

AUVERGNE

Sciences

N° 66 - juin 2007

.....

L'EXPÉRIENCE DE PASCAL

**LA PHYSIQUE DE L'OREILLE
ET LA CHASSE AUX MOLÉCULES**

**UNE EXTRAORDINAIRE NANOMACHINE :
L'ATP - SYNTHASE**

**DU MOUVEMENT PERPÉTUEL
AU DÉFI ÉNERGETIQUE**

.....

BULLETIN DE L'ADASTA

ASSOCIATION POUR LE DÉVELOPPEMENT DE L'ANIMATION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE EN AUVERGNE

éditorial



Parmi les handicaps touchant les très jeunes enfants, les surdités doivent être dépistées et diagnostiquées le plus tôt possible, sinon ils risquent de ne pas pouvoir développer une connaissance suffisante de leur langue maternelle. Rappelons qu'elles atteignent deux enfants sur mille. Le Laboratoire de Biophysique Sensorielle, EA 2667 de la Faculté de Médecine à l'Université d'Auvergne porte un effort particulier à l'identification précoce de nouveaux types de surdités : dans l'audition humaine, les anciens modèles proposés par des physiiciens (Helmholtz, Gold) et affinés tout au long des décennies par de nombreuses équipes médicales, présentent encore de l'intérêt pour des surdités classiques d'origine cochléaire où la solution efficace consiste en un appareil amplificateur. Mais la recherche est tournée maintenant du côté moléculaire.

Le **Professeur Paul Avan** et son équipe ont montré que lorsque l'on combine les connaissances des physiiciens de l'oreille avec celles des physiologistes moléculaires et des cliniciens ORL, des avancées rapides décisives ont des retombées immédiates dans le domaine de la prise en charge des surdités. C'est le cas des surdités dues à un déficit d'otoférline où les enfants sourds de naissance pourront être appareillés par des implants cochléaires avec stimulations directes des fibres nerveuses auditives. C'est ainsi qu'**Auvergne Sciences** est heureuse de présenter dans ses pages la description de cette recherche issue des laboratoires universitaires de Clermont-Ferrand et ayant atteint un niveau international, non seulement par l'importance et la qualité des résultats, mais aussi par les nombreuses collaborations nationales et européennes. Notons également l'obstination et la rigueur des méthodes expérimentales, allant jusqu'à recueillir des données auprès de patients dans des isolats géographiques situés dans des zones économiquement et politiquement très difficiles au Moyen Orient.

Qui a peur des nanotechnologies ? Certainement pas **Georges Anton** qui, en tant que **chimiste confirmé**, nous présente une extraordinaire nanobiomachine appelée **ATP-synthase**. Dans son article il nous montre l'impressionnante organisation biologique et nous fait partager la beauté et toute la complexité des phénomènes liés à la Vie. Mais il nous encourage aussi à prendre la règle et le compas pour tenter l'aventure de la **quadrature du cercle** ! Une autre utopie historique est le **mouvement perpétuel** et le **physicien Antoine Moreau** nous montre en quoi la flèche du temps et l'énergie sont intimement et statistiquement liées. Son article favorise la compréhension des grandes propriétés de l'énergie.

L'année scolaire prend fin et les **"Jeunes Pousses" de l'ADASTA** ont bouclé une année d'activité scientifique très fertile en connaissances nouvelles acquises lors des séances de travaux pratiques, ainsi que lors des visites de sites scientifiques et de participation à des expositions. Les photos témoignent de leur enthousiasme, à Polytech' Clermont, entre autres, au cours de leur après-midi d'initiation aux métiers de la métallurgie. Bonnes vacances à tous.

Michel NARANJO,
Président de l'ADASTA

Merci à nos sponsors



Comité de rédaction de la Revue Auvergne-Sciences

Président : Paul Avan

Rédacteur en chef : Philippe Choisel

Membres : Jocelyne Allée, Georges Anton, Vincent Barra,

Jean-Claude Capelani, Jean Chandezon, Luc Dettwiller,

Paul-Louis Hennequin, Michel Naranjo, Annie Ville.

Photo de couverture : Clermont-Ferrand : itinéraire de l'expérience de Pascal du jardin de Minimes, actuellement la place de Jaude, au sommet du Puy de Dôme (photo de J. Chandezon) (Ce n'est pas un baromètre géant qui est placé au sommet du Puy de Dôme mais une antenne de télévision).

Remerciement également aux auteurs des autres photos.

Impression : Imprimerie Porcu - Cournon d'Auvergne

Sommaire

La physique de l'oreille et la chasse aux molécules	3
Une extraordinaire nanomachine : l'ATP - Synthase	11
L'expérience de Pascal	15
Du mouvement perpétuel au défi énergétique	21
La quadrature du cercle	26
Le CUST est devenu Polytech' Clermont-Ferrand	27
Jeunes Pousses	28
Activités et infos	31

La physique de l'oreille et la chasse aux molécules

Par Paul AVAN

Laboratoire de Biophysique sensorielle (EA 2667),
Faculté de Médecine de Clermont-Ferrand, Université d'Auvergne

RESUME : Les premières approches décisives quant à la compréhension des mécanismes de l'audition ont été basées sur l'observation microscopique, lorsque Hermann von Helmholtz a proposé son modèle de la cochlée comme une batterie de résonateurs alignés le long de la membrane basilaire cochléaire, et ce modèle, bien que vieux d'un siècle et demi, affiné par Békésy dans les années 1930-60, présente encore de l'intérêt. La deuxième étape décisive est encore venue d'un physicien, Thomas Gold, avec sa proposition révolutionnaire en 1948 d'une cochlée active, émettrice et pas seulement réceptrice de sons : il a cependant fallu près de 40 ans pour que l'observation, toujours à l'échelle cellulaire, démontre le bien-fondé de la thèse de Gold en prenant en flagrant délit les cellules émettrices.

Désormais, l'enquête est moléculaire. Après l'identification de la molécule qui confère leur aptitude unique aux cellules émettrices de son, des dizaines d'autres protéines sont en cours d'identification. Une fois identifiées, le plus souvent trahies par leur implication dans une surdité génétique, le challenge reste entier: quel est leur rôle dans la physique du système ? Chaque problème requiert une combinaison unique de méthodes d'investigation. Quelques exemples récents sont illustrés dans cet article, dans lesquels nous avons pu identifier une catégorie de causes nouvelles de surdités. Pour réhabiliter celles-ci, les outils actuels d'appareillage sont parfois très efficaces, parfois moins. Il est donc d'autant plus important de rechercher plus systématiquement

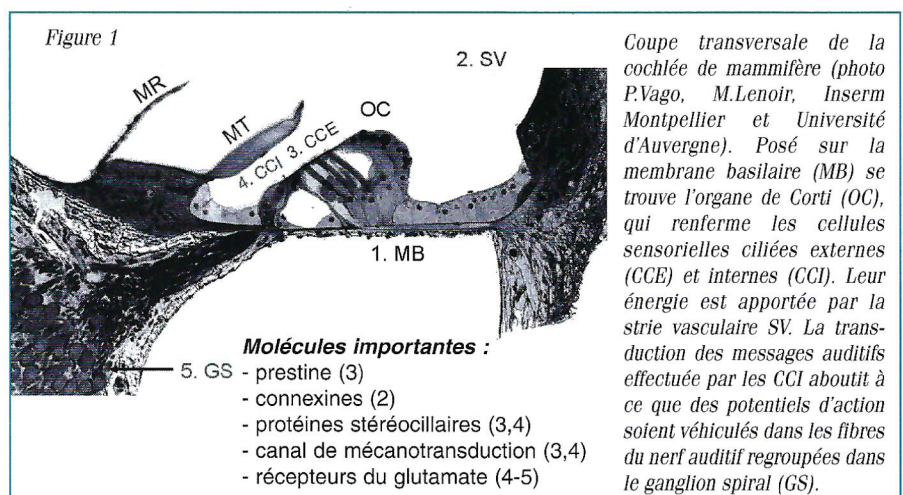
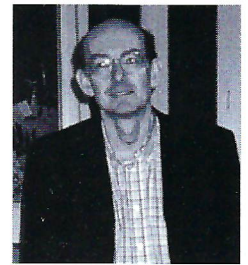
ces profils nouveaux de surdité. Les molécules otoferline et pejkavine impliquées ici participent à la construction du message neural et à son transport. Lorsqu'elles sont absentes ou modifiées, le traitement micromécanique des sons par la cochlée n'est pas affecté et l'appareillage conventionnel qui a pour but de compenser l'absence d'un tel traitement est peu, voire pas du tout efficace. Les études en cours démontrent que les implants cochléaires qui stimulent directement les fibres nerveuses auditives compensent mieux les déficits dus à une absence d'otoferline. Pour la pejkavine, l'étude reste à faire.

INTRODUCTION : l'audition et ses codages

Le système auditif est très complexe, formé d'une succession de structures qui transmettent puis codent les vibrations sonores (oreille externe puis membrane tympanique et oreille moyenne). Les vibrations sont transformées en signaux électriques au

niveau des récepteurs auditifs de la cochlée (fig.1, étapes 3 et 4), dans l'oreille interne. Cette étape est appelée transduction et le signal auditif change de nature : de vibratoire il est devenu électrique. Dans un premier temps, le signal électrique qui constitue un potentiel de récepteur a une allure temporelle analogue à celle du son qui l'a produit : un son pur, qui correspond à une onde de pression acoustique sinusoïdale, produit un potentiel (dit « microphonique cochléaire ») également sinusoïdal, pratiquement synchrone et d'amplitude sensiblement proportionnelle.

Le potentiel de récepteur est ensuite codé de sorte que le message auditif se retrouve sous forme d'impulsions électriques dans les neurones du nerf auditif (étape 5 de la fig.1) : les neurones véhiculent en effet des potentiels d'action, équivalents en sciences de la vie des bits informatiques issus de la numérisation d'un signal analogique : la présence d'un potentiel d'action équivaut à un 1 et son absence à un 0. Les potentiels



d'action se propagent d'une extrémité à l'autre d'un neurone avec une vitesse de conduction donnée, caractéristique du neurone. A plusieurs niveaux du système nerveux auditif, les neurones arrivent dans des noyaux où ils entrent en contact avec d'autres neurones qui prennent le relais. L'information auditive est ainsi progressivement analysée et interprétée.

Donnons un exemple concret mais « simple » d'une analyse effectuée par le système auditif au niveau de noyaux du tronc cérébral constituant le complexe olivaire supérieur. Une fonction importante de l'audition, qui participe aux phénomènes de stéréophonie, est la localisation d'une source sonore. Un élément clé de la localisation dans le plan horizontal est le fait que le son parvient plus tôt à l'oreille située du côté de la source, qu'à l'oreille opposée. Le retard est relié à l'angle que forme la direction de la source avec le plan de symétrie de la tête, et ce de manière monotone ne dépendant que de la forme exacte de la tête. Mesurer le retard revient à connaître la direction de la source (avec toutefois une ambiguïté devant/derrière, traitée d'une autre manière). Cette mesure suppose que les deux oreilles internes sont à l'origine de potentiels d'action aussi parfaitement synchrones du son émis que possible et que les deux voies nerveuses véhiculent ces potentiels d'action au complexe olivaire supérieur à vitesse fixe afin de ne pas distordre l'information temporelle. Si on admet que des neurones issus de l'oreille droite et de l'oreille gauche convergent vers un groupe de neurones du complexe olivaire supérieur, on peut concevoir que ce dernier va être en mesure d'effectuer le calcul du délai entre les voies droite et gauche et en extraire un signal qui contiendra l'information de localisation. *[En fait les neurones sont incapables de calculer un délai, ils ne « savent » que détecter des coïncidences : arrivée simultanée d'influx de droite et de gauche... il faut donc imaginer une méthode qui permette de retarder plus ou moins les influx d'un côté par rapport à l'autre pour transformer une avance en coïncidence... ce qui n'est pas si simple : la procédure réellement mise en œuvre n'est pas encore connue avec certi-*

tude en 2007]. On comprend que la localisation ne pourra être correctement déterminée que si les neurones ont fidèlement véhiculé l'information sans la désynchroniser. Or il existe des pathologies qui ne respectent pas ces pré-requis et qui seront abordées plus loin : leurs conséquences perceptives néfastes sont évidentes et ne concernent pas, hélas, que la localisation.

Revenons au codage du son dans le système auditif. Il est ainsi fait que la simple présence ou absence de potentiels d'action dans certains neurones et pas dans d'autres, en réponse à un son, caractérise la fréquence du son. A partir du moment où un groupe de neurones répond à un son, sa fréquence ne peut être que la fréquence caractéristique des neurones répondeurs, conformément au principe de *cochléotopie* qui énonce qu'un neurone a la fréquence caractéristique du point de la cochlée où il a été connecté, lui-même ou les neurones dont il a pris le relais. Cette capacité repose sur le fait que la cochlée effectue un tri des sons en fonction de leur fréquence, en entrant en résonance à des endroits très précis différant selon la fréquence du son : c'est la *tonotopie*, établie par le grand médecin, physiologiste et physicien Hermann von Helmholtz au milieu du XIX^{ème} siècle. Il a ainsi décrit la membrane basilaire qui parcourt la cochlée dans toute sa longueur comme une batterie de résonateurs de fréquence régulièrement variable de la base à l'apex de la cochlée parcourue longitudinalement (étape 1 de la fig.1). Selon Helmholtz, les cellules sensorielles auditives posées sur la membrane basilaire (on distingue les cellules ciliées externes et internes, ou en abrégé, CCE et CCI, fig.1) répondent alors aux mouvements de la membrane basilaire et transmettent aux neurones auditifs l'information de fréquence (seules les CCI effectuent cette opération, les CCE n'étant pratiquement pas connectées aux neurones afférents auditifs). L'intensité, elle, est codée par l'amplitude des vibrations des stéréocils des CCI, puis par l'amplitude du potentiel de récepteur résultant, et finalement par la cadence des potentiels d'action

résultants. Le degré de synchronisme entre potentiels d'action et vibrations sonores est respecté, à basse fréquence tout au moins, et véhicule des informations de phase relatives au son stimulant. Le fonctionnement cochléaire fait penser à une transformation de Fourier qui décompose un son complexe en ses différentes composantes fréquentielles et en fournit l'amplitude et la phase.

Ce schéma a été admis pendant plus d'un siècle, son importance étant d'autant plus soulignée par le fait que la plupart des surdités ont pour origine un dysfonctionnement cochléaire avec des vibrations insuffisantes ou trop étalées, tandis que les voies nerveuses fonctionnent normalement, mais transmettent au cerveau des informations erronées parce que mal codées au départ. Le physicien et physiologiste Georg von Békésy a raffiné considérablement les observations d'Helmholtz et a pu démontrer concrètement comment vibre la membrane basilaire. Pour cela il a reçu le Prix Nobel 1961.

