre autour du Soleil, dote notre planète de la perfection reconnue aux astres. De l'autre, l'invention de la lunette astronomique qui permet à Galilée, en quelques mois de l'année 1610, une série d'observations sur la Lune (découverte des irrégularités de sa surface et de son relief) et sur le Soleil (découverte des taches solaires et démonstration qu'il ne s'agit pas d'artefacts dus à l'observation, mais bel et bien de formations qui sont soumises à génération et corruption). D'où la certitude que les corps célestes ne sont pas d'une essence différente de celle de la Terre, et donc l'unification physique et mécanique de la nature tout entière.

On trouve chez Descartes un effort convergent, bien qu'il s'exprime sur un plan plus proprement philosophique, quand Descartes affirme qu'il existe seulement deux substances, la pensée et l'étendue, c'est-à-dire que tous les phénomènes se classent en deux catégories, ceux qui n'existeraient pas s'il n'y avait pas de l'étendue ou de l'espace et ceux qui n'existeraient pas s'il n'y avait de la pensée. Les phénomènes subjectifs, tout ce qui relève de nos représentations et de notre volonté, mais aussi les sentiments et émotions. se rattachent pour Descartes à la pensée, entendue, on le voit, dans un sens très large. Mais tous les phénomènes matériels relèvent de l'étendue puisqu'ils ne se produiraient pas s'ils ne se produisaient pas dans l'étendue. C'est elle qui forme l'essence de la matière, et Descartes est si attaché à cette thèse qu'il va jusqu'à éliminer de sa mécanique la notion de force considérée par lui comme une idée obscure. En tout cas, ce qui s'affirme ici, c'est, comme chez Galilée, l'idée que la nature est partout la même dans son essence et que les lois de la physique doivent donc être respectées par tous les corps matériels. Cette fois, on voit naître une distinction tranchée entre la nature et l'esprit, ou le spirituel et le matériel. Mais, en même temps, la thèse cartésienne justifie par avance un second trait caractéristique de la science moderne. Si en effet la matière est dans son fond étendue, la connaissance de la matière sera immédiatement de nature géométrique : tout ce que la géométrie nous apprend de l'étendue, elle nous l'apprend également de la matière puisqu'il n'y a rien d'autre dans la matière que de l'étendue. Et, comme Descartes a par ailleurs trouvé avec la géométrie analytique le moyen d'associer systématiquement algèbre et géométrie, il parvient à justifier sans difficultés de principe l'application des

mathématiques à la connaissance de la nature. Avec lui, les mathématiques et en particulier la géométrie deviennent en principe le moyen d'exprimer les phénomènes naturels car Descartes a reconnu que nous pouvions coder en termes d'espace toutes les différences qui existent entre deux phénomènes. Nous devons entre autres à cet effort un traité de statique ou la découverte de la loi de la réfraction qui définit le rapport entre le sinus de l'angle d'incidence et celui de l'angle de réfraction. Mais Descartes n'en tirera pas parti pour construire une explication du monde

Sur ce point aussi, on pourrait poursuivre le parallèle entre les recherches de Descartes et celles de Galilée. Il revient à ce dernier d'avoir réussi à géométriser le mouvement des corps pesants et d'avoir ainsi introduit une idée de la connaissance scientifique qui n'avait pas cours avant lui. Aristote cherchait à comprendre un mouvement en se demandant quelles raisons internes un corps peut avoir pour se déplacer, et c'est pourquoi il répondait en disant que ce corps essaie par son déplacement de rejoindre son lieu naturel, le haut pour la fumée, le bas, c'est-à-dire le centre de la Terre, pour une pierre lâchée. Galilée met en œuvre un principe d'intelligibilité totalement différent. Partant de deux grandeurs primitives, l'espace et le temps, il s'efforce de dégager des relations de proportionnalité grâce auxquelles on pourra définir mathématiquement les lois auxquelles obéit un déplacement local. Comprendre physiquement, c'est donc dorénavant mettre un phénomène en relation avec d'autres phénomènes. dans le cadre de l'espace et du temps, c'est-à-dire à l'intérieur de la nature. Cette nouvelle méthode s'impose progressivement à tous pour deux raisons liées l'une à l'autre : tout d'abord elle obtient des résultats que rien ne peut contester, et, de plus, elle ouvre un champ indéfini de recherches empiriques au lieu de s'épuiser dans des discussions purement dialectiques. Parmi les résultats de Galilée qui devaient avoir la postérité la plus durable, je mentionnerai seulement la définition des systèmes inertiaux et l'affirmation de la conservation du mouvement uniforme en même temps que celle de la relativité du mouvement, ou encore la découverte que. dans le vide, tous les corps tombent à la même vitesse et la notion de mouvement accéléré.

Naturellement, je ne voudrais pas pour autant donner à croire que toutes ces innovations ont surgi dès le début sous leur forme achevée, celle que nous leur connaissons aujourd'hui. Galilée par exemple définissait d'abord le mouvement uniforme sans l'associer à la condition qu'il soit rectiligne. En faisant

de l'étendue l'essence de la matière, Descartes est obligé de nier l'existence du vide ou d'affirmer sans autre preuve l'infinité de l'univers : comme il y a partout de l'étendue, il y a partout de la matière. Mais c'est sans doute possible au XVIIe siècle que sont jetées les bases de ce qui deviendra la mécanique classique. Et ce travail a exigé un effort de réflexion indissolublement scientifique et philosophique dans la mesure où il n'était pas possible de le mener à bien sans une critique radicale de la représentation de l'univers et de la connaissance scientifique qui était celle des Anciens. C'est pourquoi je disais plus haut que cette période avait marqué un âge d'or pour les relations de la physique et de la philosophie.

La constitution de la mécanique se poursuit jusqu'à la fin du XVIIe siècle, plus exactement jusqu'en 1687, année au cours de laquelle Newton publie ses Principes mathématiques de philosophie naturelle, qui donnent à cette science sa forme achevée. Le XVIIIe et le XIX<sup>e</sup> siècles en exploiteront les résultats sans avoir à en altérer pendant longtemps les principes; en particulier on s'attachera à en exporter les notions fondamentales dans des domaines qui n'avaient pas été explorés par les fondateurs, comme d'un côté les phénomènes électriques et de l'autre les phénomènes de la chaleur, pour m'en tenir aux deux innovations principales qui débouchent, comme on sait, sur la constitution de l'électromagnétisme avec la synthèse de Maxwell et sur la mise au point difficultueuse de la thermodynamique.

Nous entrons ainsi dans une troisième période, celle qui commence en gros à la fin du XIXe siècle ou au début du XXe et dans laquelle nous vivons encore. Or cette période me paraît marquée par une double caractérisation que je serais tenté de résumer brièvement en disant que c'est une période au cours de laquelle la physique éprouve le besoin de se livrer à une critique philosophique de ses notions de base (l'espace, le temps par exemple, et, dans un autre domaine, la causalité) comme elle l'avait fait au début du XVII<sup>e</sup> siècle, mais sans que la philosophie soit en mesure de lui apporter une aide ou une contribution, et c'est ce qui fait la différence avec la crise précédente. Pourquoi en est-il maintenant ainsi? Parce que les philosophes ne sont plus en état de participer personnellement à l'avancement de la connaissance quand celle-ci repose sur des données théoriques qui ont atteint un degré élevé de spécialisation, un degré du reste si élevé que, même au sein de l'ensemble des physiciens, de plus en plus rares sont ceux qui maîtrisent la totalité du développement de leur discipline. S'il en est ainsi à l'intérieur même de cet ensemble, à plus forte raison en va-t-il de même pour ceux qui sont à l'extérieur.