Mais la finesse des résonances au niveau de la membrane basilaire a intrigué certains physiciens qui ne pouvaient pas accepter qu'une membrane de 30 mm de longueur placée dans un milieu de viscosité non négligeable puisse coder des milliers de sensations différentes, comme si de 10 en 10 micromètres, les pics de résonance pouvaient être discriminés. Thomas Gold, jeune astrophysicien prodige, a proposé dès 1948 un modèle de résonance active, basée sur l'existence d'une boucle de rétrocontrôle qui réinjecterait de l'énergie acoustique à l'entrée du système vibrant de la membrane basilaire pour affiner et amplifier sa résonance. Ce modèle était opérationnel en électronique et permettait d'obtenir des radiorécepteurs extrêmement sensibles et spécifiques, bien qu'assez instables. Il a fallu attendre les années 1980 pour que le modèle de Gold soit accepté, suite à la découverte expérimentale que ce sont les CCE qui exercent le rétrocontrôle requis sur la membrane basilaire (fig.1, étape 3), grâce à une protéine spécifique de leur membrane, la prestine, qui leur permet de vibrer activement à la cadence du son. Selon sa phase, la vibration des CCE s'ajoute ou se soustrait à celle

produite directement sur la membrane basilaire par le son pour amplifier ou atténuer ce dernier et ainsi affiner la résonance cochléaire.

Le raffinement apporté par Gold aux théories d'Helmholtz et Békésy a permis de mieux comprendre et catégoriser les surdités d'origine cochléaire (c'est-à-dire, la grande majorité des surdités acquises ou congénitales de perception). Les CCE sont très souvent impliquées dans de telles surdités, soit parce qu'elles sont lésées ou absentes, ou dépourvues de stéréocils fonctionnels, ou privées de l'environnement cellulaire ou chimique qui est indispensable à leur fonction (étape 2 sur la Fig.1). Outre la prestine, plusieurs molécules importantes directement ou non pour la fonction des CCE ont été récemment découvertes. Certaines comme les connexines servent à assurer le bon fonctionnement de la circuiterie électrique qui alimente les cellules sensorielles. D'autres font partie de l'échafaudage de protéines qui donnent aux stéréocils des cellules ciliées leurs propriétés de rigidité et qui leur permettent d'être acteurs de la résonance cochléaire, donc de la tonotopie dont tout le codage dépend. Une protéine particulièrement importante, qui échappe encore aux recherches pourtant intensives visant à l'identifier, est celle qui sert de canal ionique de mécanotransduction dans les cellules sensorielles, c'est-à-dire celle qui, au niveau des stéréocils, laisse passer des ions potassium dans les CCE et CCI lorsque la déflexion des stéréocils se produit sous l'action du son.

Les surdités de perception d'origine cochléaire, de l'identification à l'appareillage

Pour le moment, un effort particulier a été porté à l'identification précoce des surdités de l'enfant, car l'enfant sourd sévère ou profond, qui ne perçoit pas la parole à niveau normal, risque de ne pas pouvoir développer une connaissance normale de sa langue maternelle s'il n'est pas dépisté et diagnostiqué à temps. Les surdités de l'enfant atteignent un enfant sur 1000 environ à la naissance, et encore un enfant sur 1000 dans les mois qui suivent, semble-t-il. Un bébé sourd sur deux ne présente pas de facteur de risque

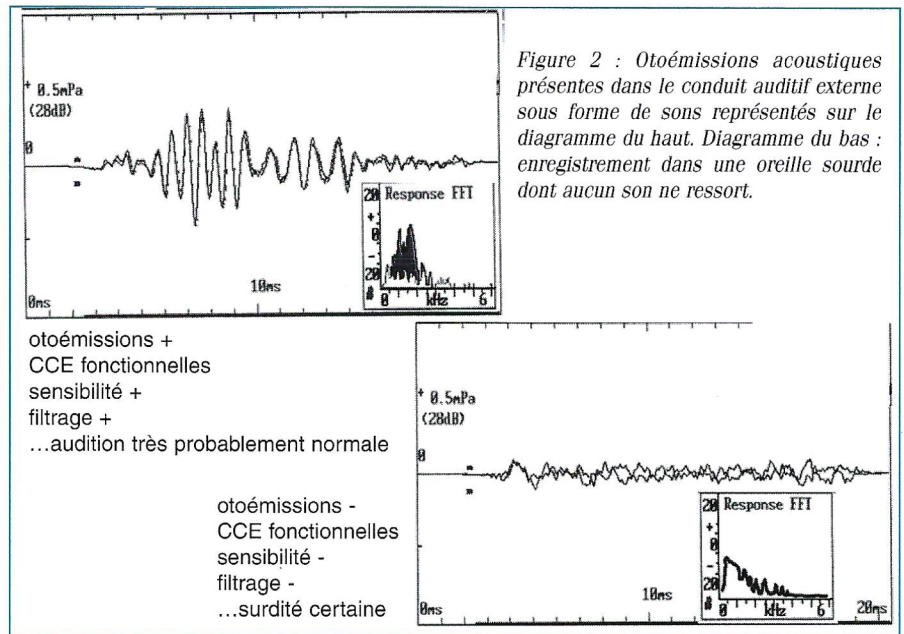


Figure 2 : Otoémissions acoustiques présentes dans le conduit auditif externe sous forme de sons représentés sur le diagramme du haut. Diagramme du bas : enregistrement dans une oreille sourde dont aucun son ne ressort.

connu. Plus de 70% sont d'origine génétique donc impliquent la mutation d'un gène codant pour l'une des protéines que nous venons de décrire schématiquement. Plus de 100 gènes sont probablement impliqués dans le codage de protéines importantes pour l'audition, et plusieurs dizaines sont désormais identifiés. Jusqu'à présent la quasi totalité a concerné des protéines de la cochlée.

La cochlée est donc tout naturellement la cible des protocoles de dépistage précoce de la surdité, désormais possible à la maternité, et ceci un peu grâce à Gold... En effet, un disciple de Gold nommé David Kemp, de l'University College de Londres, lui aussi physicien à l'origine, spécialiste de la propagation des ondes électromagnétiques dans l'ionosphère, a découvert en 1978 que la cochlée émet des sons, les otoémissions acoustiques (fig.2), par le même principe qu'un amplificateur électronique à rétrocontrôle émet des oscillations en raison même de son instabilité, discutée plus haut. Il

a pu être démontré peu après, entre 1983 et 85, que les otoémissions acoustiques (OEA) sont émises par les CCE lorsque ces cellules vibrent en cadence avec le son extérieur pour affiner la résonance de la membrane basilaire. Les OEA peuvent être enregistrées en quelques secondes dans l'oreille d'un bébé, de manière totalement non invasive (fig.2). Leur présence garantit que les CCE fonctionnent bien. Comme presque toutes les surdités néonatales impliquent les CCE, la présence d'OEA élimine presque à coup sûr une surdité de perception, tandis que l'absence d'OEA fait suspecter la présence d'une anomalie neurosensorielle. D'autres méthodes qui sont basées sur la détection des réponses électriques (électroencéphalographiques) des voies nerveuses auditives, les potentiels évoqués auditifs ou PEA (fig.3), fournissent une alternative au dépistage et permettent un diagnostic en fournissant les seuils auditifs, au moins à

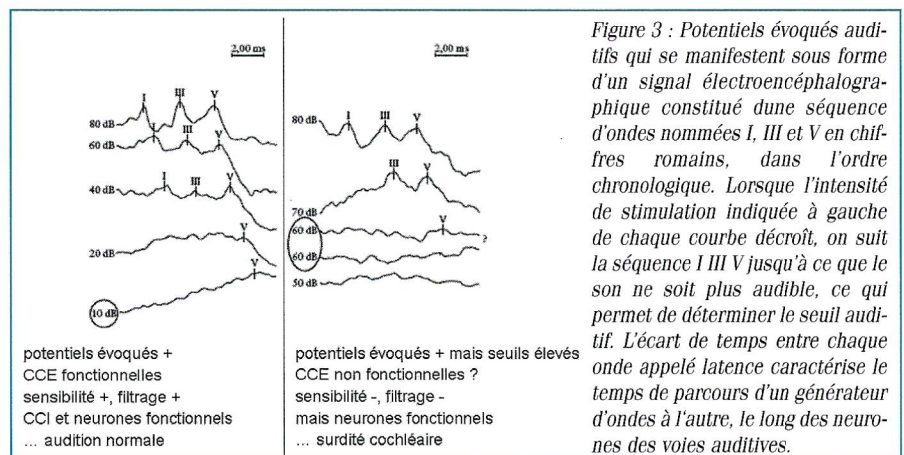


Figure 3 : Potentiels évoqués auditifs qui se manifestent sous forme d'un signal électroencéphalographique constitué d'une séquence d'ondes nommées I, III et V en chiffres romains, dans l'ordre chronologique. Lorsque l'intensité de stimulation indiquée à gauche de chaque courbe décroît, on suit la séquence I III V jusqu'à ce que le son ne soit plus audible, ce qui permet de déterminer le seuil auditif. L'écart de temps entre chaque onde appelé latence caractérise le temps de parcours d'un générateur d'ondes à l'autre, le long des neurones des voies auditives.

certaines fréquences aiguës. Ils apportent également des informations quant à la manière dont les potentiels d'action se propagent vers le cerveau, le long des voies nerveuses auditives.

Le profil des surdités les plus fréquentes est stéréotypé : il n'y a pas d'OEA, les CCE ne fonctionnent pas normalement ; ceci implique quasi automatiquement la conjonction de trois anomalies fonctionnelles. Pas assez de sensibilité puisque les CCE sont normalement à l'origine d'une amplification (d'un facteur 1000, pour les pressions acoustiques faibles). Pas assez de sélectivité fréquentielle car les CCE n'assurent plus une résonance suffisante de la membrane basilaire. Enfin une croissance anormale (excessive, génératrice d'inconfort) de la sensation d'intensité, parce que la résonance anormale de la membrane basilaire s'accompagne d'un codage faussé des intensités. L'appareillage conventionnel des surdités par un appareil auditif standard vise à pallier ces trois déficits qui vont de concert.

Les surdités neurales à cochlée normale

Tout récemment, à la fin des années 1990, c'est en analysant de près les PEA chez certains patients sourds dont on avait déjà recherché les OEA qu'on s'est aperçu de discordances : normalement, d'après ce qui précède, la grande majorité des surdités neurosensorielles sont associées à un dysfonctionnement des CCE, donc il n'y a pas d'OEA et les PEA ont des seuils élevés. Lorsque les PEA apparaissent anormaux avec des performances auditives dégradées (par exemple une très mauvaise intelligibilité de la parole ou une grande gêne dans le bruit) alors que les OEA sont présentes, on ne peut plus accuser les CCE d'être responsables du trouble de l'audition. Les surdités avec fonctionnement cochléaire normal ont été appelées neuropathies auditives : en toute logique, si la cochlée fonctionne normalement, on ne peut imputer les difficultés d'audition qu'aux neurones ou aux voies nerveuses auditives.

Pour le moment cette entité « neuropathies auditives » est composite : elle inclut tout ce qui peut compro-

mettre le fonctionnement neuronal, mais on ignore son incidence et presque tout des mécanismes physiologiques qui peuvent être en cause, a fortiori des molécules impliquées. L'histoire originale de cet article commence à ce stade. Elle a pour but de montrer que lorsque l'on combine les connaissances des physiologistes moléculaires et des cliniciens ORL, des avancées rapides décisives peuvent avoir lieu quant à l'identification de nouveaux types de surdités, et que ces découvertes, loin d'être cantonnées au domaine abstrait de la connaissance fondamentale, ont immédiatement des retombées concrètes dans le domaine de la prise en charge des surdités au quotidien. Les collaborations qui ont permis les travaux qui nous serviront d'exemple ont impliqué des équipes de l'Institut Pasteur coordonnées par le Professeur Christine Petit (également Professeur au Collège de France), des équipes européennes associées dans le cadre de projets internationaux, et l'équipe clermontoise de Biophysique Sensorielle, à la Faculté de Médecine de Clermont. Cette dernière, par elle-même, associe déjà des cliniciens ORL (service du Professeur Laurent Gilain et équipe d'implantation cochléaire du Professeur Thierry Mom), des biophysiciens dont l'auteur de cet article et, pour d'autres projets, des neurochirurgiens (service du Professeur Jean Chazal). Ces collaborations sont lourdes par le nombre de spécialités et de techniques impliquées, avec des cultures différentes qui doivent coexister, mais indispensables et à terme très fructueuses. Elles sont soutenues par diverses instances locales (Clermont-Communauté, la Région Auvergne) et nationales (CNRS, INSERM) dont la liste est ouverte et qu'il convient de remercier.

Il y a une manière privilégiée de découvrir des gènes associés à une surdité, ce qui débouche sur la découverte des molécules codées par ces gènes puis, avec un peu de chance et beaucoup d'efforts, sur celle de leur rôle dans le système auditif. Il s'agit de trouver des familles au sein desquelles plusieurs individus sont porteurs de la même mutation. Ces individus présentent en général un même type de surdité, bien que la même mutation puisse

souvent avoir des conséquences de degrés variables d'un individu à l'autre. On peut être à peu près sûr que la surdité est originaire du même gène chez tous les sujets d'une même fratrie si, par exemple, leurs père et leur mère sont cousins : le scénario le plus probable est que bien qu'aucun ne soit sourd, chacun a apporté une copie défectueuse du même gène, celui qui est en cause chez leurs enfants. Ceux des enfants qui sont porteurs de deux copies du gène défectueux sont sourds. Ceci se produit souvent dans les isolats géographiques favorisant les mariages consanguins. Le cas peut-être le plus célèbre d'un tel isolat est l'île Pitcairn où un marin du Bounty, réfugié après la mutinerie dans cette île inaccessible, et sourd de naissance, a donné naissance à toute une lignée à fort taux de consanguinité, de descendants porteurs du même gène de surdité que lui. Dans les cas de familles exogames où plusieurs membres de la famille sont sourds, on ne peut pas être sûr de l'identité des gènes en cause, notamment parce que les personnes sourdes qui partagent la même culture, les mêmes lieux de rencontre et d'enseignement, se marient souvent entre elles et peuvent être porteuses de gènes mutés totalement différents : il est impossible d'attribuer la surdité de leurs descendants à l'un ou l'autre des gènes initiaux, ni même à une cause génétique certaine. Un autre isolat géographique de grand intérêt historique est celui de l'île de Martha's Vineyard près du cap Cod, où un pionnier sourd arrivé là a créé toute une descendance consanguine de sourds porteurs du même gène de surdité profonde, à tel point qu'à une époque, la langue des signes était pratiquée par tous les habitants, sourds ou non, tant étaient fréquentes les interactions entre sourds et entendants, présents dans l'île en pourcentages voisins.

Les isolats géographiques sont maintenant rares, c'est surtout dans certaines régions particulièrement déshéritées (ce qui explique leur peu de contacts avec le monde extérieur) du Moyen-Orient et du Maghreb qu'on en rencontre encore parfois. Une autre méthode de découverte de gènes de surdité est de pratiquer des mutations systématiques chez des petits mammifères comme la souris.

Les gènes codant pour les protéines de l'oreille interne présentent de grandes homologues chez tous les mammifères et les données chez la souris sont souvent transposables à l'homme, sauf si l'environnement moléculaire dans lequel le produit du gène s'exprime est important, et cet environnement est évidemment un peu différent chez l'homme et chez la souris, ou même d'une souche de souris de laboratoire à l'autre. Ces dernières sont souvent délibérément hautement consanguines, afin de rendre l'environnement génétique aussi homogène que possible.