Peut-être me permettrez-vous ici d'ouvrir une brève parenthèse pour regretter que, depuis plusieurs décennies, la formation donnée dans l'enseignement du Second degré n'ait pas fait grand chose pour remédier à ce divorce entre physique et philosophie, et ait même tendu à l'aggraver en isolant de plus en plus les études littéraires et les études scientifiques. Mais on ne saurait faire retomber la responsabilité de cet état de choses sur les seules décisions pédagogiques prises en France, car on constate que la situation n'est pas très différente dans d'autres pays : on assiste partout à une séparation regrettable entre les sciences ou du moins la pratique des sciences et la philosophie. Si j'ai introduit un léger bémol dans la phrase précédente en parlant de la pratique des sciences plutôt que des sciences, c'est pour tenir compte de l'apparition assez récente dans la philosophie d'une nouvelle discipline sous le nom d'épistémologie. C'est cette partie de la philosophie qui se propose d'étudier les conditions de possibilité de la connaissance scientifique, envisagée sous ses différentes formes, mathématigues, sciences de la nature, ou sciences humaines, pour m'en tenir à un classement traditionnel. Elle s'est développée à partir du milieu du XIXe siècle, soit entre les mains de penseurs de formation scientifique comme Auguste Comte (1798-1857), Augustin (1801-1877) ou Henri Cournot Poincaré (1854-1912), soit à partir de travaux de philosophes qui se sont donné la formation requise pour suivre les avancées de la science, et parmi lesquels je citerai, sans qu'il s'agisse d'un palmarès, les noms de Jean Cavaillès (1903-1944) pour les mathématiques ou de Gaston Bachelard (1884-1962) pour la physique et la chimie, deux épistémologues dont les œuvres sont prolongées dans la période contemporaine par les recherches de Gilles Granger.

#### 2. LA DISCUSSION SUR LES LOIS DE LA NATURE

Il est temps maintenant d'en venir à l'exposition d'un des problèmes philosophiques posés par le développement des sciences de la nature. Je ne saurais évidemment les passer tous en revue, et je me bornerai à en examiner un, dont le choix a, bien entendu, quelque chose d'arbitraire, mais qui me paraît assez central pour donner une idée des relations entre physique et philosophie.

#### 1. Le problème de Hume

Philosophe anglais (1711-1776), Hume

s'est fait connaître pour la critique dévastatrice qu'il a exercée sur la question de l'induction. On entend par induction la procédure qui consiste à passer d'une affirmation relative à quelques cas à une affirmation relative à tous les cas de même nature. Cette procédure est mise en œuvre chaque fois qu'on présente un énoncé de la physique comme une loi de la nature. Une loi est en effet caractérisée par deux propriétés, l'universalité et la nécessité. Dire qu'elle est universelle signifie qu'elle s'applique à tous les cas d'un même phénomène : dire qu'elle est nécessaire signifie que tous les cas auxquels elle s'applique ne peuvent pas se produire autrement que conformément à la loi en question. Un énoncé qui s'appliquerait à quelques cas d'un phénomène mais pas à tous ne serait pas considéré comme une loi : si certains corps en chute libre parcouraient un espace proportionnel au carré des temps de chute, et d'autres un espace proportionnel au cube de ces temps, on ne considérerait pas l'affirmation que e = 1/2 gt<sup>2</sup> comme la loi de la chute des corps, car elle ne serait ni universelle ni nécessaire puisque certains corps pourraient tomber en chute libre sans se conformer à cette affirmation.

J'ouvre ici une parenthèse pour dire qu'il faut bien voir où est la difficulté quand on parle de l'universalité et de la nécessité des lois. Supposez en effet que, dans la situation précédente (celle où e = kt² pour certains corps et e = kt³ pour d'autres), on découvre une propriété qui permette de classer les corps en deux groupes, l'un formé de ceux qui parcourent un espace proportionnel au carré des temps, et l'autre formé de ceux qui parcourent un espace proportionnel au cube des temps ; par exemple on découvrirait que font partie du premier groupe les corps électriquement neutres et du second les corps chargés d'électricité négative. Alors il suffirait de remplacer la loi unique que nous admettons aujourd'hui par deux énoncés plus compliqués puisqu'ils comporteraient une clause indiquant qu'on a affaire à des corps électriquement neutres ou non. On aurait alors deux lois de la chute des corps, mais dont chacune serait universellement et nécessairement valable pour tous les corps auxquels elle s'appliquerait, et la difficulté serait éliminée. C'est un peu ce qui s'est passé quand on a compris que la loi de composition des vitesses ne signifiait pas toujours qu'il suffisait d'additionner algébriquement vitesses, parce que, dans certains cas, il faut en outre tenir compte de la vitesse de la lumière : alors que, du XVIe au XIXº siècle, on n'avait qu'une loi de composition, aujourd'hui on en a pour ainsi dire deux qu'on applique selon que les deux vitesses sont petites relativement à la vitesse de la lumière ou

que l'une des deux est proche de celle de la lumière. Je ferme la parenthèse et reviens à la question de l'universalité et de la nécessité des lois.

Quand on dit qu'un énoncé qui s'appliquerait à quelques cas d'un phénomène et pas à tous ne serait pas une loi, ce qu'on oppose à la régularité que les lois introduisent dans la nature, c'est la situation dans laquelle nous serions si l'espace parcouru par un corps tombant en chute libre était proportionnel au cube du temps sans que nous puissions mettre cette observation en rapport avec une propriété quelconque du corps considéré ou avec une des conditions dans lesquelles l'observation aurait eu lieu. Nous avons un mot pour désigner cette situation, c'est le mot de hasard: nous dirions alors que l'espace parcouru varie au hasard, pour dire que nous sommes impuissants à le considérer comme une fonction définie une fois pour toutes du temps de la chute. Quand nous disons que  $e = 1/2 gt^2$ est une loi de la nature, nous affirmons donc que les corps qui tombent ne tombent pas n'importe comment, et qu'aucun corps ne saurait tomber sans respecter cette loi.

La question qui devient alors urgente, c'est celle de dire comment nous le savons, et ce que Hume a montré, c'est que nous n'avons pas de bonne réponse à cette question. Et la physique, plus généralement toute science de la nature, est ici dans une situation tout à fait exceptionnelle par rapport à tout autre ordre de connaissance.

S'il s'agissait de connaissance historique, on pourrait répondre à la guestion : Comment savez-vous que les choses se sont passées ainsi? en disant : consultez les témoins, ils disent tous la même chose, et le seul qui soit d'un avis différent avait des raisons particulières de le faire. Autrement dit, comme on a affaire à des événements du passé, on peut s'en remettre à des témoignages. Mais en physique, les choses se présentent autrement : quand on dit que tous les corps obéissent à une certaine loi, on ne veut pas parler des corps qui ont été observés dans le passé, mais aussi et peut-être surtout des corps qu'on observera à l'avenir car une loi physique doit permettre des prévisions. Or pour les corps qu'on observera à l'avenir, par définition, on ne peut pas s'appuyer sur des observations. D'où nous vient alors la certitude qu'ils se conformeront à la loi qu'ont respectée les corps dans le passé?

S'il s'agissait de connaissance mathématique, on ne serait pas dans le même embarras. Si on demandait à un mathématicien : comment savez-vous que la somme des angles de tous les triangles – je parle pour simplifier des triangles dans le plan euclidien – est égale à 180 degrés alors que vous n'avez eu affaire

qu'à un petit nombre de triangles ?. il pourrait répondre de manière satisfaisante à cette question. Il dirait en effet : ma certitude ne dépend pas des observations qui ont été faites sur les triangles dans le passé : elle dépend de constructions et de démonstrations en ce sens que, si on construit un triangle dans le plan euclidien, il est possible de démontrer que c'est une figure dont les trois angles valent 180 degrés. On le démontre, c'est-à-dire qu'on établit par les seules lois de la logique que l'égalité à 180 degrés de la somme des angles de cette figure dérive de ce qui a été admis comme vrai quand on a construit un triangle, quel qu'il soit quant à sa forme et à ses dimensions. Autrement dit, si vous construisez un triangle dans le plan euclidien, vous vous contrediriez en affirmant que la somme de ses angles est différente d'un angle plat, et c'est pourquoi vous pouvez être assuré par avance que cette propriété vaut pour n'importe quel triangle, où qu'il soit tracé, et à quelque moment du passé ou de l'avenir qu'il le soit. Mais quand il s'agit de physique, on ne peut plus faire ce genre de réponse : il est parfaitement possible en effet de concevoir un univers dans lequel les corps suivraient des lois différentes de celles qu'ils suivent en fait. Il n'y a pas de contradiction logique à se représenter que l'espace parcouru par un corps en chute libre n'est pas une fonction du carré des temps, mais, comme je disais plus haut, du cube des temps. Évidemment, ce monde serait différent du nôtre, et il faudrait, pour que mon hypothèse soit sérieuse, chercher quelles lois il faudrait modifier si on la mettait en vigueur et leur appliquer les modifications requises, mais on ne voit pas pourquoi il surgirait dans cette hypothèse une contradiction comparable à celle qui aurait lieu si on prétendait construire dans le plan euclidien un triangle dont la somme des angles ne serait pas 180 degrés. C'est ce qui explique que le physicien soit renvoyé à la vérification expérimentale de ses affirmations : il ne peut pas affirmer la vérité de ses lois sur des bases purement logiques, il doit s'en remettre à l'expérience pour s'assurer que la loi qu'il propose est bien celle que suivent les phénomènes

Si je reprends alors la double comparaison de sa situation avec celle du mathématicien et celle de l'historien, on voit maintenant qu'il se trouve dans une position particulièrement inconfortable. A la différence du mathématicien en effet, il doit recourir à un témoignage extérieur à lui, le témoignage de l'expérience, et, de ce point de vue, il est dans la même situation que l'historien. Mais, comme le mathématicien, il prétend que ses énoncés sont valables universellement, c'est-à-dire même pour des situations sur lesquelles il n'a

pas de témoignage, et, de ce point de vue, il n'est pas dans la situation de l'historien. Dans ces conditions, on voit que le problème de savoir sur quoi se fonde la vérité universelle reconnue aux énoncés du physicien est particulièrement difficile. La seule chose dont nous soyons sûrs est que tous les corps ont jusqu'à maintenant obéi aux lois que nous connaissons: mais cela nous donne-t-il la moindre raison d'affirmer que, à l'avenir, ils continueront à le faire?

A cette question, on a parfois répondu que oui, nous avons le droit de penser que ce qui s'est produit dans le passé se produira dans l'avenir parce que la nature suit un cours uniforme. Mais Hume a déjà remarqué que cette réponse reposait sur une pétition de principe. Dire que la nature suit un cours uniforme, c'est en effet précisément dire que, à tout moment, elle suit les mêmes lois. Or c'est précisément ce sur quoi portait la question : on ne peut donc pas invoquer le principe de l'uniformité du cours de la nature pour résoudre la question.

La conclusion de ces réflexions, c'est non pas qu'il faut renoncer à la science, mais plus modestement que nous ne savons pas sur quoi se fonde la vérité que nous accordons à ses affirmations. Or il est tout à fait frappant de voir que nous n'avons aujourd'hui pas plus de solution incontestable pour le problème de Hume qu'on n'en avait au XVIIIe siècle, mais que cela n'a pas empêché la science d'avancer considérablement depuis cette époque. Je voudrais dans ce qui suit essayer de donner une idée des principaux efforts qui ont été faits pour résoudre cette difficulté.

Et d'abord, celle de Hume lui-même. Il soutient quant à lui que notre croyance à l'uniformité du cours de la nature repose simplement sur l'habitude. Nous avons toujours vu le soleil se lever quelques heures après la tombée de la nuit ; il s'est ainsi formé en nous une habitude, celle qui consiste à attendre que le Soleil se lève quand nous voyons la nuit tomber. Il en va de même pour toutes les lois de la nature : nous v croyons parce que nous projetons sur le futur les résultats que nous avons toujours vu se produire dans le passé. Quant au sentiment de nécessité, il a la même origine : quand nous avons vu un phénomène se produire de façon répétée dans de multiples circonstances, cette répétition fait surgir dans notre esprit le sentiment d'une connexion entre ce phénomène et ces circonstances, et c'est ce sentiment qui forme la base de notre croyance à la nécessité. Autrement dit, Hume réduit les affirmations de l'universalité et de la nécessité des lois de la nature à la simple constatation d'une succession de phénomènes ou à la constatation d'une succession de deux propriétés dans un même phénomène. Cette réduction des

relations objectives à des constatations empiriques fait le fond de cette philosophie qu'on appelle empirisme.

2. La réponse de Kant

La réaction la plus connue à cette prise de position est celle de Kant. Kant a en effet tenté de restituer à la connaissance scientifique ses caractères nécessité et d'universalité. Pour y réussir, il va s'efforcer de retourner en quelque sorte l'argument de Hume. Ce dernier avait tenté de tout ramener à des constats empiriques de succession entre phénomènes, donnant naissance à des habitudes par lesquelles il prétendait expliquer d'où les lois de la nature tiraient l'universalité et la nécessité que nous leur accordons, mais qui étaient selon lui dépourvues de toute objectivité. Kant reprend cette analyse afin de montrer que nous ne pourrions même pas faire le constat empirique d'une succession de phénomènes si nous ne disposions pas de concepts universels et nécessaires. Pour le montrer, il prend l'exemple de la différence entre la perception d'une maison (c'est-à-dire d'un objet permanent) et la perception d'un bateau qui descend le cours d'un fleuve (c'est-àdire d'un événement qui implique succession). Quand je perçois une maison, je peux commencer par le toit et finir par la base, ou au contraire partir d'en bas et terminer en haut, je peux indifféremment promener mes regards de gauche à droite ou de droite à gauche, bref, rien ne me contraint à donner un ordre déterminé à mes perceptions, et, quel que soit l'ordre qu'elles suivent, j'aurai perçu la même maison. Quand en revanche, j'ai affaire à la perception d'un bateau qui descend le cours d'un fleuve, il en va autrement : je perçois d'abord le bateau en amont et ensuite en aval, et il est impossible que les choses se passent autrement. Si je commencais en percevant le bateau en aval et si je le percevais seulement ensuite en amont, c'est que je percevrais autre chose que ce dont je parle. non pas un bateau descendant le cours d'un fleuve, mais un bateau le remontant. Aussi longtemps qu'il s'agit bien d'un bateau qui descend le fleuve, je ne peux pas faire autrement que de le percevoir d'abord en amont et ensuite en aval. La perception d'un événement se fait donc selon un ordre déterminé, et déterminé par les relations de causalité qui jouent dans la production de cet événement et qui font que ce qui vient après est déterminé par ce qui est venu avant. On ne saurait donc, comme le croyait Hume, dire que nous affirmons une relation de causalité quand nous percevons une succession régulière, puisque la perception même de cette succession exige que nous fassions appel à une relation de causalité.

La causalité, que Kant appelle dans son vocabulaire une catégorie de l'entendement, fait partie avec d'autres notions, (il y en a douze en tout comme la notion de substance ou celle d'action réciproque), de la structure même de l'esprit humain. Personne ne pourrait percevoir un événement sans recourir à cette notion, et ainsi s'explique très simplement dans la perspective de Kant son caractère universel et nécessaire. La connaissance scientifique qui repose sur la mise en œuvre de ces catégories recouvre ainsi les caractères de nécessité et d'universalité dont l'analyse de Hume risquait de la priver. Mais il v un prix à paver pour bénéficier de cette solution du problème soulevé par Hume : c'est que toutes les notions qui restituent à la science universalité et nécessité sont inscrites selon Kant dans la structure même de l'esprit humain. Elles ne sont donc pas susceptibles de variation, alors que la science est, elle, en perpétuelle évolution. Aussi longtemps que cette évolution se fait à l'intérieur de certaines limites conceptuelles, elle n'entraîne pas de bouleversements théoriques, et ce fut à peu près le cas depuis l'époque de Kant jusque vers la fin du XIX<sup>e</sup> siècle ou le début du XXe. Mais, à partir de cette date, on a vu se développer des domaines de connaissance qui n'entraient que de plus en plus difficilement dans les cadres conceptuels antérieurement établis. Ce fut le cas notamment avec la Relativité restreinte, puis générale, qui entraîna une refonte complète des notions que l'humanité se faisait de l'espace et du temps, de la matière et de l'énergie. Ce fut également, et peut-être même plus encore, le cas avec la naissance de la Mécanique quantique, qui nous a obligés à donner aux lois physiques une forme probabiliste. Bref, ce qui est devenu évident depuis environ un siècle, c'est que nous ne pouvions plus faire reposer l'édifice de la science sur des structures permanentes de l'esprit humain, parce que les progrès de la connaissance entraînaient des restructurations profondes de toutes les façons de penser sur lesquelles nous nous reposions jusque là. Le point n'est pas que Kant s'est trompé dans l'idée qu'il se faisait par exemple de la causalité, et que, en remplacant cette idée par une autre, plus élaborée, plus sophistiquée, nous pourrions reprendre et élargir son analyse. Le point est qu'il est devenu impossible de croire que la connaissance dépende de la nature de l'esprit humain, quelle que soit la représentation qu'on se fait de cette nature, si souple, si élargie soit-elle.