L'idéal est de disposer de dossiers de familles avec une surdité dont le gène est connu, et en parallèle, d'une souche de souris dans laquelle le gène homologue est porteur d'une mutation similaire. L'analyse est double, tout d'abord structurale à la recherche des endroits où la protéine normale s'exprime, pour déterminer où et comment s'exprime la protéine mutée si toutefois elle est encore présente, et à quels stades du développement de l'oreille interne. En parallèle, l'analyse fonctionnelle a pour but de déterminer si les structures cochléaires, les cellules sensorielles et les voies nerveuses continuent à fonctionner normalement et sinon, à chiffrer le degré de déficit. On dispose pour cette analyse fonctionnelle d'outils physiques qui peuvent aller jusqu'à la mesure des vibrations de la membrane basilaire, mais qui se contentent le plus souvent de tests plus rapides, spécifiques de telle ou telle structure cochléaire ou neurale. Nous avons déjà vu les OEA (fig.2) qui sont spécifiques des CCE et traduisent leurs réponses non linéaires ou contractiles aux stimuli sonores. Les PEA pour leur part quantifient la sensibilité auditive, ainsi que la manière dont les voies nerveuses véhiculent les influx nerveux créés dans la cochlée par les CCI, la vitesse et le synchronisme de la conduction neuronale (fig.3). Enfin les potentiels de récepteur informent sur le fonctionnement des CCE et CCI dans la cochlée.

Rappelons que les neuropathies auditives sont définies par la présence d'OEA, donc par une bonne sensibilité mécanique de la cochlée, mais aussi par des performances en compréhension très mauvaises, malgré une

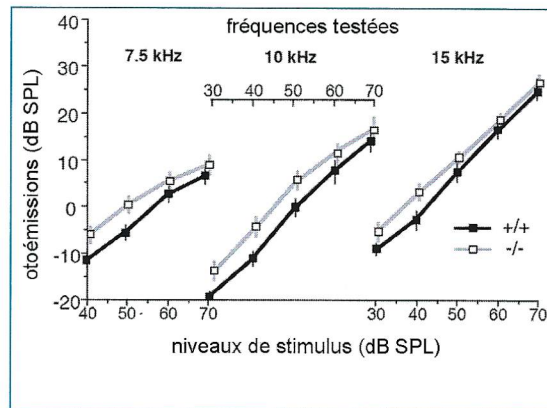


Fig.4A : Variation moyenne d'amplitude des otoémissions acoustiques d'oreilles normales (en noir, notées +/+) et atteintes d'une mutation de l'otoférine (en gris, -/-), en fonction du niveau de stimulation. Les deux courbes sont quasi superposables : l'otoférine n'influence pas les otoémissions.

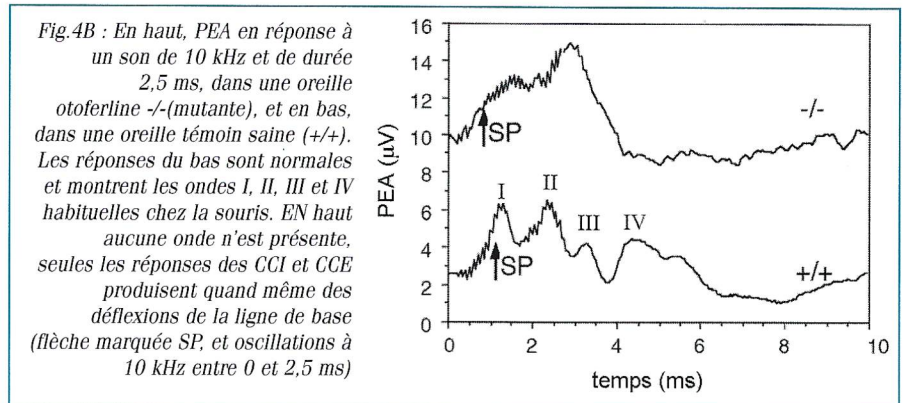


Fig.4B : En haut, PEA en réponse à un son de 10 kHz et de durée 2,5 ms, dans une oreille otopferline -/- (mutante), et en bas, dans une oreille témoin saine (+/+). Les réponses du bas sont normales et montrent les ondes I, II, III et IV habituelles chez la souris. EN haut aucune onde n'est présente, seules les réponses des CCI et CCE produisent quand même des déflexions de la ligne de base (flèche marquée SP, et oscillations à 10 kHz entre 0 et 2,5 ms)

sensibilité correcte, et par l'observation que les PEA sont dégradés ou même absents. Le tableau fonctionnel est donc très discordant par rapport à celui des surdités les plus fréquentes, qui se présentent avec des OEA absentes, des PEA de seuil élevé en proportion du degré de surdité et des performances de compréhension en rapport avec le degré de surdité, le tout étant relativement bien compensable par un appareillage auditif standard comme on sait le faire en 2007.

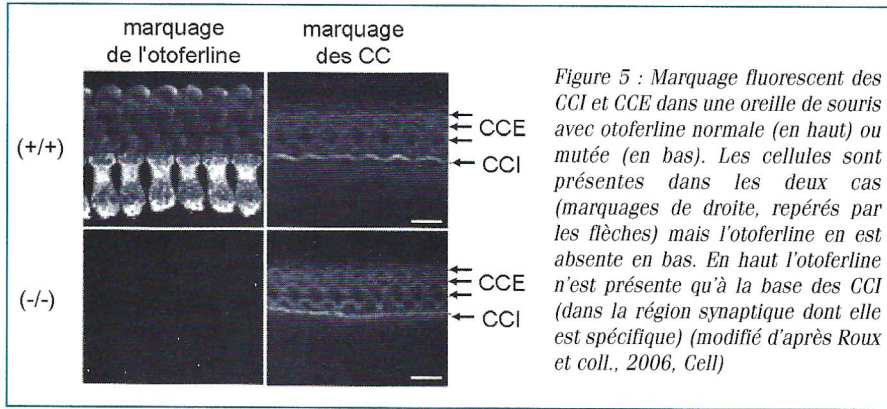
Mutations de l'otoférine, un profil inhabituel de surdité

Un exemple récent d'abord catalogué comme neuropathie auditive est venu d'isolats dans lesquels une surdité particulière dite DFNB9 a été identifiée, en relation avec la mutation d'un gène codant pour la protéine « otoférine » (spécifique de l'oreille, d'où son préfixe « oto » tout en faisant partie de la famille des ferlines). Cette surdité une fois identifiée a ensuite pu être retrouvée chez un nombre non négligeable de bébés et enfants. Elle se traduit par une surdité profonde mais avec des OEA présentes, avec peu de bénéfice d'un appareillage conventionnel mais des résultats de bonne qualité quand en désespoir de cause, des ORL ont proposé puis mis en place un implant cochléaire. Un modèle de souris porteuse d'une

mutation dans le gène de l'otoférine de la souris a ensuite été développé à l'Institut Pasteur dans l'Unité du Pr. Petit. Ce modèle a les mêmes caractéristiques (jugées discordantes en cas de surdité de perception classique) que chez l'homme (fig.4), c'est-à-dire des OEA présentes d'amplitude normale (Fig.4A), et des PEA absents même à très fort niveau (Fig.4B). Il a permis de lancer un ensemble d'investigations destinées à tenter de déterminer le rôle exact de cette protéine dans le système auditif. Le travail coordonné par Isabelle Roux et Saïd Safieddine a abouti à élucider la fonction de l'otoférine ce qui a fait l'objet d'une publication récente associant nos équipes dans la revue « Cell » [Roux et coll., 127, 277-289, 2006].

Chez la souris normale, il est possible de marquer l'otoférine de manière à visualiser cette protéine à l'endroit où elle est normalement exprimée (fig.5, page suivante)

On observe alors qu'elle est présente dans les CCI, et qu'elle y occupe une position basale au niveau de la synapse entre CCI et dendrites du nerf auditif. Chez les souris porteuses de la mutation de l'otoférine, il n'y a aucun marquage spécifique de l'otoférine à la base des CCI, qui sont donc bien dépourvues de cette protéine (fig.5). La présence de l'otoférine en position présynaptique



suggère qu'elle intervient dans le fonctionnement de la synapse entre CCI et neurones auditifs. Or, la synapse est une zone hautement spécialisée qui met en relation deux neurones, ou une cellule sensorielle et un neurone. Lorsque la membrane de la CCI se dépolarise ce qui se produit sous l'effet d'une stimulation sonore, la partie présynaptique, à l'intérieur de la cellule mais au voisinage de la partie basale de la membrane, est activée. Dans la fente synaptique qui sépare la CCI du neurone au contact avec elle, un neuromédiateur est alors largué par le mécanisme suivant : des vésicules qui le contiennent et qui sont stockées dans la CCI, sont mobilisées, se rapprochent de la membrane cellulaire, fusionnent avec elle et libèrent leur contenu. En l'occurrence, le neuromédiateur CCI/neurones est le glutamate, neuromédiateur qui permet un fonctionnement synaptique très rapide, mais qui présente quelques inconvénients à forte dose comme celui d'être toxique pour les neurones. Il existe donc des mécanismes très rapides et puissants qui captent et recyclent le glutamate une fois qu'il a agi. Son action dans la fente synaptique consiste à se fixer à des récepteurs très spécifiques du côté neuronal, et à déclencher par sa fixation l'ouverture de canaux ioniques qui vont servir à dépolariser la membrane neuronale. De cette dépolarisation, si elle est suffisante, naît un potentiel d'action, d'où le codage « numérique » dont nous avons parlé précédemment.

Les synapses CCI/neurones auditifs sont particulières non seulement de par le neuromédiateur impliqué, mais aussi dans leur structure dite « ribbon » (Fig.6). Le travail qui leur est demandé est aussi très particulier avec une exigence de rapidité et de précision temporelle extrême. Dans

l'exemple que nous avons cité plus haut de la localisation auditive, il est en effet essentiel que les neurones cérébraux puissent être informés, avec une précision maximum, de l'existence d'un décalage temporel ne dépassant pas quelques centaines de microsecondes entre les influx des deux oreilles, pour que celui-ci puisse être converti en degrés avec une précision convenable.

Le schéma auquel on cherche à intégrer l'otoferline est le suivant : une fois la membrane d'une CCI dépolarisée sous l'effet d'une stimulation sonore, les vésicules synaptiques chargées de glutamate sont attachées aux ribbons et à la membrane présynaptique, puis sont « amorcées ». Des ions Ca^{2+} mobilisés par la dépolarisation cellulaire interagissent

avec une protéine à déterminer qui permet la fusion des vésicules présynaptiques avec la membrane via le complexe dit SNARE déjà documenté (Fig.6, en bas, fixation de l'otoferline en présence de Ca^{2+} sur un élément du complexe SNARE). Le neuromédiateur est alors émis dans la fente synaptique. Ici il a été possible de démontrer que l'otoferline interagit avec la protéine syntaxine (Fig.6), ainsi que d'autres éléments du complexe SNARE en présence de Ca^{2+} . L'équipe de Tobias Moser à Göttingen a alors montré, par des mesures de capacité électrique membranaire sur des préparations de CCI isolées, que l'exocytose de glutamate a lieu rapidement au niveau de la membrane des CCI lorsque l'otoferline est présente, alors qu'elle n'a lieu que de manière très anormale et retardée chez les souris mutées (Fig.7).

Pour compléter ces indices, l'étude fonctionnelle in vivo des souris mutées pour l'otoferline, réalisée à Clermont-Ferrand, a montré qu'à plusieurs stades, les PEA sont totalement absents chez ces souris, tandis que leurs otoémissions sont strictement normales (Fig.4 A et B). Cependant les potentiels de récepteur cochléaires restent visibles

CCI/ nerf auditif: synapse "ribbon"

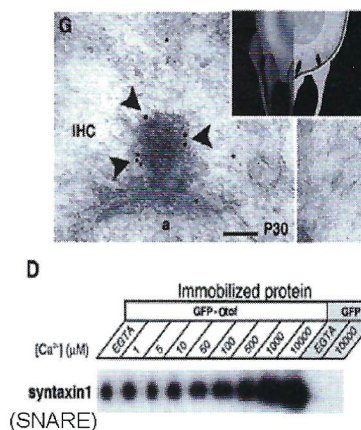
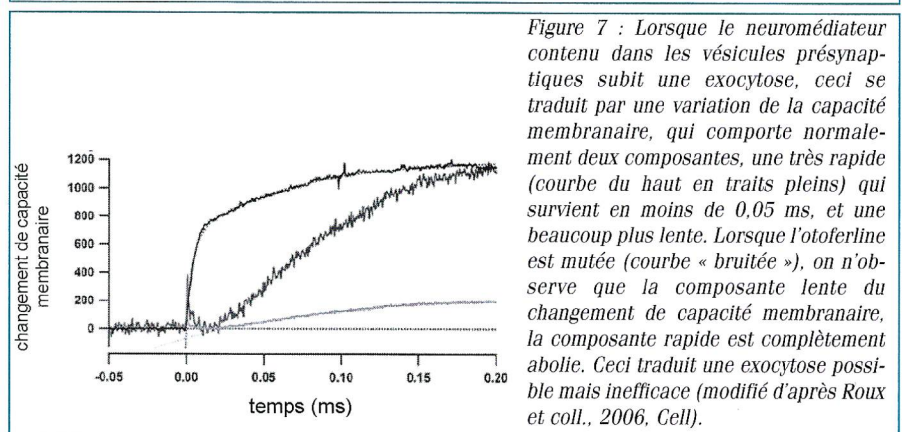


Figure 6 : En haut : allure d'une synapse ribbon au microscope électronique à transmission (en encart : schéma tridimensionnel de principe). En bas : preuve que l'otoferline s'associe effectivement à la syntaxine, un élément du complexe Snare, en présence de Ca^{2+} (modifié d'après Roux et coll., 2006, Cell).



(décalage marqué SP de la ligne de base sur la Fig.4B, et oscillations visibles entre 0 et 2,5 ms) ce qui suggère que les CCI se dépolarisent bien. Enfin les neurones auditifs, bien que semblant moins nombreux lorsqu'on tente de les dénombrer sur des préparations histologiques, restent parfaitement fonctionnels puisque la mise en place chirurgicale d'une électrode pour les stimuler directement, en court-circuitant la cochlée inefficace, permet d'obtenir d'emblée des potentiels évoqués d'allure normale (Fig.8).

La conduction neuronale est donc normale malgré le fait que les neurones auditifs n'aient jamais été stimulés par voie naturelle, puisque l'exocytose du glutamate est inopérante depuis la naissance des souris. Transposé à l'homme, ceci indique aussi que la mise en place d'un implant cochléaire chez les enfants porteurs d'une mutation DFNB9 promet de bons résultats grâce à la stimulation électrique de voies auditives normales. Enfin l'ensemble des résultats démontre que DFNB9 n'est pas une neuropathie auditive mais une synaptopathie très particulière avec absence d'une protéine nécessaire au fonctionnement des synapses ribbon, protéine normalement capable en présence de Ca^{++} d'interagir avec le complexe Snare pour permettre l'attache des vésicules synaptiques à la membrane cellulaire avant leur ouverture dans la fente synaptique.

La pejkakine, une molécule impliquée dans la conduction nerveuse

Le même groupe de l'Institut Pasteur a découvert il y a quelques années que chez quelques familles d'isolats du Moyen-Orient chez lesquelles des prélèvements sanguins avaient pu être effectués à titre systématique, les membres sourds de fratries nombreuses à fort taux de consanguinité étaient tous porteurs de la même mutation concernant une protéine jusqu'alors inconnue, sans véritable homologie connue, et que la chercheuse responsable du projet, Sedigheh Delmaghani, a dénommé « pejkakine » (pour écho, dans la langue du pays d'origine des échantillons). L'isolement géographique des lieux de prélèvement était tel qu'aucun des sujets sourds n'avait de dossier

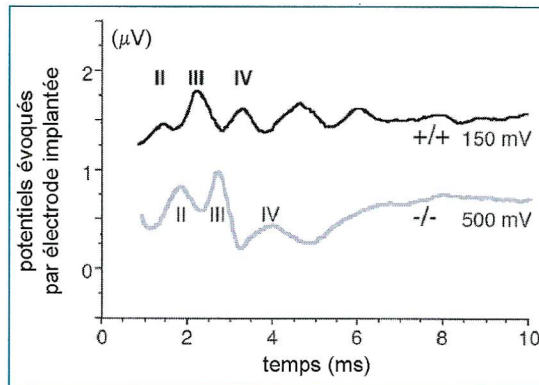


Figure 8 : Réponses évoquées électriques dans les voies nerveuses auditives de souris lorsqu'une électrode placée au voisinage du nerf auditif est stimulée par une impulsion électrique (amplitude indiquée à droite). Les réponses ne comportent que les ondes II, III et IV, et l'onde I n'existe pas car elle est engendrée dans la cochlée, qui est court-circuitée par ce mode de stimulation. Les réponses sont très similaires chez les souris normales (en haut) ou mutées pour l'otoferline (en bas).

médical. En dehors de l'arbre généalogique précis, on savait seulement que tous les frères et sœurs atteints avaient une surdité sévère, un seul parmi eux étant appareillé. Leur mode de communication n'était pas connu.

Le premier travail a été de reproduire la même mutation chez la souris, dans le gène homologue. Il s'agit d'une mutation dite « faux-sens » où la protéine est quand même synthétisée, mais l'un des acides aminés de sa chaîne est remplacé par un autre acide aminé. Dans de tels cas, l'effet attendu est souvent assez minime, mais ici la conséquence de cette mutation chez l'homme était bien une surdité sévère. Les souris mutées exprimaient la protéine dans leur cochlée, au voisinage des CCE et des CCI mais dans des structures annexes sites de soutien (plaque cuticulaire, piliers). Il semblait logique de supposer que la surdité (dénommée DFNB59) était d'origine cochléaire, assez banale, avec les conséquences fonctionnelles rappelées plus haut : pas de CCE fonctionnelles donc pas assez de sensibilité, pas assez de sélectivité fréquentielle et enfin croissance anormale de la sensation d'intensité, avec pour indication un appareillage conventionnel.

L'étude chez la souris a d'abord révélé que la mutation entraîne une surdité le plus souvent très modérée chez cet animal, avec une sensibilité pratiquement normale en basses fréquences. L'analyse en hautes fréquences a d'abord dévoilé une surdité moyenne (30 à 40 dB tout au plus), et nous n'étions même pas sûrs de la significativité de cette surdité car certaines souches de souris développent naturellement des anomalies auditives en l'absence de tout gène muté connu (méfaits de la consanguinité qui est de mise lorsqu'une souche de souris de laboratoire est préparée). Après

avoir changé de souche de base et de clones pour la préparation des souris mutantes, et avoir bien pris soin de réduire l'impact des déficits naturels à haute fréquence, nous avons eu la grande surprise d'observer que les souris sourdes avaient finalement des seuils quasi normaux, des otoémissions normales à toutes les fréquences, mais... des potentiels évoqués auditifs (autrement dit, des réponses neuronales) qui, bien que de seuil assez proche de la normale, étaient grandement retardés (Fig.9 en haut) et de taille très réduite (Fig.9 en bas), comme si les potentiels d'action neuronaux étaient déclenchés parfaitement normalement par la cochlée, mais étaient ensuite mal conduits ou désynchronisés lors de leur transport par les neurones !

L'examen des structures histologiques des souris mutantes a alors été concentré sur les voies nerveuses auditives, jusqu'ici laissées de côté, et il est apparu aussitôt que la pejkakine y était abondamment exprimée (Fig.10), de

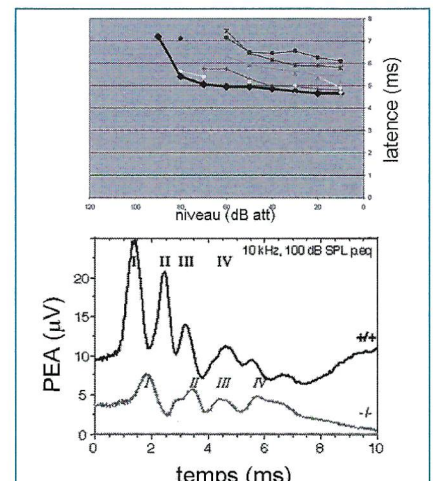


Figure 9 : En bas : réponses en PEA des souris mutées ou non mutées pour la pejkakine (mutées en gris, -/- ; normales en noir, +/+). Les souris mutées ont des amplitudes moindres et des latences (dont la variation en fonction du niveau est représentée souris par souris en traits fins sur le diagramme du haut) allongées par rapport aux témoins (limite supérieure en traits gras sur le diagramme du haut).

manière très spécifique (on ne la voit pas dans les neurones non auditifs).

La question s'est alors posée de caractériser les sujets humains à l'origine de cette recherche : en complète opposition avec notre impression initiale d'une surdité de perception banale, désormais nous nous attendions à un profil de neuropathie auditive, il restait à le démontrer. Malgré les difficultés logistiques considérables, les patients, heureusement naturellement regroupés, ont tous pu être atteints et convaincus de se laisser conduire en minibus dans un centre urbain de taille suffisante pour que les examens audiométriques de base soient pratiqués. Le matériel était hélas spécialisé pour le dépistage néonatal, mais il a quand même pu être utilisé chez ces patients dont le plus jeune était adolescent. Il a montré des potentiels évoqués auditifs pratiquement plats malgré des seuils auditifs autour de 70-80 dB (fig.11, en haut). Chez quelques rares sujets, il était possible de voir des ondes de potentiels évoqués retardées (Fig.11, milieu ; comme chez la souris). Surtout, il a fini par être possible de convaincre l'équipe d'audiologie de l'hôpital d'accueil de pratiquer des otoémissions acoustiques (au début ils trouvaient cette requête absurde, devant la profondeur des surdités à explorer qui semblait exclure a priori toute otoémission) : elles étaient présentes, normales, chez tous les sujets (exemple sur la fig.11, en bas) ! En dehors d'un aspect quantitatif, le degré de surdité, l'homologie homme - souris était donc complètement vérifiée. Ce travail a été récemment publié dans la revue Nature Genetics (Delmaghani et coll., 2006).

La question du rôle de la pejkavine reste encore à élucider : l'importance

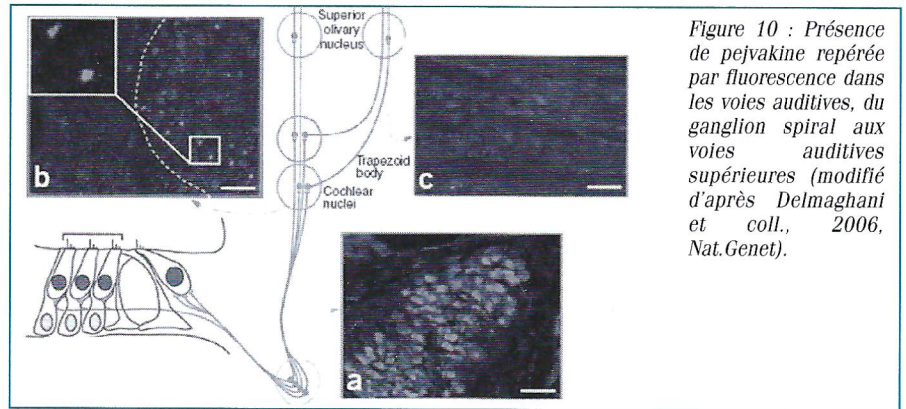


Figure 10 : Présence de pejkavine repérée par fluorescence dans les voies auditives, du ganglion spiral aux voies auditives supérieures (modifié d'après Delmaghani et coll., 2006, Nat.Genet).

de ce qu'elle fait dans les neurones auditifs est démontrée, mais l'absence d'homologie nette avec des protéines déjà connues n'aide pas à imaginer des pistes d'investigation. La réponse des neurones à une stimulation électrique est également à l'étude, dans l'optique d'une éventuelle prescription d'implantation cochléaire chez les sourds DFNB59, en cas d'échec d'un appareillage classique. D'autres modèles de souris sont en cours de développement, dans lesquels la protéine est absente et non pas simplement modifiée. Enfin la pejkavine est bel et bien présente dans les structures de soutien de la cochlée et même si certaines de ses mutations ne font pas dysfonctionner la cochlée, son rôle à ce niveau mérite cependant d'être approfondi.

Conclusion et perspectives

La connaissance du degré d'une surdité de perception et de ses causes profondes, physiologiques et même moléculaires, n'est pas que scientifique car si c'était le cas, l'application à la clinique resterait anecdotique. La question qui se pose est de pouvoir proposer une véritable solution concrète pour restituer aux patients dépistés un accès à la communication orale, si eux ou leur entourage le désirent et si un bénéfice en est attendu. Pour les surdités classiques d'origine cochléaire, la

solution efficace consiste en un appareillage amplificateur, dont la plupart, en 2007, commencent à présenter des fonctions intéressantes pour pallier la dégradation des performances auditives autres que la sensibilité. Mais la question doit être entièrement repensée en cas d'atteinte des voies auditives : ici nous avons vu que dans le cas d'un déficit de l'otoferline, les neurones ne sont pas atteints primitivement, et que les neurones du modèle murin conservent longtemps des capacités de réponse intactes à une stimulation électrique. Un implant cochléaire dont le principe est décrit sur la Fig.12 et qui vient stimuler directement les fibres auditives au contact de la cochlée est donc la solution pour appareiller les enfants sourds de naissance atteints d'un déficit en otoferline (il faut quand même rappeler que leur surdité est profonde et que le langage d'un enfant atteint ne peut se développer que si les messages auditifs sont rétablis pendant la période critique dédiée au développement du langage humain : entre 1 et 3 ans si possible, pas après 6 ans).

Dans le cas de la surdité DFNB59 avec déficit en pejkavine, l'intérêt de l'implant cochléaire comme solution de réhabilitation reste à démontrer, les premiers éléments semblant positifs. L'exploration de cette nouvelle forme de surdité est en cours.

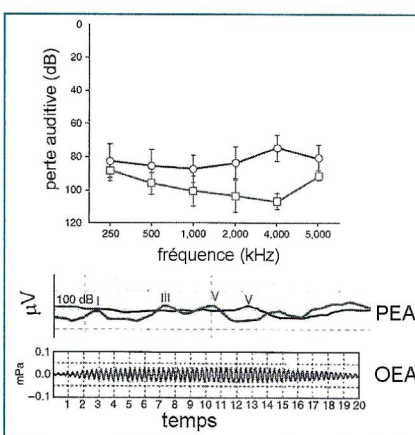
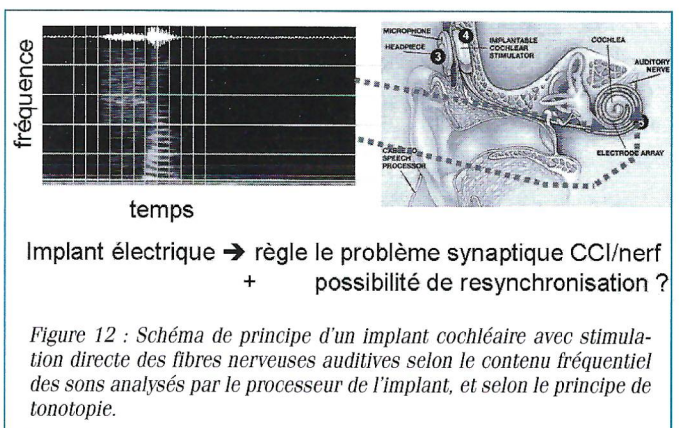


Fig. 11 : (en haut) audiogrammes moyens obtenus chez l'homme, dans les deux familles analysées porteuses de la mutation de la pejkavine. (au milieu) PEA d'un sujet normal (tracé clair avec des ondes I, III et V) et d'un sujet muté pour la pejkavine (en sombre, une onde V tardive est à peine visible, un peu comme chez la souris). (en bas) OEA chez un sujet sourd porteur d'une mutation de la pejkavine (modifié d'après Delmaghani et coll., 2006, Nat.Genet).



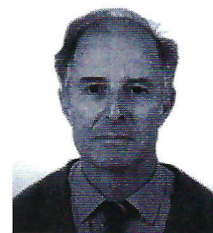
Implant électrique → règle le problème synaptique CCI/nerf + possibilité de resynchronisation ?

Figure 12 : Schéma de principe d'un implant cochléaire avec stimulation directe des fibres nerveuses auditives selon le contenu fréquentiel des sons analysés par le processeur de l'implant, et selon le principe de tonotopie.

Une extraordinaire nanomachine : l'ATP-Synthase

Par Georges ANTON

Ingénieur chimiste ENSCT, Vice-Président de l'ADASTA



INTRODUCTION

Dans la revue de l'ADASTA n° 65, M. F. Chandezon nous a fait part des immenses possibilités vers lesquelles les nanotechnologies pourraient nous entraîner. Force est de constater que la presse n'est pas avare de commentaires concernant ce domaine scientifique apparemment très prometteur. L'imagination humaine étant toujours à l'affût de ce qui peut surprendre, on ne s'étonnera pas de l'irruption dans ce domaine de visionnaires et de cassandres dont le but, avoué ou non, est de répandre dans les esprits une image fascinante, mais surtout inquiétante, des éventuelles futures applications dans ce domaine, auxquelles l'humanité pourrait être confrontée dans un avenir proche.

Un article bien documenté sur le sujet a été publié dans le « Monde diplomatique » de mars 2006. Son titre « Nanotechnologies, le vertige de l'infiniment petit » est très évocateur. Les références bibliographiques indiquées, à forte connotation journalistique et par là même de nature bien différentes de celles mentionnées par F. Chandezon, traduisent certainement avec justesse la perception actuelle des médias sur ce sujet technique en pleine expansion.

L'Homme, dont la vanité est sans limite, se croit certainement capable, demain, de fabriquer quelques nanomachines, c'est-à-dire des machines constituées de nanoparticules. Il n'en a pour l'instant qu'une très vague idée, mais se lance déjà dans des spéculations hasardeuses.

La Nature, dans son évolution créatrice, a conçu de telles réalisations. Cette constatation ne nous étonnera

pas. Nous sommes en effet en admiration devant les divers aspects de la Vie : tout être vivant est source d'un questionnement sans fin devant lequel l'intelligence humaine trébuche.

L'objet du présent article est la description d'une nanomachine naturelle appelée ATP-synthase. Ce terme, assez obscur a priori, doit être préalablement explicité d'où le rappel de quelques notions.

1 - LE FRANCHISSEMENT DES MEMBRANES CELLULAIRES

Un produit ingéré par voie orale est considéré comme faisant partie intégrante de notre organisme lorsqu'il a franchi les parois tapissant les organes digestifs. Toutes les substances nutritives – avant d'être reprises par

la circulation générale – devront donc traverser l'épithélium intestinal, barrière constituée de cellules qui, comme toutes les cellules des êtres vivants, sont limitées par une membrane. La structure de celle-ci se prête à de tels passages à condition que les produits ingérés soient convenablement tronçonnés par toutes les réactions du catabolisme digestif : le résultat final de l'action des enzymes digestives est donc de réduire les constituants de l'alimentation à des molécules pouvant être absorbées et assimilées. Faute de quoi le produit, trop volumineux, ne peut passer et sera évacué.