C'est une thèse de ce genre que défendait Gaston Bachelard quand il intitulait un de ses principaux ouvrages Le Nouvel esprit scientifique (1934). Mais Bachelard n'a pas prolongé ses recherches vers le renouvellement du problème de l'induction. C'est un autre philosophe et épitémologue contemporain qui a proposé une nouvelle voie d'analyse pour cette question, je veux parler de K. Popper (1902-1994) et de son travail intitulé La Logique de la découverte scientifique (1934 également).

3. Une position contemporaine, le cas de Popper

Popper a profondément renouvelé la situation en partant des deux faits que i'ai rappelés plus haut : le fait qu'il n'a pas été donné de réponse satisfaisante au problème de Hume, et le fait que cela n'a pas pour autant entravé les progrès de la science, en particulier de la physique. Nous ne pouvons pas fonder les lois physiques sur l'induction, car, de la vérité reconnue à ces lois dans le passé, il ne suit pas logiquement qu'elles doivent être vraies à l'avenir. Mais nous avons quand même des lois physiques qui donnent satisfaction à la fois dans leur capacité d'expliquer les phénomènes et dans leur capacité de les prévoir. La seule conclusion que nous puissions selon Popper tirer de ce double fait, c'est que la vérité que nous reconnaissons aux lois de la science ne repose pas sur l'induction. Si nous les tenons pour universellement vraies, ce n'est pas parce que nous les avons toujours vérifiées dans le passé. La vérité des tests auxquels nous avons soumis ces lois ne garantit pas qu'elles soient vraies pour toujours. Si une loi est un énoncé qui prétend à l'universalité, un test positif, c'est-à-dire une expérience qui donne un résultat conforme à ce que prédit l'énoncé en question, ne garantit pas cette universalité. Et le résultat reste le même si on multiplie les tests positifs. En revanche, si on appelle test négatif une expérience qui donne un résultat différent de ce que prédisait l'énoncé qu'on essaie de valider, il faut reconnaître qu'un seul test négatif interdit de considérer un énoncé comme universellement valable, et donc interdit de le considérer comme une loi. Il y a donc une asymétrie entre la vérification et la falsification d'un énoncé, en ce sens qu'une expérience donnant des résultats conformes à ce qu'on attendait ne peut jamais lui conférer l'universalité nécessaire pour le transformer en loi, mais qu'une expérience donnant des résultats différents de ce qu'on attendait suffit à l'empêcher de recevoir valeur de loi. C'est là l'essence de ce qu'on appelle le falsificationnisme de Popper.

Naturellement, dans la pratique, il faut prendre toute sorte de précautions pour être certain que l'expérience a répondu par la négative. Il faut s'assurer de la sensibilité des appareils utilisés, il faut être sûr qu'on a fait l'expérience toutes choses égales d'ailleurs, c'est-à-dire qu'il ne s'est pas introduit par inadvertance de facteur étranger à

l'énoncé à vérifier. Mais si, toutes les précautions étant prises, on doit admettre que le résultat de l'expérience est négatif, alors il faut conclure que l'énoncé n'est pas une loi. Il reste d'ailleurs à savoir exactement, si c'est possible, ce qui en lui ne marche pas. et là aussi on se heurte à mille difficultés. Prenons un exemple célèbre, celui de l'expérience de Michelson sur la vitesse de la lumière. Michelson essayait de mettre en évidence la translation de la Terre autour du Soleil grâce aux propriétés de la lumière. Il construit un appareil qui permet de mesurer avec une extrême précision la vitesse à laquelle un faisceau lumineux parcourt deux bras perpendiculaires l'un à l'autre. L'un des bras est placé dans la direction de la vitesse de la Terre, l'autre lui est perpendiculaire. Si la vitesse de la lumière se compose avec celle de la Terre selon les lois de la Mécanique classique, l'un des trajets doit se faire à une vitesse différente de l'autre. Or l'expérience ne donne pas du tout ce résultat, et on a eu beau la répéter dans les conditions les plus diverses, en affinant les réglages, en perfectionnant l'appareil, en changeant de latitude et d'altitude, afin d'éliminer tout facteur étranger qui aurait pu influencer le résultat, rien n'y a fait. Il a bien fallu dès lors admettre que la vitesse de la lumière est exactement la même par rapport à l'observateur dans toutes les directions. On reconnaissait ainsi que l'expérience donnait une réponse négative. Il restait alors à déterminer ce que ce résultat négatif mettait en cause dans la théorie. Pendant 25 ans, les physiciens ont cherché la réponse. Ils ont reconsidéré les propriétés de la lumière, mais inscrites dans l'électromagnétisme de Maxwell, elles ont tenu bon contre toute tentative de les modifier. Ils ont été jusqu'à imaginer que les bras de l'appareil auraient changé de longueur en changeant d'orientation, mais cette hypothèse a été abandonnée. Il a fallu attendre Einstein (1905) pour comprendre enfin que ce qu'il fallait mettre en cause, c'était la formulation classique de la loi de composition des vitesses. Avec l'expérience de Michelson et ses suites, on a un bon exemple des difficultés auxquelles il faut faire face pour interpréter correctement un résultat expérimental contraire aux prévisions que permet une théorie.

Supposons alors que ces difficultés aient été franchies, et revenons au falsificationnisme de Popper. La conclusion qu'en tire Popper est que nous ne pourrons jamais prouver qu'une de nos affirmations est universellement vraie, mais que nous devons la considérer comme telle aussi longtemps que nous ne réussirons pas à lui opposer un test négatif, et, corrélativement, que toute

l'activité de recherche des savants doit être dirigée par le souci de mettre sans cesse en danger la théorie à laquelle il adhère. Les règles de procédure dans la science doivent être établies de manière à ce qu'aucun énoncé ne puisse être à l'abri de la critique rationnelle ou expérimentale. Car c'est seulement à ce prix que nous aurons une chance d'éliminer progressivement les erreurs et de nous approcher de la vérité.

#### 3. CONCLUSION

Pour conclure, je dirai que j'ai essayé dans ce rapide exposé de vous présenter un problème philosophique soulevé par la connaissance que les sciences nous donnent de la nature, et de vous en faire suivre l'évolution depuis le moment où il été posé jusqu'à nos Naturellement, je n'ai pu que proposer une esquisse des innombrables discussions auxquelles ce problème a donné lieu, et j'admets sans difficulté qu'on puisse me reprocher d'avoir mis de côté telle ou telle tentative, et même d'avoir considérablement simplifié les théories dont j'ai parlé. Mais mon objectif était seulement de donner une idée de ce que la philosophie se pose comme question à propos de la science, et la question à laquelle je me suis attaché est sans aucun doute une des plus importantes qu'on puisse se poser, puisque c'est celle de savoir quel sens on peut donner à l'idée qu'on se fait de la science quand on lui donne pour objectif de définir des lois universelles et nécessaires pour les phénomènes naturels.