Les deux exemples suivants permettent la compréhension de ce qui précède :

- pour vivre et se développer l'être humain – comme tout animal – a besoin de synthétiser ses propres

1 - La membrane cellulaire

La cellule est l'unité de base en biologie. Elle est limitée par une membrane, structure possédant une perméabilité sélective et agissant à la façon d'une barrière, maintenant ainsi des différences de composition entre l'intérieur et l'extérieur de la cellule. C'est une structure complexe composée de lipides, protéines et glucides. Les lipides, sous forme d'une double couche phospholipidique, forment la structure clé de la membrane. Ce sont essentiellement des phosphoglycérides constitués d'une molécule de glycérol à laquelle sont attachés – par des liaisons ester – deux acides gras et un alcool phosphorylé.

La fig.1 montre la façon dont s'assemblent les deux couches : les parties hydrophiles chargées + (à cause d'un N^+) et – (une acidité non estérifiée de H_3PO_4) sont en contact avec les parties aqueuses intérieures et extérieures de la cellule, alors que les parties hydrophobes se font face.

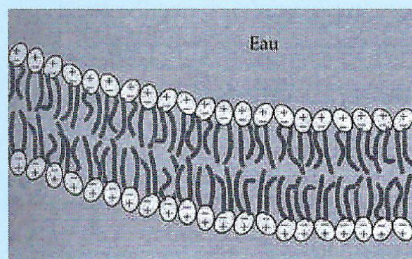


Fig.1 représentation schématique de la membrane cellulaire, (les 2 acides gras fixés sur la tête hydrophile ont une allure plus ou moins tourmentée, due à la présence de doubles liaisons dans leurs chaînes)

protéines. Celles-ci sont le résultat des transformations subies par les protéines animales ou végétales absorbées. Ces produits, subissant l'action des enzymes digestives, sont scindés en leurs éléments constitutifs que sont les acides aminés. Ces molécules passent alors sans difficulté dans la circulation générale et seront reprises par le dispositif cellulaire de synthèse protéique, afin de réaliser nos protéines spécifiques.

- les cellules végétales renferment de la cellulose, composant fondamental de leurs parois. Ce produit ne peut être décomposé par l'organisme humain car, contrairement à certaines espèces vivantes, nos gènes ne synthétisent pas l'enzyme permettant l'hydrolyse des liaisons β -glycosidiques, caractéristiques de la cellulose. Il y aura donc élimination de ce produit qui ne peut être transformé en ses éléments constitutifs, c'est-à-dire les molécules de glucose.

On est donc toujours devant le problème général du franchissement d'une membrane cellulaire – que ce soit pour entrer ou pour sortir de la cellule – se posant à tout élément nécessaire à la vie de cette cellule. Ces produits étant extrêmement variés (eau, ions tels que H^+ , Cl^- , Na^+ , K^+ , molécules telles que acides aminés, sucres, vitamines...), la vie a conçu des dispositifs ingénieux permettant à des molécules la plupart du temps électriquement

chargées de passer au travers d'une membrane également chargée. On rejettera le terme général de « pore » qui ne permet pas la compréhension fine du phénomène, et qui de plus, pourrait faire penser à de simples perforations. Les études nombreuses et variées sur un sujet aussi vaste révèlent la complexité du phénomène. Dans la réalité, il s'agit toujours :

1. de la diffusion d'un produit à travers une membrane. Cette diffusion peut être facilitée – elle mettra alors en œuvre des transporteurs ou des canaux sans dépense énergétique particulière, le cheminement de la matière se faisant alors d'une région de forte concentration vers une région de concentration plus faible – ou au contraire nécessitera une dépense énergétique pour faire passer le produit contre son gradient de concentration. Dans ce dernier cas, la mise en œuvre d'une « machine » équivalente à une pompe est la règle. Dans le langage industriel courant, le terme « machine » fait penser à une construction métallique dans laquelle l'acier joue le rôle prépondérant. Rien de tel évidemment avec les « machines » biologiques dont nous parlons ici, et qui seront toujours des protéines. Les liaisons covalentes remplacent les liaisons métalliques, mais on sait que par nature même, la liaison covalente est plus solide que la liaison métallique. On rappellera que la

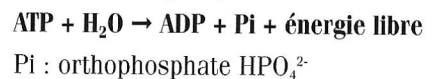
ténacité d'un fil d'araignée est supérieure à la ténacité d'un fil d'acier de diamètre équivalent, ce qui montre l'extrême puissance du vivant par rapport au monde inanimé.

2. de processus particuliers comme l'exocytose – une vésicule à l'intérieur d'une cellule fusionne avec la membrane plasmique et libère son contenu à l'extérieur – ou l'endocytose (phénomène inverse).

Ne passent sans difficulté au travers des membranes cellulaires que les produits compatibles avec la nature même de la membrane, tels que acides gras, alcool éthylique, glycérol et certaines hormones.

2 – LES REACTIONS BIOLOGIQUES : ENERGIE ET ENZYMES

Sans apport énergétique, les réactions chimiques s'avèrent la plupart du temps impossibles. L'une des molécules fondamentales impliquée dans les réactions de la cellule vivante – animale ou végétale – est l'ATP, abréviation de « Adénosine triphosphate », qui, dans la rupture par hydrolyse de la dernière liaison « phosphate » libère une énergie libre (ΔG) importante d'environ -12 kcal/mole à la température, au pH et aux concentrations de substrats typiques des cellules vivantes. Le ΔG « standard » de l'hydrolyse de l'ATP est de -7.3 kcal/mole (-30 kJ/mole) mais cette valeur n'est exacte qu'à pH7 et avec des concentrations en ATP, ADP et en phosphate de 1M, concentrations différant fortement de celles trouvées dans les cellules. La réaction très exergonique, s'écrit :

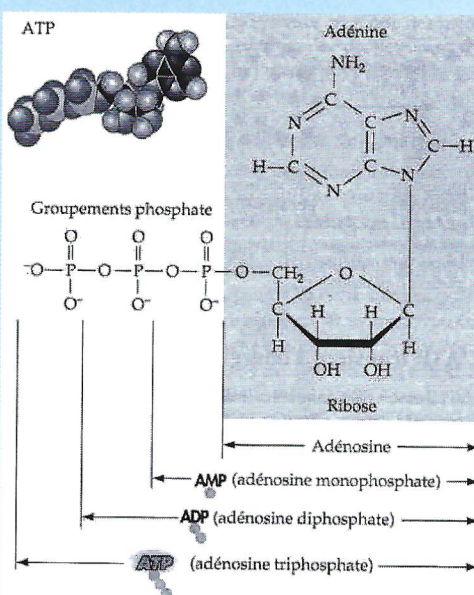


L'encadré 2 explicite la formule de l'ATP, forme préférentielle de mise en réserve de l'énergie métabolique. C'est le transducteur biologique essentiel de l'énergie libre.

D'autres produits sont utilisés par les organismes vivants à des fins similaires, mais l'ATP en est l'exemple type. Cette molécule est constamment synthétisée pour être immédiatement réutilisée. Sa concentration cellulaire moyenne sous forme libre est d'environ 1 mmol/litre mais un individu normal en fabrique entre 30 et

2 - Structure de l'ATP

Figure 2 - L'ATP résulte de la fixation d'une molécule de pyrophosphate sur l'AMP (adénosine monophosphate). L'AMP est l'union d'une base azotée (adénine) avec une mole de ribose (sucre à 5 C) auquel est fixé un phosphate inorganique. C'est l'un des 4 nucléotides fondamentaux de l'ARN, chaque nucléotide étant une succession Base-Sucre-Acide phosphorique. On rappellera que l'ADN est constitué de façon sensiblement similaire à l'ARN mais avec un désoxyribose (ribose ayant perdu l'atome d'oxygène de son carbone n°2) en lieu et place du ribose. On donne le nom d'adénosine à l'ensemble adénine/ribose. Dans les conditions cellulaires, les groupements phosphate sont ionisés et porteurs de charges négatives qui se repoussent entre elles d'où la forte libération d'énergie lors de l'hydrolyse.



35 kg/jour. Cette énorme différence montre bien son rôle fondamental en tant que molécule pourvoyeuse d'énergie dans une très large gamme de réactions du métabolisme.

Les enzymes sont les catalyseurs des réactions biologiques. La dégradation des aliments fournit les constituants de base et l'énergie nécessaire aux synthèses anaboliques. L'assemblage de ces éléments en protéines, membranes, ADN ou autres produits et organites cellulaires, est rendu possible par l'action rigoureusement coordonnée des enzymes. Elles sont identifiées par l'addition du suffixe « -ase » au nom du substrat transformé ou du produit obtenu. Ainsi une lipase est le nom général donné aux enzymes capables de réaliser l'hydrolyse des lipides. Le nom actuel des enzymes fait souvent ressortir le type de réaction catalysée. Une ATP-ase sera une enzyme nécessaire à l'hydrolyse de l'ATP en vue de l'obtention de l'ADP, et une ATP-synthase l'enzyme permettant la synthèse de l'ATP à partir de l'ADP.

Mention sera faite des H^+ ATPases ou pompes à protons, particulièrement actives chez les végétaux et dont le rôle est de faire passer les protons H^+ à travers une membrane contre leur gradient de concentration, utilisant pour cela l'énergie fournie par l'hydrolyse de l'ATP. Cette « nanomachine » partiellement insérée dans la membrane cellulaire où elle est fixée, a une masse moléculaire pouvant varier de 100 à 500 kDa, suivant leur type.

kDa signifie kilo dalton. Le dalton (Da) est l'unité de masse moléculaire se référant à la masse d'une mole ^{12}C . Ce mode d'expression utilisé couramment en biologie vu la grandeur des molécules rencontrées, est identique à la masse molaire habituelle. Une protéine de 500 kDa a une masse molaire de 500 000g mol $^{-1}$ et une masse moléculaire relative (improprement appelée poids moléculaire) de 500 000.

L'ATP-SYNTHASE

Localisation

L'ATP-synthase, également présente chez les bactéries, est une protéine de masse moléculaire voisine de 550 kDa, formée des sous-unités

3 - La mitochondrie

Usuellement de la taille des bactéries (1,5 μm de diamètre pour 2 à 7 μm de longueur) la mitochondrie – observée en microscopie électronique – possède 2 membranes, l'une externe, lisse et protectrice, et la membrane interne, s'invasant en de nombreux endroits, ce qui augmente sa surface. L'espace inter-membranaire a une concentration élevée en ions H^+ . **Lieu d'un grand nombre de réactions chimiques essentielles, c'est l'organite cellulaire responsable de la synthèse de l'ATP.**

La membrane interne délimite une région, appelée matrice, contenant enzymes, ribosomes et ADN mitochondrial, permettant ainsi la synthèse de protéines nécessaires à la respiration cellulaire. Grâce à leur propre ADN, les mitochondries montrent des ressemblances frappantes avec les bactéries. Les cellules ayant le plus besoin d'énergie chimique sont particulièrement riches en mitochondries. Chaque cellule hépatique humaine en renferme 1000 à 2000. Une caractéristique importante de l'ADN mitochondrial humain réside dans le fait qu'il est transmis par hérédité maternelle non mendélienne, car toutes les mitochondries sont apportées par l'ovocyte au cours de la formation du zygote. Cet ADN représente approximativement 1% de l'ADN cellulaire total (exprimé en nombre de gènes) et se trouve sous forme de 2 à 10 molécules d'ADN circulaires par mitochondrie.

protéiques α , β , γ , δ , ϵ , a, b, c, dont l'ensemble forme la protéine F_0F_1 . (cf. fig. 4)

Positionnée en un grand nombre d'exemplaires (plusieurs centaines) sur la membrane interne des mitochondries et sur la membrane des thylacoïdes chloroplastiques (encadrés 3 et 4), sa fonction principale est de convertir l'énergie chimique potentielle des « carburants » qui rentrent dans la cellule (essentiellement glucose et acides gras) en ATP, molécule riche en énergie utilisable.

Fonctionnement et structure

Deux grandes parties protéiques désignées par les sigles F_0 et F_1 constituent l'ossature de l'ATP-synthase. Le fonctionnement de l'ensemble, compris comme celui d'un moteur rotatif pas à pas dont l'énergie nécessaire à son fonctionnement est la conséquence du déplacement des protons à travers F_0 , se fait par déformation cyclique des sites catalytiques de F_1 , conséquence de la rotation de la sous-unité γ . (fig. 4)

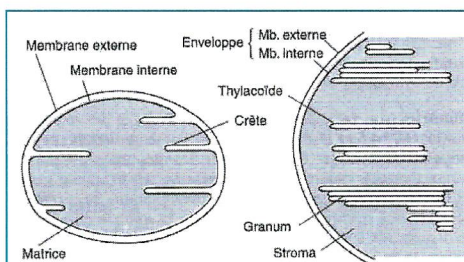


Fig.3 : coupes comparées d'une mitochondrie et d'un chloroplaste. (mitochondrie à gauche et chloroplaste à droite)

4 - Le chloroplaste

Siège du phénomène fondamental de la **photosynthèse** chez les végétaux c'est-à-dire absorption de CO_2 et rejet concomitant d' O_2 , cet organite cellulaire dont les dimensions sont voisines de celles de la mitochondrie (3 à 10 μm de longueur pour 1 à 4 μm d'épaisseur) est également limité par deux membranes. L'intérieur, appelé stroma, homologue de la matrice mitochondriale, contient, outre les enzymes de la photosynthèse, des saccules aplatis, les thylacoïdes – empilés en amas ou granums – renfermant les structures et produits responsables de la photosynthèse (chlorophylle, divers pigments, antennes réceptrices des photons...).

L'intérieur du thylacoïde – le lumen – est une région de forte concentration en ions H^+ , ressemblant ainsi à l'espace inter-membranaire mitochondrial. Comme la mitochondrie, le chloroplaste est un organisme semi autonome possédant un filament circulaire d'ADN (ADN chloroplastique) permettant la synthèse d'une partie des protéines qui lui sont nécessaires, ainsi que sa réplication.

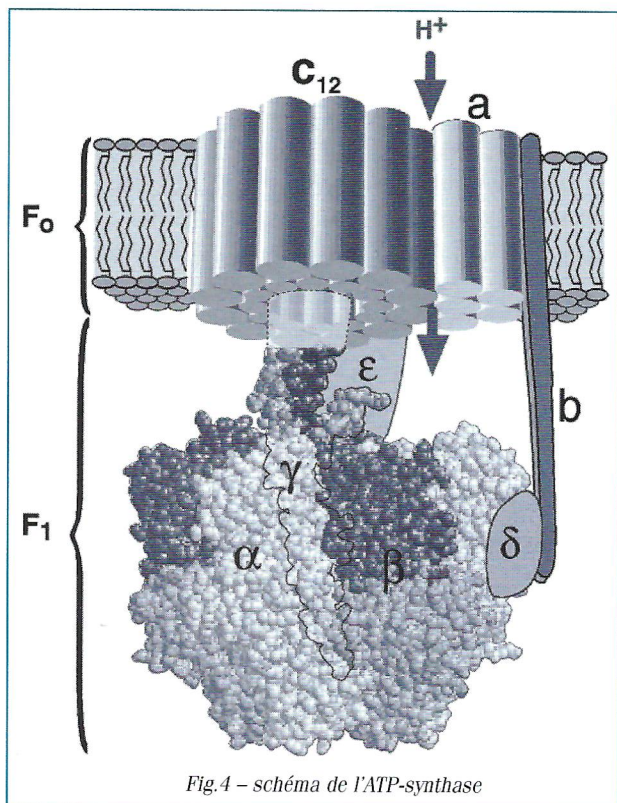


Fig.4 - schéma de l'ATP-synthase

La partie F_0 est enchâssée dans la membrane interne de la mitochondrie ou du thylacoïde, représentée avec ses deux couches phospholipidiques typiques des membranes cellulaires. F_1 , immergée dans la matrice, fait environ $11 \mu\text{m}$ de long sur $9 \mu\text{m}$ de large. Les ions H^+ se déplacent de l'espace inter-membranaire vers la matrice dans le cas des mitochondries, et du lumen vers le stroma pour les chloroplastes, c'est-à-dire toujours dans le sens du gradient de concentration.