Vous avez pu le constater, une question philosophique n'évolue pas comme une question scientifique, je veux dire par là qu'elle ne va pas d'une étape où elle est soulevée à une étape où elle est résolue, ou du moins considérée comme suffisamment éclaircie pour qu'on puisse passer à autre chose. En un certain sens, une question philosophique est moins faite pour être résolue que pour rester une source permanente d'inquiétude, une sorte d'irritation à laquelle on ne peut jamais échapper une fois qu'elle s'est déclarée. En particulier, dans les relations qu'elle entretient avec la science, il est clair que depuis le XVIIe siècle il n'est plus question de demander à la philosophie de résoudre elle-même des problèmes scientifiques. Il peut encore arriver que le savant se trouve, comme ce fut le cas pour Einstein, dans une situation où il doive remettre en question des idées aussi philosophiques que l'idée d'espace ou l'idée de temps, mais même dans ces circonstances il adoptera telle ou telle position non pas en fonction de critères philosophiques, mais en fonction de critères scientifiques. En ce sens, la philosophie est inutile puisqu'il ne lui appartient pas de déterminer ce que doit être la solution d'un problème scientifique. Mais, si elle est inutile, c'est aussi pour une seconde raison que j'exprimerais pour ma part en disant que, quelles que soient les difficultés que la philosophie soulève, celles-ci n'empêchent pas les problèmes de se résoudre sur le plan où ils se posent : c'est ainsi, on l'a vu, que, même si nous sommes incapables de dire clairement ce qu'est une loi scientifique, cette incapacité n'empêche pas la science d'élaborer des lois.

Je ne conclurai pas cependant, en ce qui me concerne, que la philosophie ne sert absolument à rien. D'abord parce que, si elle ne résout pas les problèmes des sciences, celles-ci réciproquement ne résolvent pas non plus les problèmes de la philosophie : aucun savant n'a par exemple pu dire de facon satisfaisante sur quoi repose notre confiance dans l'universalité des lois de la physique. La philosophie possède ainsi un domaine d'intervention spécifique, et qui ne peut être éliminé par les progrès des sciences. Mais, ensuite et surtout, parce que la philosophie assume une tâche qui lui appartient en propre et que j'essaierai de caractériser pour finir. Il me semble que, si vous prenez en considération les réflexions qui précèdent, vous pourrez constater que les problèmes philosophiques ne naissent pas à l'intérieur d'un domaine particulier de réflexion, comme peut l'être la physique ou, mieux encore, un secteur particulier de la physique. Les problèmes qui se posent ainsi se résolvent à l'intérieur du domaine auguel ils appartiennent. Mais nous ne vivons pas dans un seul et unique domaine, nous sommes par exemple des savants mais aussi des citoyens, nous avons à traiter des questions scientifiques mais aussi à résoudre des problèmes quotidiens. Et la difficulté que nous connaissons tous, c'est d'articuler ces différents domaines les uns avec les autres de facon à mettre un peu de cohérence dans notre vie et dans notre pensée. C'est ainsi que surgit la question que j'ai évoquée de l'universalité des lois de la nature. Nous savons bien que le passé ne répond pas pour l'avenir, et que rien ne garantit que ce qui a eu lieu jusqu'à maintenant ait toujours lieu à l'avenir. Cette certitude, nous pouvons l'avoir acquise dans le domaine de la vie et de l'expérience quotidiennes. Alors, il faut trouver un moyen de la concilier avec la définition que nous nous donnons dans un autre domaine de la science, quand nous disons qu'elle énonce les lois universelles de la nature. C'est là, je veux dire à l'intersection de ce que nous pensons de la science et de ce que nous avons appris de l'expérience, que naît et que s'enracine cette espèce particulière de réflexion qu'on appelle la philosophie.

opinion

établie.

Huygens

et le philosophe

mathématicien

G. W. Leibnitz, favori-

sait la mécanique

de l'éther plutôt

que celle de la

force. En consé-

quence, bien que

beaucoup de mathé-

maticiens continentaux

aient utilisé le travail

de Newton, l'acceptation

de celui-ci, donnant une

explication valable de

troisième décade du XVIIIe

# Newton: Accueil des Principes 6° panneau de l'exposition (disponible à l'ADASTA) consacrée à Isaac Newton

Traduction de Madame Suzanne GELY Suite aux numéros 46, 47, 48, 49 et 50 d'Auvergne-Sciences

La "Royal Society" avait applaudi les premiers travaux de Newton en Mécanique - la Théorie du Mouvement des corps - dès qu'elle parut à la fin de 1684. Edmond Halley entreprit de superviser l'impression des "Principes mathématiques de Physique", il les préfaça par une ode flatteuse à Newton et prépara un élogieux résumé pour James II, premier "roi marin" de la Grande Bretagne. Une autre personnalité navale, Samuel Pepys. Président de la Society" "Royal approuva officiellement la publicadu livre. Après ces importants débuts, les **Principes** furent salués avec fierté et admiration en Angleterre comme le triomphe scientifique de l'époque.

D'Edingburg, le mathémativersions of Newtonian mechanics began to be taught from cien David Grégory écrivit à Newton "pour le remercier d'avoir enseigné au monde ce que les Hommes n'auraient jamais espéré connaître". John Locke, le philosophe, établit, à cause de son admiration pour les Principes, une profonde amitié avec "l'incomparable Monsieur Newton". Le résumé

par Locke de l'ouvrage dans la Bibliothèque universelle (Mars 1688) fut probablement une première révélation pour les lecteurs étrangers.

The Royal Society had Sur le Continent, tandis que la finesse applauded Newton's first propositions in géométrique de Newton était mechanics - the Theory of the Motion of Bodies louée. l'idée de la force gravias soon as it saw them in late 1684. Edmond Halley tationnelle ne l'était pas. undertook to supervise the printing of the Philosophiae natura-Une lis principia mathematica; moreover, he prefaced to it an adulatory représentée par le phyode to Newton, and prepared a flattering summary for James II, sicien mathématicien Britain's first 'sailor King'. Another naval man, Samuel Pepys, as President Christian of the Royal Society, officially approved the book's publication. After these important preparations, the Principia was greeted with pride and admiration in England as the scientific triumph of the age. From Edinburgh the mathematician David Gregory wrote to thank Newton 'for having been at the pains to teach the world that which I never expected any man should have known'. John Locke, the philosopher, founded a deep friendship with the 'incomparable Mr Newton' on his admiration for the Principia. Locke's account of the book in the Bibliotheque universelle (March, 1688) was probably the first seen by foreign readers. On the Continent, while Newton's geometrical acuity was praised, the idea of gravi-

tational force was not. Established opinion, represented by the mathematical physicist Christiaan Huygens and the mathematical philosopher G.W. Leibniz, favoured aetherial, rather than force, mechanics. Accordingly, though many continental mathematicians used Newton's work, its acceptance as giving a true account of the universe was postponed to the third decade of the eighteenth century. In England, on the other hand, simpler l'Univers, fut remise à la

> early in the century, and practical demonstrations of its principles were presented to the public.

En Angleterre, par contre, les plus simples versions de la mécanique Newtonienne commencèrent à être enseignées dès le début du siècle et les démonstrations pratiques de ses principes furent présentées au public.

siècle.



# 16 Expositions Itinérantes disponibles

#### I. DÉCOUVERTE **DE L'UNIVERS**

#### Deux expositions d'Astronomie

Création (Astronomie et astrophysique) ADASTA-AAA

#### 1re exposition: DÉCOUVERTE DE L'UNIVERS

50 panneaux plastifiés 100 x 70 cm.

- Les instruments d'observation
- Où sommes-nous?
- Le système solaire, la lune, les éclipses
- Les galaxies
- Naissance et mort des étoiles
- Expériences d'astrophysique.

#### 2e exposition: COMÈTE DE HALLEY

60 x 82 cm

- 1 Halley 1986
- 2 Comment c'est fait
- 3 Comète Bennett
- 4 La peur des comètes
- 5 5 Comètes à la une
- 6 Halley de retour
- 7 On l'a déjà vue
- 8 Mais d'où viennent-elles ?
- 9 Et où vont-elles?
- 10 Rendez-vous à l'heure de Halley
- 11 Allons voir de plus près 12 - Pour découvrir l'Univers
- 13 La Mission Véga
- 14 Le survol de la Comète
- 15 La Mission geotto
- 16 La vision geotto
- 17 Mobilisation internationale
- 18 Pourquoi Halley

#### II. En prenant le métro LE TICKET D'ARCHIMÈDE

Création : Centre de vulgarisation de la connaissance

20 panneaux plastifiés (100 x 70 cm)

#### La couleur

1 - Pourquoi le ciel est bleu.