Ce moteur moléculaire, ou cette **nanomachine** pour employer cette terminologie maintenant bien admise, est donc mis en mouvement par le flux des protons qui se déplacent dans le sens de leur gradient. Comme tout moteur, il comporte une partie fixe, le stator, et une partie mobile, le rotor. Le stator formé de la majeure partie de F_1 comprend les deux sous-unités α et β , organisées comme les quartiers d'une orange. Les sites de fixation des nucléotides ADP et ATP sont localisés sur β , à l'interface avec α . Il y a 3α et 3β comme indiqué sur la figure 5. La sous-unité δ est reliée à F_0 par l'intermédiaire des deux sous-unités b de F_0 . Celles-ci sont elles-mêmes associées à la sous-unité a . Le rotor est constitué d'une couronne de 12 sous-unités c faisant partie de F_0 , unie à la sous-unité γ de F_1 par

l'intermédiaire de ϵ . Au centre de la couronne $\alpha\beta\beta$ on retrouve γ positionnée de façon non symétrique, sa structure intrinsèquement asymétrique se fixant à la base de F_0 .

Les protons traversent la membrane au niveau de l'interface entre les sous-unités a et c de F_0 , et entraînent la rotation du rotor.

Mécanisme de synthèse de l'ATP

Comme pour toutes les réactions enzymatiques, ce sont les changements de conformation de l'enzyme elle-même qui provoquent le rapprochement des parties réactives de l'enzyme et des substrats, entraînant par là même la réaction chimique.

Les trois sites catalytiques $\alpha\beta$ (fig. 5) adoptent en fonctionnement rotatoire une structure différente : l'un est vide (très faible affinité pour l'ADP ou l'ATP ; ouvert o), le deuxième fixe l'ADP et le phosphate (position m), tandis que le troisième contient de l'ATP lié (forte affinité, position f).

Comme déjà mentionné, la sous-unité γ tourne entraînée par la rotation du rotor et les sites sont déformés à tour de rôle : le site avec ATP s'ouvre et ce dernier est libéré, le site avec ADP et P_i acquiert une forte affinité et force la synthèse d'ATP, et le site vide acquiert une affinité pour ADP et P_i . Dans ce modèle fonctionnel, les

changements essentiels qui ont lieu au cours d'un cycle catalytique, c.-à-d. lors d'une rotation de 360° , concernent l'affinité des sites pour leurs substrats (ATP, ADP et P_i). Les protons ne sont pas impliqués directement mais sont à l'origine du mouvement de rotation, la partie F_1 synthétisant l'ATP, F_0 assurant le transport des ions H^+ .

L'observation directe de la rotation a été réalisée pour la 1^{ère} fois au Japon en 1998 par isolement de F_1 qui réalise la synthèse ou l'hydrolyse de l'ATP suivant le sens de rotation. Les sous-unités $\alpha\beta\beta$ ont été fixées à un support artificiel et la sous-unité γ greffée à un long filament d'actine rendu fluorescent, donc facilement visible. La rotation du filament d'actine a été observée suite à l'addition d'ATP dont l'hydrolyse a engendré un mouvement inverse de celui qui a lieu lors de sa synthèse.

CONCLUSION

Cette enzyme nous entraîne au niveau des réactions les plus extraordinaires de la biologie. Les protéines – assemblages complexes des 20 acides aminés fondamentaux – sont au cœur de tous ces phénomènes. Synthétiser de telles molécules et les réunir dans des machines harmonieuses telles que nous venons d'en décrire une, ne semble pas être du domaine d'un futur proche.

L'ATP-synthase, type même de la nanobiomachine, est un exemple impressionnant de l'organisation biologique. Elle nous démontre, si besoin était, toute la beauté et toute la complexité des phénomènes liés à la Vie.

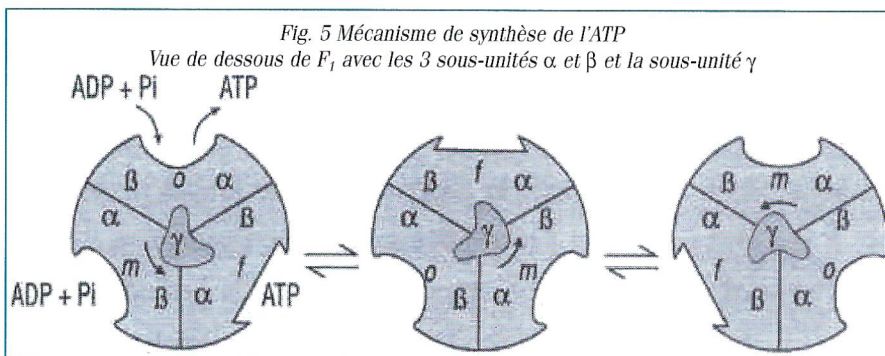


Fig. 5 Mécanisme de synthèse de l'ATP

Vue de dessous de F_1 avec les 3 sous-unités α et β et la sous-unité γ

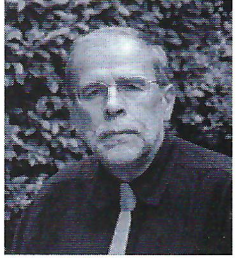
Bibliographie

- la Chimie du vivant (de la protéine à la photosynthèse) André Brack et Paul Mathis - <http://www.k2.phys.waseda.ac.jp/Movies.html>
 - <http://www.res.titech.ac.jp/~seibutu/hisabori/index-e.html>
 - http://www.csc.ucsc.edu/~hongwang/ATP_synthase.html
- (les liens Internet précédents permettent de visualiser au mieux le fonctionnement de l'ATP-synthase ainsi que la rotation du filament d'actine)

L'expérience de Pascal

Par Jean CHANDEZON

Docteur ès Sciences, Professeur Emérite de l'Université Blaise-Pascal.
Vice-Président de l'ADASTA.



1 - LA NATURE A HORREUR DU VIDE

Les Grecs ont été les premiers à faire ce que l'on appelle aujourd'hui de la physique ce qui, à l'époque, n'était qu'une branche de la philosophie. Ils avaient pour ambition de trouver un système expliquant entièrement le monde physique dans lequel nous vivons, système que l'on appelle actuellement « théorie du tout » et qui reste, encore de nos jours, le Graal du physicien. Le principe d'une théorie du « tout » est de permettre, à partir du plus petit nombre possible de principes de base, d'expliquer entièrement le fonctionnement de l'univers.

La première théorie qui soit apparue est la théorie atomiste de Démocrite. Elle est issue des idées de l'école Pythagoricienne où le monde s'explique en termes de nombres entiers c'est à dire où tout n'est que nombre. De façon naturelle les pythagoriciens avec Démocrite imaginaient un

monde dans lequel le vide, partie intégrante de la théorie, est absolument indispensable.

La seconde théorie, devenue dominante, est issue des idées de Platon et de son élève Aristote. Le monde est continu mais borné. La terre est sphérique, elle est au centre d'un univers, lui même sphérique, fini et limité par une sphère, la sphère des fixes, qui porte les étoiles fixes. La matière est continue, fractionnable à l'infini. Une partie, quelle que soit sa taille, possède toujours les propriétés du tout. La matière est formée de quatre éléments distincts opposés deux à deux : l'air et la terre d'une part, l'eau et le feu d'autre part. L'univers se divise en deux entités principales : le monde sublunaire rempli d'air entre la lune et la terre et le monde céleste, rempli d'éther, où se déplacent les planètes, limité par la sphère des fixes. Telles étaient les idées d'Aristote, mises en forme par Ptolémée dans son ouvrage « L'Almageste » qui, pendant deux millénaires a été la théorie expliquant tout, la théorie atomiste

aristotéliens, il est non seulement inutile mais inconcevable, donc hérétique, ce qui s'est traduit, au Moyen-Age, avec les scholastiques, par le principe : « la nature a horreur du vide ». Bien entendu la question peut se poser sur la nature de l'espace au delà de la sphère des fixes, mais cela concerne le domaine divin et n'a donc pas de sens physique.

Pendant près de 2000 ans le vide n'a pas été nécessaire à la physique et toutes les expériences semblaient confirmer que la nature avait bel et bien horreur du vide. Une situation voisine existait en mathématique où le zéro était tout aussi inconcevable ; il a fallu attendre l'an mil avec Gerbert d'Aurillac pour que le zéro apparaisse dans le monde occidental.

2 - L'EXPERIENCE DE PASCAL

Avec Copernic, Képler puis Galilée la vision du monde a complètement changé, l'espace est devenu héliocentrique et infini, le vide est non seulement concevable mais indispensable : en effet comment imaginer

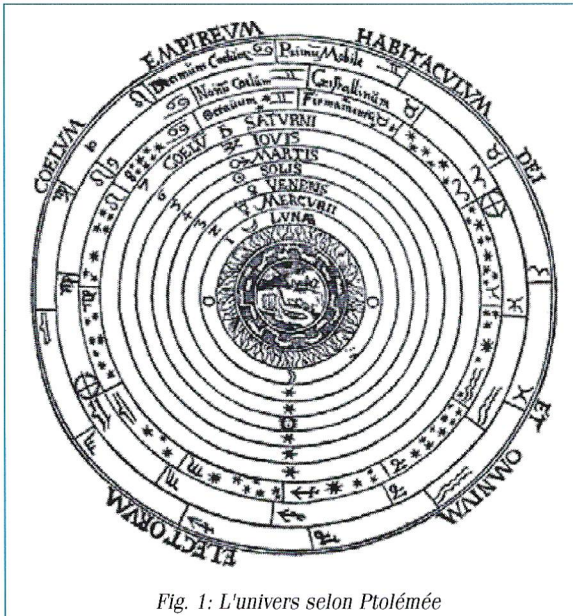


Fig. 1 : L'univers selon Ptolémée

devenant une hérésie à combattre n'ayant pas sa place dans l'ordonnement du monde. Cela s'expliquait aisément car la vision d'Aristote semblait bien plus naturelle et évidente que celle de Démocrite. En effet, rien dans l'observation ne venait confirmer la présence d'atomes très petits. La matière étant à nos yeux parfaitement continue, les atomes n'apparaissaient que comme une pure spéculation. Si le vide est indispensable aux atomistes, pour les

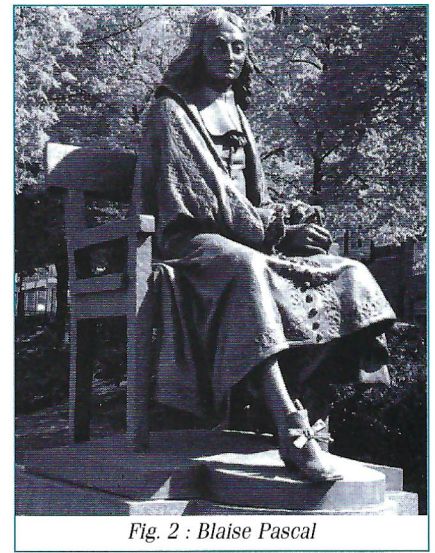


Fig. 2 : Blaise Pascal

des planètes qui se déplaceraient sans résistance dans l'atmosphère ? L'espace doit absolument être vide. D'un autre côté, les fontainiers de Florence ayant remarqué que les pompes aspirantes refusaient obstinément, quelle que soit la technologie employée, de monter l'eau à plus de 10 m, « l'horreur du vide » semblait avoir une limite. Evangelista Torricelli, élève de Galilée, eut l'idée de remplacer l'eau par du mercure qui à volume égal est 13,6 fois plus pesant. Il observa que la hauteur à laquelle le mercure consentait à monter était 13,6 fois plus petite que pour l'eau. Quelle que soit la forme du tube, la hauteur à laquelle monte le mercure est de 76 cm, celle-ci pouvant un peu varier au cours du temps. En haut du tube, au dessus du mercure, il y a bien quelque chose que l'on peut considérer comme du vide ce qui remettait en question le dogme de l'horreur du vide pour la Nature. Pour éviter d'avoir du vide, certains émirent l'hypothèse qu'il y avait un milieu ténu intangible : l'éther. Actuellement on sait qu'il n'y a pas un vide parfait mais de la vapeur saturante de mercure dont la très faible pression est négligeable.

3 - LA VARIATION DE LA PRESSION ATMOSPHERIQUE AVEC L'ALTITUDE

La colonne de mercure du baromètre est équilibrée par la pression atmosphérique. Le mercure étant à peu près 13,6 fois plus dense que l'eau pour équilibrer 1 mm de mercure il faut 13,6 mm d'eau. (densité du mercure : 13,579). Pour équilibrer la pression atmosphérique normale il faut 0,76 m de mercure ou bien $0,76 \times 13,579$ soit 10,32 m d'eau. Une pompe aspirante ne peut donc pas monter l'eau au delà de 10 mètres.

L'air étant un gaz compressible, le poids d'un litre d'air dépend étroitement de la pression et de la température. Au niveau de la mer, la masse d'un litre d'air sec à 0°C est 1,293 g et 1,204 g à 20°. Pour équilibrer 1 mm de mercure avec de l'air à 20°C, il faut donc $13,579 / 1,204$ soit 11,3 m d'air. Ceci montre, qu'au

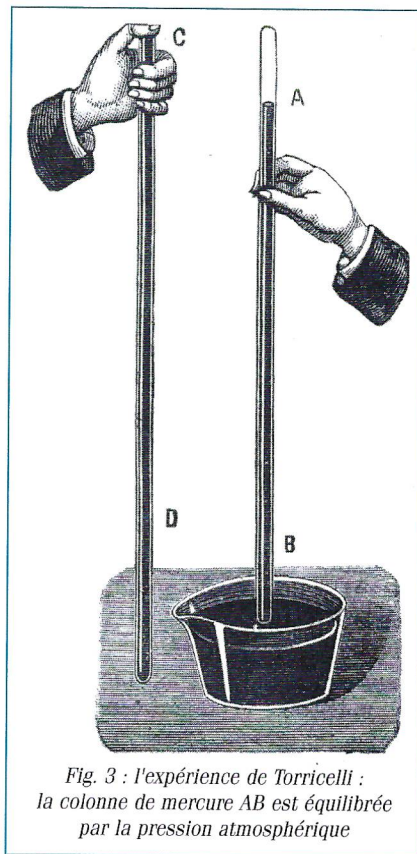


Fig. 3 : l'expérience de Torricelli : la colonne de mercure AB est équilibrée par la pression atmosphérique

voisinage du niveau de la mer, la pression atmosphérique diminue de 1mm de mercure tous les 11,3 m. Si l'atmosphère n'était pas compressible, son épaisseur, pour équilibrer 76 cm de mercure, serait de 8600 m mais en raison de sa compressibilité l'atmosphère s'étend beaucoup plus loin. A 50 km d'altitude il y a encore 1 mm de Hg de pression ; c'est cette atmosphère résiduelle qui freine les satellites artificiels en orbite basse, tous destinés à retomber sur terre.