- 2 Où sont les tulipes bleues
- 3 Le secret du Caméléon
- 4 Pourquoi mes chaussettes sontelles rouges?
- 5 Un trou noir : c'est tout noir

#### L'eau

- 6 La ronde de l'eau
- 7 Pourquoi la mer est-elle salée ?
- 8 Maman, les petits bateaux
- 9 La recette du brouillard
- 10 La bouteille qui éclate au froid

- 11 Pourquoi les chats voient-ils la nuit?
- 12 Qu'est-ce qui fait danser les abeilles
- 13 Papillons amoureux
- 14 Qui peut plus que la puce?
- 15 L'hippocampe : un papa pas comme les autres

#### La météo

- 16 Coup de foudre
- 17 Dessine-moi une goutte de pluje
- 18 Ouel temps pour après-demain?
- 19 Les stars de la météo
- 20 La tornade ne manque pas d'air

#### III. LA FIGURE DE LA TERRE

Palais de la découverte et Ville de Caen

24 panneaux plastifiés (80 x 120 cm)

- 1 Présentation
- 2-3-4-5 Conflit d'idées entre Cartésiens et Newtoniens
- 6-7 Mesurer la Terre pour en connaître la forme
- 8 Itinéraire du voyage en Laponie
- 9 Ces Messieurs du Nord: Maupertuis, Celsius, Clairaut
- 10 Les Lapons
- 11 Trois Etapes du voyage
- 12 La triangulation sur le terrain
- 13 14 Principe de la triangulation
- 15 16 Détermination du méridien
- 17 Mesure de l'amplitude de l'arc
- 18 Calcul du degré du méridien
- 19 Vues d'aujourd'hui
- 20 L'expédition du Pérou
- 21 Bilan des opérations
- 22 La Terre aujourd'hui
- 23 Le Soleil de Minuit 24 - La géodésie spatiale

#### IV. DEUX EXPOSITIONS SUR L'ESPACE

Création Palais de la découverte CNES

#### 1re exposition:

18 panneaux plastifiés (100 x 70 cm)

1 - L'Espace à quoi ca sert?

#### Planète, Terre

- 2 L'Environnement
- 3 La vie de la Planète
- 4 Observer pour gérer

#### **Télécommunications**

- 5 30 ans de Révolution
- 6 L'apport du satellite
- 7 La localisation
- 8 Vers de nouvelles révolutions

#### Sciences

- 9 Voyager dans l'espace
- 10 Pesanteur zéro
- 11 Les Paradis observatoires

#### **Perspectives**

- 12 La lune plate-forme astronomique
- 13 Mars la Planète sœur
- 14 Le voyage vers Mars
- 15 Les trajectoires vers Mars
- 16 Imaginons encore

#### Moyens et Finalités

- 17 Le transport spatial
- 18 Un nouvel humanisme

#### 2<sup>e</sup> exposition:

17 panneaux plastifiés (100 x 70 cm)

- 1 En route pour l'Espace
- 2 Des outils pour l'Espace
- 3 De Diamant (1965) à la Famille Ariane
- 4 Pour l'Espace des Technologies de pointe
- 5 Centre spatial de Kourou (Guyane)
- 6 Une stratégie pour l'Espace
- 7 Un Espace utile
- 8 L'observation de la Terre
- 9 L'Espace au service des Hommes
- 10 Un Espace pour la science
- 11 Exploration du système solaire
- 12 L'Homme dans l'Espace
- 13 Un Espace pour demain
- 14 Ariane 5 mode d'emploi
- 15 L'avion spatial Hermès 16 - Ariane lançant Hermès
- 17 Et le Futur...

#### ••••

#### V. LE MONDE VIVANT : Deux expositions de biologie médicale

Création : Palais de la découverte INSERM

#### 1re exposition:

#### **VOYAGE AU CENTRE DES ARTÈRES**

24 panneaux plastifiés (100 x 70 cm)

- 1 Voyage au centre des artères
- 2 Une mer intérieure
- 3 Les habitants de la Mer Intérieure
- 4 Bon sang, mauvais sang
- 5 Naissance dans un os à moelle
- 6 Les canaux de la Mer Intérieure
- 7 Flux sans reflux au cœur de la Mer Intérieure
- 8 Le souffle régénérateur
- 9 La face cachée du foie
- 10 Deux écologistes en Mer Intérieure
- 11 Alerte rouge, ne pas fuir
- 12 Défense d'enter
- 13 Des défenses parfois défaillantes
- 14 Rouges ou Blancs..., globules malades
- 15 Les conséquences parasites d'un repas de sang
- 16 Un faux sang
- 17 Passeport pour un transfusé
- 18 Mortels dommages
- 19 Danger: Haute tension
- 20 Qui voit ses veines et ses artères, voit ses peines
- 21 Des mains qui n'ont pas dit leur dernier mot
- 22 L'union du vif et de l'artificiel
- 23 La Mer Intérieure en péril
- 24 La Recherche à le sang vif et le cœur à l'ouvrage.

#### 2<sup>e</sup> exposition:

#### DES VIRUS ET DES HOMMES

(68 cm x 1 m)

- 0 Des virus et des Hommes
- 1 Etranges poisons de tout le monde vivant
- 2 Comment est fait un virus
- 3 Quand les virus se multiplient dans les cellules
- 4 Les deux stratégies génétiques des virus
- 5 Les virus envahisseurs du corps Humain
- 6 Virus intestinal cause de paralysie
- 7 Ces infections sournoises des herpès virus
- 8 De l'hépatite B au Cancer du foie
- 9 Durée des maladies virales : une grande diversité
- 10 Des canards et des Hommes ; L'empire boréal de la grippe
- 11 Poliomyélite
- 12 Les relais de la rage
- 13 Un virus, un moustique, une fièvre tropicale
- 14 Un milliard de foies dans le monde : l'hépatite B
- 15 VIH et Sida
- 16 Sur la variole, le triomphe d'une vaccination

- 17 Lutte contre les virus : stratégies chimiques
- 18 Renforcer les défenses naturelles antivirales
- 19 Contre les virus, la meilleure préventions, le vaccin
- 20 La vaccination antivirale

# VI. HISTOIRE

## DES SCIENCES

#### 1re exposition:

#### LES SAVANTS DE LA RÉVOLUTION

Création CNRS, 1989

- 1 Rôle des Scientifiques pendant la Révolution
- 2 3 Condorcet (philosophe)
- 4 5 Lavoisier (chimiste)
- 6 7 Bailly (astronome)
- 8 Monge (mathématicien)
- 9 Guyton le Morveau (chimiste)
- 10 De Lalande (astronome)
- 11 Portal (médecin)
- 12 Le Collège de France sous l'Ancien Régime
- 13 Le Collège de France et la Révolution
- 14-15 16 Muséum d'Histoire Naturelle
- 17 Création de la Ménagerie
- 18 Protection du Patrimoine
- 19 Institut national des Sciences et des Arts
- 20 Conservatoire National des Arts et Métiers
- 21 Ecole normale de l'an III
- 22 Ecole Polytechnique
- 23 L'Enseignement à la veille de la Révolution
- 24 Les grands principes scolaires de la Révolution
- 25 L'idéologie pédagogique révolutionnaire
- 26 Le testament scolaire de la convention
- 27 Le latin, le français et les sciences
- 28 29 La Médecine
- 30 31 la Mesure de la Méridienne
- 32 Le système métrique décimal
- 33 Les aérostats
- 34 Le Télégraphe de Chappe

#### 2° exposition: PASTEUR

A l'occasion du centenaire de la mort de Pasteur

Création Institut Pasteur

Avec un film vidéo "vie et œuvre de Pasteur"

#### 14 panneaux plastifiés 100 x 78 cm

- 1 Famille de Louis Pasteur
- 2 1847 De la cristallographie à la dissymétrie moléculaire
- 3 4 1862 Etude des fermentations
- 5 1863 Etude sur les maladies des vins
- 6 1865 Etudes sur les maladies des vers à soie.
- 7 1871 Travaux sur la bière

- 8 9 1877 Maladies infectieuses de l'animal et de l'Homme
- 10 11 1885 Prophylaxie de la rage
- 12 13 La gloire
- 14 L'institut Pasteur.