La pression atmosphérique diminuant avec l'altitude, le poids du litre d'air diminue également avec l'altitude, par conséquent la hauteur d'air qui équilibre 1mm de mercure augmente peu à peu avec l'altitude. En première approximation aux faibles altitudes,

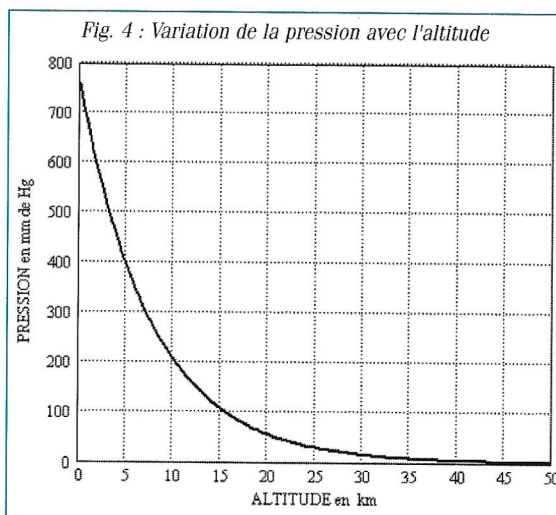


Fig. 4 : Variation de la pression avec l'altitude

on peut supposer que la pression est une fonction linéaire de l'altitude et l'on adopte souvent la variation précédente de 1 mmHg tous les 11,3 m d'altitude, valeur qui convient assez bien jusqu'à 3000 m et qui peut servir à régler les baromètres et les altimètres. Une approximation un peu plus précise de la pression atmosphérique en fonction de l'altitude est obtenue en utilisant une fonction exponentielle.

Pour pouvoir faire des comparaisons entre les mesures de pression faites en des lieux différents, on utilise la pression ramenée au niveau de la mer c'est à dire la pression qui régnerait en ce point à l'altitude zéro : c'est la PNM du lieu qui est donnée lors des prévisions météorologiques. Une manière simple pour, en un lieu donné, calculer la PNM est d'ajouter, à la pression mesurée lue sur la colonne de mercure, 1 mmHg tous les 11,3 m ou bien 1 hPa tous les 8,5 m.

4 - L'UNITÉ LÉGALE DE PRESSION : LE PASCAL

Dans le système international, l'unité légale de pression est le pascal, unité peu commode car très petite. La pression atmosphérique normale au niveau de la mer est de 101300 pascals. Pour l'atmosphère, on utilise plutôt un multiple : l'hectopascal (hPa).

Le pascal : c'est la force exprimée en newton (N) exercée par mètre carré de surface ($1 \text{ Pa} = 1\text{N} / 1\text{m}^2$) . La masse d'une colonne de mercure de 76 cm de hauteur et de 1 m² de surface est de :

$$1 \text{ m}^2 \times 0,76 \text{ m} \times 13\,579 \text{ kg/m}^3 = 10\,320 \text{ kg}$$

Pour obtenir la force à partir de la masse, il faut multiplier la masse par l'accélération de la pesanteur qui, au niveau de la mer, est de 9,81 m/s². La pression exercée par 76 cm de mercure est donc de :

$$(10\,320 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2) / 1\text{m}^2 = 101\,300 \text{ Pa}$$

Il y a peu, on utilisait souvent comme unité de pression le bar, la pression normale valant 1,013 bar. L'hectopascal est égal à

1 millibar, les baromètres à aiguille sont fréquemment gradués en mbar et en cm de mercure (cm Hg).

La correspondance entre hecto pascal et millimètres de mercure est la suivante :

$$1 \text{ mmHg} = 1.33 \text{ hPa}$$

$$\text{et } 1 \text{ hPa} = 0.75 \text{ mmHg}$$

La variation de la pression avec l'altitude est de l'ordre de 1 hPa tous les 8,5 m. On peut vérifier cela sur le site Internet du LAMP : le lundi 26 février 2007 à 11 heures on pouvait lire que la pression au niveau de la mer pour Clermont était de 1017 hPa et qu'au même instant, au sommet du Puy-de-Dôme elle était de 847 hPa ce qui donne une variation de 170 hPa pour 1464 m soit 1 hPa pour 8,6 m d'altitude.

5 - LA MASSE DE L'ATMOSPHÈRE ET DE LA TERRE

Ce qui précède nous permet de calculer très facilement la masse de l'atmosphère M_A . Cette masse est équivalente à une couche uniforme de 76 cm de mercure de masse volumique $\rho_{Hg} = 13\,600 \text{ kg/m}^3$ qui serait répartie uniformément sur la surface du globe terrestre. Le rayon terrestre étant $R = 6\,400 \text{ km}$ il vient :

$$M_A = 4\pi R^2 h \rho_{Hg}$$

$$= 4\pi (64 \times 10^2 \times 10^3)^2 \times 0.76 \times 13\,600$$

$$= 5.3 \cdot 10^{18} \text{ kg}$$

On peut comparer la masse de l'atmosphère à la masse de la terre M_T qui fut, pour la première fois évaluée en 1797 par Henry Cavendish grâce à une balance de torsion. La masse volumique moyenne de la terre étant $\rho_T = 5\,540 \text{ kg/m}^3$ On trouve :

$$M_T = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_T$$

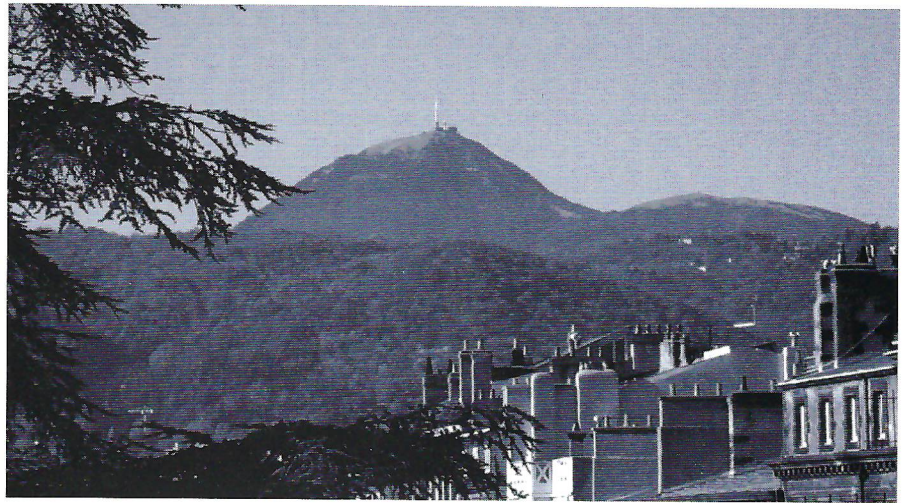
$$= \frac{4}{3}\pi (64 \times 10^2 \times 10^3)^3 \times 5\,540$$

$$= 6.08 \cdot 10^{24} \text{ kg}$$

L'atmosphère est donc une fraction très petite de la terre puisqu'elle ne constitue que 0.87 millionième de la masse de la terre, c'est-à-dire l'équivalent de 0.87 gramme par rapport à une tonne.

6 - LES RÉSULTATS DE L'EXPÉRIENCE DE PASCAL

Sur les indications de Pascal, son beau-frère Florin Périer, conseiller à la cour des aides de Clermont, fit au



Puy de Dôme le samedi 19 septembre 1648, l'expérience qui devait se révéler décisive. Le temps n'était pas très beau mais à cinq heures du matin, de Clermont, on voyait le Puy de Dôme (c'est cinq heures, heure solaire, donc actuellement sept heures, heure légale). Conformément à ce qui est relaté dans la suite du récit, on peut penser qu'il y avait ce jour-là un vent d'ouest qui, par effet de foehn, chassait les nuages au dessus de Clermont.



A huit heures, accompagné de quelques savants de Clermont, M. Périer se rendit dans le jardin du couvent des Minimes, situé près de la place de Jaude où il fut noté une hauteur barométrique de 26 pouces et 3 lignes $\frac{1}{2}$. Un tube fut laissé en place pour noter les variations de hauteur éventuelles durant la journée. M. Périer partit ensuite pour le Puy de Dôme élevé d'environ 500 toises au dessus de Clermont. Arrivé au sommet du puy, il remarqua que la hauteur n'était plus que 23 pouces et deux lignes. Le mercure avait donc baissé de trois pouces et une ligne et demie. Il répéta l'expérience cinq fois, tantôt à découvert sur divers points du sommet, tantôt à l'abri dans la chapelle de Saint Barnabé aujourd'hui disparue : le

mercure se maintint toujours au même niveau. En revenant à Clermont il fit à la Font de l'Arbre une nouvelle expérience et constata que le mercure s'était relevé d'un pouce et trois lignes. Enfin, de retour au jardin des Minimes, il lui fut déclaré que le baromètre laissé en observation dans ce lieu avait marqué toute la journée la même hauteur.

On peut penser que Florin Périer fut surpris de l'importance de la variation (8,5 cm) ce qui était vraisemblablement totalement inattendu. Pour cette raison le lendemain il fit une nouvelle expérience entre le haut et le pied de la tour de la cathédrale, où il nota une différence de deux lignes pour une hauteur de 20 toises.

Après avoir reçu ces résultats et noté qu'à une élévation de 20 toises correspondait une baisse de la colonne de mercure de 2 lignes, Blaise Pascal entreprit de vérifier cela entre le bas et le haut de la tour Saint-Jacques à Paris où il observa plus de deux lignes pour une hauteur de 24 à 25 toises, ce qui est conforme à l'observation de Florin Périer. Il remarqua immédiatement que l'on peut, avec un baromètre, faire du nivellement c'est à dire mesurer l'altitude d'un lieu.

7 - L'INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS DE PASCAL

Pour pouvoir interpréter les résultats de Périer il faut les traduire en unités actuelles puis ensuite les comparer avec ce que l'on connaît actuellement. Pour convertir les unités de longueur anciennes il faut utiliser le facteur de conversion défini en 1799 qui est de

443,296 lignes pour un mètre. Sachant qu'il y a 12 lignes dans un pouce, douze pouces dans un pied et 6 pieds dans une toise on obtient le tableau 1 de conversion ci-dessous. Les mesures de Florin Périer en unités anciennes et en unités actuelles sont rassemblées dans le tableau 2 où la pression normale est calculée avec une variation exponentielle en fonction de l'altitude. Pour une atmosphère normalisée, la variation de pression est de l'ordre de 1 hPa pour 8,5 m d'altitude.

On constate que le jour où a eu lieu l'expérience, la pression mesurée étant inférieure à la pression normale, il y avait une dépression atmosphérique sur Clermont (qui n'était pas encore Clermont-Ferrand) ; cela explique que le temps était variable avec vraisemblablement un flux d'ouest. Au sommet du Puy de Dôme, le temps était mauvais avec du brouillard et de la pluie : on remarque que la pression qui y a été mesurée est un peu supérieure à la pression qui devait régner au sommet. Les mesures ont certainement été faites un petit peu plus bas là où il y avait la chapelle St-Barnabé et la pression atmosphérique avait peut-être commencé à remonter depuis le début de l'expérience.

Pour confirmer les résultats obtenus avec l'expérience du Puy de Dôme, Florin Périer fit une seconde campagne de mesures le lendemain, dimanche 20 septembre 1648. A la tour de la cathédrale, il donne une variation de la colonne de mercure de 2 lignes pour 20 toises soit 4,5 mmHg pour 39 m d'altitude. Ceci donne une variation de 1 mm pour 8,6 m valeur pas très éloignée de la

valeur réelle qui est de 1 mmHg tous les 11,33 m. Cette erreur peut provenir soit d'une erreur sur la mesure de la pression soit d'une erreur sur la hauteur de la tour qui serait sous-évaluée. Il conclut que sept toises donnent 1/2 ligne, 27 toises 2 lignes 1/2 et 150 toises 15 lignes 1/2 soit 1 pouce et 3 lignes 1/2. Si l'on prend la valeur donnée pour 27 toises, il y a une variation de la colonne de mercure de 0,1 ligne de mercure par toise soit 1 mmHg pour 9,3 m d'altitude, ce qui compte tenu de la précision des mesures (1/2 ligne) est compatible avec la valeur réelle de l'ordre de 11 m par mm de Hg.

8 - L'ALTITUDE DU PUY DE DÔME

Florin Périer dans sa lettre à Pascal estime la hauteur du Puy de Dôme à 500 toises au dessus de Clermont ce qui fait 975 m au dessus de la place de Jaude soit une altitude de 1335 m sous-évaluée de plus de 100 m.

Au début du XIX^e siècle, Chateaubriand dans la relation des cinq jours qu'il passa à Clermont, du 2 au 6 août 1805, donne, pour le Puy de Dôme, une altitude de 825 toises soit 1610 m soit une surestimation de 170 m. Chateaubriand note "il y avait autrefois sur le Puy de Dôme une chapelle dédiée à Saint Barnabé ; on en voit encore les fondements, une pyramide de pierre de dix ou douze pieds marque aujourd'hui l'emplacement de cette chapelle. C'est là que Pascal a fait les premières expériences sur la pesanteur de l'air."

En 1851 Henri Lecoq (1802-1869), professeur d'Histoire Naturelle à la

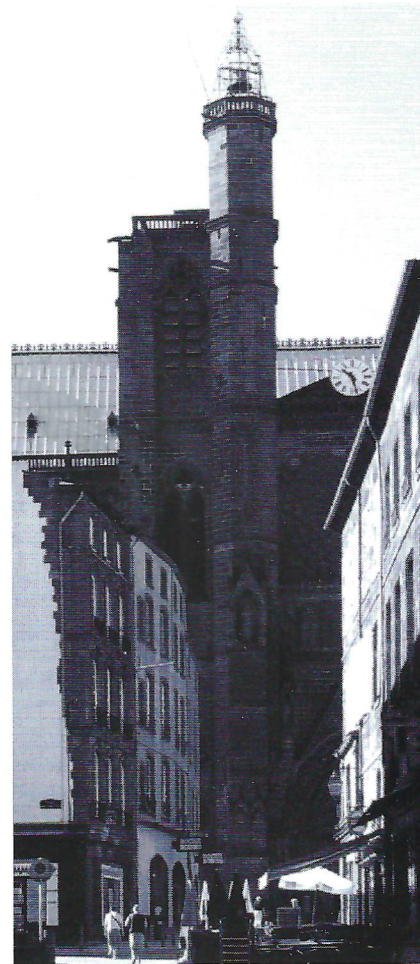


Fig. 5: La tour de la cathédrale

faculté de Clermont, dans son « Itinéraire de Clermont au Puy de Dôme » donne la bonne altitude avec 1468 m.