#### 3<sup>e</sup> exposition:

#### DÉCOUVERTE DE LA RADIOACTIVITÉ

Création SFEN 1996

#### 11 panneaux plastifiés (100 x 70 cm)

- 1 2 Henri Becquerel et sa famille
- 3 Pierre Curie et ses découvertes
- 4 5 Marie Sklodowska en Pologne, à Paris
- 5 6 Pierre et Marie Curie (1885 1903 / 1903 1906)
- 7 Marie Curie pendant la guerre 1914 - 1918
- 8 La dernière période :1920 1934
- 9 10 11 Hommages philatéliques à Marie Curie

Deux vidéos sur la radios sur la radioactivité.

#### 4° exposition : LES PRINCIPES DE NEWTON (en anglais)

- 1 Historical Background to Principia
- 2 Contest for Principia in the 17 th Century
- 3 Newton's life before Principia
- 4 Writing Principia
- 5 Content and Argument of Principia
- 6 Reception of Principia
- 7 Newton's life after Principia
- 8 Principia in the 18 th Century
- 9 Principia in the 19 th Century
- 10 Principia the 20 th Century

# VII. LE RADON

# VIII. LES DÉCHETS

#### IX. LA MACHINE ARITHMÉTIQUE

*Création : Adasta et Association de gestion des Pascalines.* 

- 1 2 Les quatre machines du musée des Arts et Métiers
- 3 Les deux machines du Musée du Ranquet, Clermont-Ferrand
- 4 Les trois autres répertoriées (Dresde, Parcé, IBM)
- 5 La lettre de Ch. Bellair à Ch. Huygens
- 6 Le recueil des machines et l'Encyclopédie
- 7 Une machine complexe
- 8 Le sautoir
- 9 l'addition
- 10 La soustraction, la multiplication, la division

#### CASSETTES VIDÉO DE L'ADASTA

- A la poursuite du nombre  $\pi$
- · Airbus 20 ans déjà
- Astronomia
- Conférence sur les composants électroniques
- Depuis que le monde est monde (radioactivité naturelle)
- Expériences
- Hubert Reeves
- Initiation à la radioactivité
- L'Auvergne (A l'heure du Monde)
- L'ordre et le désordre dans la matière
- La géodésie 3000

- La géodésie par GPS
- La qualité de l'air, ça roule!
- La radioactivité en image
- La reconnaissance moléculaire
- Le Charbon, visite de la mine
- Le Nucléaire
- Les 6000 yeux de spot (images satellitaires)
- Naissance cristalline
- Naissance d'une carte
- Pasteur, regards d'aujourd'hui
- Planète Cousteau : La grande aventure de la mer
- Sur les pas de la Condamine (mesure des méridiens terrestres)
- Vivre dans l'espace (vie d'un spationaute)

- Siderurgite aiguë (sidérurgie)
- Sur le fil de la lame (fabrication des couteaux)
- De l'énergie (diapositives, livrets, cassettes)
- Elf Aquitaine à la une (pétrole)
- Le geste verre, un bon geste pour protéger l'environnement.
- La lettre de Jean (Prévention des toxicomanies)

# CD-ROM

- Alcool et Prévention
- Temps mesurés, temps démesurés
- SOHO Exploring the sun (en anglais, images et textes sur le soleil)
- Transports du XXI<sup>e</sup> siècle

# Utilisation du planétarium de l'ADASTA

L'ADASTA possède un planétarium démontable sous lequel on peut accueillir une quinzaine d'adultes ou bien entre 20 et 30 enfants.

Ce planétarium permet de simuler le mouvement apparent de la voûte céleste, d'expliquer le repérage dans le ciel, la durée respective des jours et des nuits selon les saisons, les positions variables des planètes et de la Lune, de présenter le ciel vu sous d'autres latitudes en mettant en évidence les conséquences sur la durée du jour et les différences climatiques......

Toute personne intéressée pourra venir chercher ce planétarium démontable à condition d'avoir assisté à la séance au cours de laquelle auront été expliqués montage, utilisation et démontage. Cette séance aura lieu le mercredi 30 janvier de 14 h à 17 h au siège de l'ADASTA.

Si vous êtes intéressé(e) faites-vous inscrire le plus tôt possible en téléphonant à l'ADASTA. Le nombre de personnes est limité à 15.

Ensuite vous pourrez emprunter le planétarium en réservant une période de votre choix. L'adhésion à titre collectif à l'ADASTA (80 €) donne droit au prêt gratuit du planétarium.

Pour tout adhérent individuel : prêt d'une semaine 76 €, semaines supplémentaires 38 €. Pour les non-adhérents, le tarif précédent est majoré de 50 %.

# CONFÉRENCES ET VISITES Du 4° trimestre 2001 et de l'année 2002

#### 1. CONFÉRENCES

- Mercredi 26 septembre 2001
   Monsieur Jean-Claude Pariente
   La Philosophie et la Physique
- Mercredi 17 octobre 2001
   Monsieur Michel Naranjo
   Epistémologie des Sciences de l'Artificiel
- Mercredi 21 novembre 2001
   Monsieur Jean-Léon Irigaray
   Les Biomatériaux

Leurs caractérisations et leur devenir dans les applications biomédicales.

- Mercredi 12 décembre 2001
   Monsieur Jean-Pierre Dufaure
   Les cellules souches et l'exploitation de leurs propriétés morphogénétiques.
- Mercredi 23 janvier 2002 Monsieur Paul Avan

#### Le cerveau est-il un bon physicien?

Mercredi 6 février 2002
 Monsieur Jean-Pierre Carroué
 La géologie de la nouvelle
 Calédonie et ses gisements de
 Nickel

Mercredi 13 mars 2002
 Monsieur Jean-Claude Montret
 Le point sur la recherche en

Le point sur la recherche en physique Corpusculaire à Clermont-Ferrand

• Avril 2002

#### Le volcanisme

• Mercredi 25 septembre 2002 Monsieur Roger Vessière

#### Le carbone dans tous ses états

• Mercredi 16 octobre 2002 Monsieur Jean-Pierre Grolier

#### Thermodynamique (Titre à définir)

• Novembre 2002 Monsieur Yves-Jean Bignon **Les biopuces** 

#### 2. UNIVERSITÉ EUROPÉENNE D'ÉTÉ 2002

A la période des Pascalines en juin 2002 ; durée 10 jours.

L'ADASTA est invité à être partenaire avec le CUST et le SMTC sous réserve de la labélisation du Ministère de l'Education Nationale.

Administrateur : Monsieur Michel Naranjo Thème : Transport Urbain des personnes

#### 3. VISITES

Visite du service de Métrologie de l'AIA (14 novembre 2001 à 14 h 00)

Visite du service de fécondation in vitro de Clermont-Ferrand ou de Lyon

Visite de la Cathédrale de Clermont-Ferrand

Visite des jardins de la ville de Clermont-Ferrand en mai 2002

Visite de l'INRA

Visite de la SEITA de Riom

Visite de Vulcania avant ouverture.

Visite de l'Institut Mérieux à Lyon : un laboratoire de fabrication de sérums et vaccins.



# Les jeunes pousses de l'ADASTA

Sous ce vocable, l'ADASTA propose, à de jeunes enfants de 7 à 11 ans, et sous la direction de Madame Pierrette Tourreix et de Monsieur Jean-Claude Capelani, des activités expérimentales scientifiques.

Cette orientation est en accord avec les objectifs du groupe scientifique et technique du Rectorat de l'Académie de Clermont-Ferrand, à savoir développer l'enseignement des sciences au niveau scolaire et faire évoluer l'image des sciences auprès du public.

Des réunions de ce groupe, auxquelles a participé Monsieur Capelani, ont eu lieu au Rectorat les 27 avril, 29 juin et 14 septembre 2001 et ont permis de préciser ces objectifs. L'ADASTA propose aux enfants de :

- S'instruire en s'amusant
- Voir, réfléchir, comprendre
- Jouer avec l'air, l'eau, la lumière, le papier
- Acquérir du savoir-faire avec des objets quotidiens
- Fabriquer des objets simples
- Visiter des musées ou des expositions

Les animations scientifiques se dérouleront de la manière suivante :

Lieu: ADASTA 19 Rue de Bien-Assis 63100 CLERMONT-FD

Jour: Mercredi Après-Midi à partir de 14 h

**Durée**: 2 h à 2 h 30

Public : Enfants de l'Ecole Primaire de 7 à 11 ans

**Encadrement:** 

- Animateurs scientifiques de l'ADASTA
- Elèves de Collège
- Parents

**Fréquence :** Un mercredi par mois Calendrier de l'année 2001-2002

mercredi 7 novembre 2001

mercredi 5 décembre 2001

mercredi 9 janvier 2002

mercredi 6 février 2002

mercredi 6 mars 2002

mercredi 3 avril 2002

mercredi 15 mai 2002

mercredi 5 juin 2002

mercredi 5 juin 2002

**Coût :** l'Adhésion à l'Association : 26 € soit 170, 55 F Cette adhésion donne accès aux activités de l'ADASTA et à la revue Auvergne-Sciences.

RENSEIGNEMENTS et INSCRIPTION:

à l'ADASTA au 04 73 92 12 24

ou à Madame Tourreix

au 04 73 35 97 71

# L'EXPÉRIMENTATION

Celle-ci sera faite par les enfants eux-mêmes

# LA RÉALISATION

La réalisation d'objets simples ou de jeux qui mettent en évidence ou utilisent le phénomène expérimenté.

Les enfants emporteront leurs fabrications et pourront ainsi jouer avec ou les utiliser chez eux.

Ponctuellement des visites de musées ou d'expositions seront organisées.

Les thèmes abordés seront déterminés en fonction de l'âge et de l'éveil des enfants.

# Quelques fabrications qui seront réalisées avec les enfants.

- La fontaine de Héron
- Un ludion
- Un four solaire
- Un piège à soleil
- Un thermomètre à alcool
- Un labyrinthe pour pomme de terre
- La carotte grimpante
- Un jardin en bouteille
- La cithare et la monocorde
- L'encre invisible, message secret
- Un périscope
- Un kaléidoscope
- Un moulinet
- Une montgolfière
- Le parachute
- Un véhicule à réaction
- Un cerf-volant
- Un sablier
- Un cadran solaire
- La pile voltaïque
- Un nervosimètre
- Un quiz
- Un moteur électrique
- De la pâte à papier
- Tisser et teindre
- Un bateau à aubes.

## Quelques expériences

#### I L'AIR

- 1. Le verre est-il vide?
- 2. Qu'est-ce qui fait rouiller la paille de fer ?
- 3. Comment sortir, sans se mouiller les doigts une pièce de 1 Franc placée dans l'eau d'une soucoupe
- 4. Mettre en évidence la pression atmosphérique
- 5. Le son est dû à des vibrations de l'air
- 6. L'air chauffé se dilate
- 7. Expériences : sur la pression atmosphérique

### II L'EAU

- 1. La surface de l'eau
- a) Une fleur qui s'ouvre sur l'eau
- b) Faire flotter des trombones
- 2. L'eau grimpeuse
- 3. De l'eau sale à l'eau propre
- 4. La pression de l'eau
- a) Un sous-marin ou ludion
- b) Expérience de la pression en profondeur
- c) Faire nager un œuf dans l'eau
- 5. La poussée d'Archimède
- 6. Les vases communicants
- 7. Les différents états de l'eau
- 8. L'eau est un excellent solvant
- 9. Les bulles savantes
- 10. Un iceberg dans le verre
- 11. Des nuages en bouteille

# III LA LUMIÈRE

- 1. Les miroirs
- a) Les images virtuelles
- b) Le kaléidoscope
- 2. La réfraction de la lumière
- 3. Composition des couleurs et décomposition de la lumière blanche
- 4. Les plantes et la lumière
- 5. Les illusions d'optique
- 6. Voir en relief

# IV LES AIMANTS

- 1. Aimants : différentes sortes
- 2. Fabriquer un aimant
- 3. Les électro-aimants
- 4. L'aimant brisé
- 5. Lignes de champ d'un barreau aimanté
- 6. Champ magnétique des courants
- 7. Utilisation de la boussole

# V ÉLECTRICITÉ

- 1. Electricité statique
- 2. Le courant électrique
- 3. Isolants, conducteurs.
- 4. Déviation de l'aiguille aimantée
- 5. Déplacement d'un aimant devant une bobine de fil électrique
- 6. Montage en série, montage en dérivation
- 7. Visualisation à l'oscilloscope
- 8. Les piles

# VI MÉCANIQUE

- 1. L'équilibre
- 2. Oscillations forcées
- 3. Forces centripète et centrifuge
- 4. Le yo-yo
- 5. Des leviers

#### VII LE CHAUD ET LE FROID

- 1. Conduire et conserver la chaleur
- 2. La température, les thermomètres
- 3. Les dilatations des solides, des liquides, des gaz

### VIII CHIMIE ALIMENTAIRE

- 1. Acides et bases
- 2. Indicateurs colorés
- 3. Charbon de sucre
- 4. Recherche de l'eau dans les aliments avec le sulfate de cuivre

# IX CHIMIE

- 1. Combustion du fer
- 2. Pyrolyse du bois
- 3. Troubler l'eau de chaux
- 4. La fumée du tabac et ses dangers
- 5. Quelques électrolyses : de l'eau, de l'eau salée, du sulfate de cuivre...

## X ASTRONOMIE

Initiation à l'aide d'un planétarium

N.B. Ces expériences ont été réalisées par Madame Gély de 1991 à 1993 sous le patronage de l'ADASTA



# Première séance des jeunes pousses de l'ADASTA



Mercredi 7 novembre 2001 "Les jeunes pousses de l'ADASTA" ont vu le jour. En effet 11 enfants de 6 à 11 ans sont venus dans les locaux de l'ADASTA pour s'initier aux sciences tout en s'amusant. L'encadrement se composait de 4 animateurs de l'ADASTA et de 3 jeunes monitrices collégienne ou lycéenne.

Pour cette première séance "les piles" étaient à l'ordre du jour.

Tout d'abord les enfants ont constaté qu'il était possible de faire briller une diode en l'alimentant avec une pile au citron. Ensuite dans des pots de yaourts, ils ont fait eux-mêmes leur pile au vinaigre. Quelle joie lorsque la diode s'allume!

Comme Monsieur Volta en 1800, "nos jeunes pousses" ont fabriqué leur "première pile transportable". (Du cuivre, du zinc, et du tissu imbibé de vinaigre; mais aussi des pièces jaunes, du papier d'aluminium et de l'essuie-tout imbibé de vinaigre).

Pas besoin de matériel sophistiqué et coûteux pour faire des sciences.

L'ordinateur n'a pas été oublié pour autant et chaque enfant a manipulé la souris selon les directives d'une monitrice expérimentée.

La motivation des "jeunes pousses" était évidente et nous ne doutons pas que quelques parents ont dû eux aussi s'intéresser malgré eux aux diodes, électrodes et à Volta.

Prochain rendez-vous le 9 JANVIER 2002 à 14 h dans les locaux de l'ADASTA



Animateurs: Pierrette Tourreix, Jean-Claude Capelani, Bernard Ragout, Guy Robert.

Montrices: Maëlle Chevallier, Mélanie Tixier, Mathilde Tourreix Jeunes Pousses: Valentin Aurine, Juliette Azzopardi, Marie Balas,

Loris Borel, Eva Charpotier, Enguerrand Chevallier, Lisenn Chevallier, Quitterie Morizot, Marine Tixier