9 - LA REPRODUCTION DE L'EXPÉRIENCE DE PASCAL PAR LES JEUNES POUSSÉS

Le mercredi 15 novembre 2006 le groupe des "Jeunes Pousses" de

Unité de longueur	toise	Pied	pouce	ligne
En pieds	6	1	1/12	1/144
Dans le système métrique	1,949 m	0,325 m	2,707 cm	2,256 mm

Tableau 1: La conversion des unités anciennes

	Altitude en m	Pression normale en mm de Hg	Pression mesurée en pouces et lignes	Pression mesurée en mm de Hg	Pression mesurée en hPa
Couvent des Minimes	360	727	26" 3 lignes 1/2	713	950
La Font-de-l'arbre	809	689	25"	678	
Puy de Dôme	1464	636	23 " 2 lignes	628	836

Tableau 2: Les mesures faites par Florin Périer

	Altitude en m	Pression normale en mm de Hg	Pression mesurée en mm de Hg	Pression mesurée en pouces et en lignes	Pression mesurée par Périer	Pression mesurée en hPa
Rue de Bien-Assis	360	728	730	26 " et 11 lignes ½	26" et 3 lignes ½	983
La Font-de-l'Arbre	809	689	674	24" et 11 lignes	25"	907
Col de Ceysnat	1078	666	669	24 " et 8 lignes ½	*****	900
Puy de Dôme	1464	636	645	23" et 10 lignes	23 " et 2 lignes	868

Tableau 3 : les mesures de la pression atmosphérique faites par les jeunes pousses.

L'ADASTA avec Georges Anton dans le rôle de Florin Périer a, comme beaucoup d'autres depuis 1648, refait l'expérience de Pascal. Le rassemblement avait lieu au siège de l'ADASTA rue de Bien-Assis à proximité immédiate de la place Gilberte Périer, sœur de Blaise Pascal et épouse de Florin Périer. Le temps était très beau dans la Limagne avec un ciel bleu éclatant, mais, comme le jour de l'expérience de Pascal il y avait un temps de foehn avec un fort vent d'ouest sur les reliefs. Le départ a été donné à 14h30 heure légale, soit midi et demi heure de Pascal. Le trajet s'est fait en autocar beaucoup plus rapidement que du temps de Pascal. Il y a eu un premier arrêt à la Font-de-l'Arbre, près de l'école communale, un second au col de Ceysnat et un dernier au Puy de Dôme vers 16 heures. En raison du vent violent qu'il y avait à ce moment là, les mesures n'ont pas été faites au sommet du Puy de Dôme mais une cinquantaine de mètres plus bas sur la plateforme où arrivent la route à péage et le chemin des muletiers et où se trouve le restaurant. C'est vraisemblablement par le chemin des muletiers que l'équipage de Florin Périer est arrivé au sommet.

Cf : photo en 3^e page de couverture

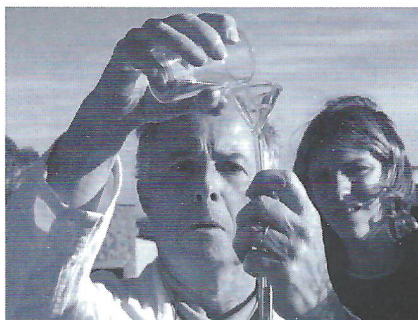


Fig. 6 : le remplissage du mercure

Sur le tableau 3 on constate que les mesures faites rue de Bien-Assis et au col de Ceysnat sont cohérentes et donnent 2 à 3 mm de Hg au dessus de la pression normale. La PNM, pression

au niveau de la mer, devait être de 763 mm au dessus de la pression normale c'est à dire 763 mm de Hg ou 1018 hPa ce qui correspond à l'aiguille du baromètre indiquant "variable".

A la Font-de-l'Arbre, la pression mesurée est de 674 mm, valeur inférieure à la pression qu'on aurait dû observer c.-à-d. 692 mm (689 + 3). Cela montre que l'altitude où a été faite la mesure n'est pas de 809 m mais plutôt de 990 m.

Au sommet du Puy de Dôme c'est l'inverse qui se produit. La pression mesurée correspond à une altitude de 1400 m et non pas aux 1464 m du sommet, ce qui est conforme à la réalité puisque la mesure a été faite à 50 mètres en dessous du sommet.

Si l'on compare les mesures faites par les Jeunes Pousses avec celles faites par Florin Périer, on remarque immédiatement que la différence de hauteur de la colonne de mercure entre Clermont et le Puy de Dôme est de 2" et 11 lignes ½ pour Florin Périer et de 3" et 1 ligne ½ pour les Jeunes Pousses. L'amplitude étant plus grande de 2 lignes pour Florin Périer, cela montre qu'il a bien du faire ses mesures au voisinage immédiat du sommet, là où les documents indiquent qu'il y avait la chapelle St-Barnabé et où l'on trouve aujourd'hui les bâtiments de l'observatoire.

Variation de la température avec l'altitude :

Entre la rue de Bien-Assis et le col de Ceysnat la température est passée de 22°C à 14°C pour une variation d'altitude de 720 m ce qui fait une variation de 1,1°C tous les cent mètres, variation très supérieure à la moyenne qui est de 0,6°C tous les cent mètres. Cela s'explique par le

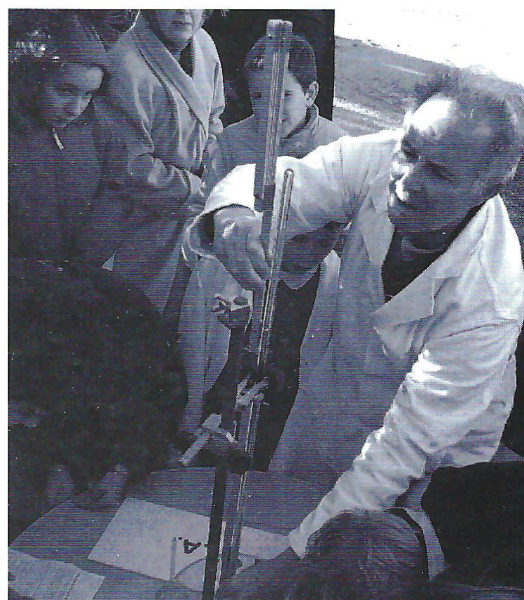


Fig. 7 : la mesure de la colonne de mercure

fort vent d'ouest qu'il y avait ce jour là qui créait un effet de foehn ayant comme conséquence d'augmenter la variation de la température en fonction de l'altitude. Cette variation s'est ensuite réduite puisqu'au Puy de Dôme la température extérieure était de 11°C, ce qui fait une variation de 3°C entre le col de Ceysnat et le Puy de Dôme pour 400 m de dénivellation soit environ les 0,6°C escomptés tous les 100 m.

10 - COMMENT RÉGLER UN BAROMÈTRE ANÉROÏDE

Avant que les stations météo numériques ne deviennent courantes, on ne disposait guère que de baromètres anéroïdes qui sont des baromètres différentiels devant être réglés en fonction de l'altitude du lieu où on les utilise, afin d'afficher la PNM, pression au niveau de la mer, qui est la seule à donner la tendance météo. Pour cela il faut les régler à partir d'une mesure absolue de la pression atmosphérique que l'on peut soit lire sur un baromètre de Torricelli, soit obtenir à partir des informations

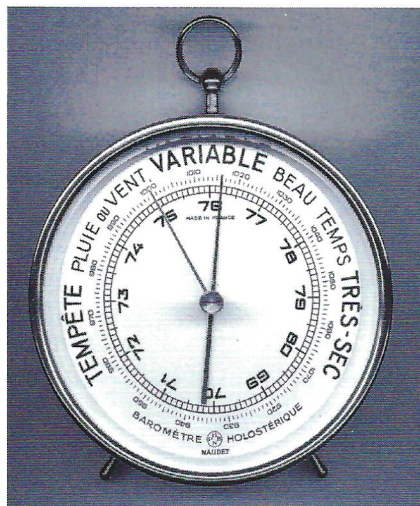


Fig. 8 : Le baromètre anéroïde

fournies par Météo-France. Ce réglage se fait par une petite vis au dos de l'appareil qui permet de déplacer l'aiguille de lecture.

a - Réglage à partir d'un baromètre de Torricelli ;

Lire la hauteur de la colonne de mercure puis, pour avoir la PNM, ajouter à la valeur lue 1 mm tous les 11,3 m d'altitude.

Exemple : l'altitude du lieu est de 360 m ce qui donne une correction de 32 mm. Si la hauteur de la colonne de mercure est de 726 mm, avec la correction, la PNM du lieu est de 758 mm de mercure. C'est la valeur qu'il faut afficher sur le baromètre.

b - Réglage à partir de la pression donnée par un site météo

La station météo du Laboratoire de Météorologie Physique (LAMP) situé à Clermont-Ferrand sur le campus des Cézeaux donne en temps réel sur son site Internet la PNM en hPa de Clermont. C'est cette valeur qu'il faut reporter sur son baromètre sur l'échelle graduée en hPa ou en mbar. Cette méthode est applicable quelle que soit l'altitude du lieu où l'on se trouve à condition de ne pas être trop éloigné de Clermont-Ferrand pour que la PNM de la station météo des Cézeaux soit à peu près égale à celle du lieu où est placé le baromètre.

11 - QU'EN EST-IL DU VIDE DE NOS JOURS ?

Jusqu'au début du vingtième siècle, la notion de vide a fait de la résistance : pour imaginer que la lumière puisse se propager dans le vide, on supposait que l'espace dans son

ensemble, y compris le vide, était rempli d'un élément subtil intangible que l'on appelait l'éther. Cet éther posait problème car il possédait un ensemble de propriétés contradictoires comme d'être infiniment ténu mais tout de même extrêmement rigide. A la fin du XIX^{ème} siècle, une expérience célèbre, l'expérience de Michelson et Morley, destinée à mettre en évidence le « vent d'éther » a finalement montré l'inexistence de l'éther. Suite à cette expérience, Albert Einstein a bâti la théorie de la relativité avec l'hypothèse que la lumière se propage dans le vide et que sa vitesse est une constante universelle indépendante de la vitesse de la source. De nos jours, le vide ne semble plus poser problème ; en électromagnétisme il est même considéré comme un « milieu » possédant une perméabilité et une permittivité servant de références pour les milieux matériels ; il est indispensable à la métrologie puisque la définition du mètre étalon fait intervenir la vitesse de propagation de la lumière dans le vide. Cependant, toutes les difficultés n'ont pas disparu pour autant : le vide dans lequel il y a de la lumière est-il toujours du vide ? Pour la physique quantique, le vide est impossible à petite échelle car il est sujet à des fluctuations énergétiques. Pour la technologie il n'est qu'une abstraction, un point limite aussi inaccessible que le zéro absolu pour les températures. En haut du tube de Torricelli il n'y a pas un vrai vide mais de la vapeur saturante de mercure. Enfin, pour l'esprit, il reste inconcevable en lui même puisqu'il faut toujours imaginer qu'il est contenu dans une enceinte matérielle. Le vide reste donc un sujet philosophiquement riche pour lequel les débats ne sont pas près d'être clos.

12 - CONCLUSION

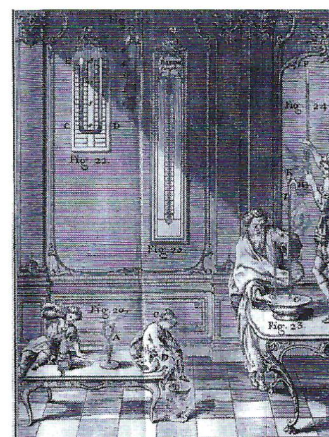
L'expérience de Pascal marque une étape très importante dans l'histoire de la physique car dix ans après Galilée et ses expériences sur la pesanteur avec des plans inclinés, c'est la deuxième fois qu'il est fait appel à l'expérimentation pour vérifier un principe physique. Jusque là, à la suite d'Aristote, la philosophie naturelle, qui à l'époque tenait lieu de physique, était fondée sur la

discussion philosophique. Après Pascal et Galilée, la philosophie naturelle allait peu à peu laisser la place à la physique, première science entièrement basée sur la démarche expérimentale. 24 années plus tard, c'est la méthode expérimentale que Newton utilisera pour expliquer la décomposition de la lumière.

La possibilité du vide allait ouvrir de nombreuses voies de recherche très fructueuses dans des domaines nouveaux. En 1650, Otto Von Guericke développe une pompe à vide qu'il utilise pour faire une expérience spectaculaire restée célèbre sous le nom d'expérience de Magdebourg : la puissance du vide est telle que des chevaux n'arrivent pas à séparer deux hémisphères de 80 cm entre lesquels le vide a été fait. L'utilisation du vide et de la pression allait peu à peu conduire en 1781 à la machine à vapeur de Watt et au machinisme industriel du XIX^{ème} siècle, en passant par les travaux de Denis Papin vers 1690 et la machine de Newcomen inventée en 1712.

Bibliographie

- Blaise Pascal ou le génie français, Jacques Attali, Le Livre de Poche n° 15348, 2002
- La Recherche, n° 400, 400 ans de sciences, septembre 2006
- Les grandes expériences scientifiques, Michel Rival, Points Sciences, Editions du Seuil, 1996
- Histoire générale des sciences, tome II la science moderne, PUF, 1969
- De la toise au mètre, J. Chandezon, Revue de l'ADASTA N° 65, mars 2007
- Royat Clermont, guide du promeneur à pied, A Boulle et Th Michelin, vers 1900
- Le Puy de Dôme et ses ruines, P Mathieu, Clermont-Ferrand, 1876
- Itinéraire de Clermont au Puy de Dôme, Henri Lecoq, Clermont-Ferrand, 1831
- Le spectacle de la nature, abbé Pluche, Paris, 1755
- Leçons de physique expérimentale, tome second, Abbé Nollet, Paris, 1745 (*)
- Pascal, le calcul et la théologie, Dominique Descotes, Les génies de la science n°16, Novembre 2003



Abbé Nollet – Leçons de physique expérimentale, Tome 2, planche 15, expériences avec le tube de Pascal, Paris 1745

Du mouvement perpétuel au défi énergétique

Par Antoine MOREAU

Maître de Conférences à l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand



Conférence présentée à l'ADASTA le 18 avril 2007.

UNE UTOPIE : LE MOUVEMENT PERPETUEL

Dans un futur relativement proche, les questions d'énergie vont sans doute prendre une place encore plus importante dans l'organisation de nos sociétés, et pour ainsi dire, dans notre vie quotidienne. Le but de cet article est de faire une présentation succincte et largement accessible de ce qu'est l'énergie, de ses propriétés et de ce qu'on appelle le défi énergétique.

Les hommes ont très vite compris que pour arranger leur univers immédiat selon leurs souhaits, ils devaient pouvoir mettre des objets en mouvement : pour les déplacer d'un endroit à un autre et ainsi édifier des bâtiments ou simplement récolter de quoi manger. Ils ont imaginé qu'il serait pratique de disposer d'une machine qui serait capable de mettre en mouvement n'importe quel objet sans perdre l'élan initial. Il ne s'agissait pas seulement d'avoir un mouvement qui ne se serait jamais arrêté, mais de disposer de la faculté de mettre n'importe quel objet en mouvement. On a appelé un tel dispositif un mouvement perpétuel.

On sait que déjà au treizième siècle on en rêvait, mais la quête du mouvement perpétuel connaît une forme

d'âge d'or au dix-huitième siècle, aux tout débuts de la physique. Nombreux sont ceux qui prétendent avoir inventé le mouvement perpétuel. Comme à l'époque, il n'y avait rien pour protéger ses idées (pas d'office des brevets en somme), personne ne fournissait jamais le plan détaillé de ces machines et il fallait se contenter de démonstrations où la machine était en partie cachée et de rumeurs.

Pierre Simon de Laplace comprend, à la fin du XVIII^{ème} siècle, qu'une quantité qu'on appellera l'énergie mécanique se conserve (au mieux) et qu'ainsi le mouvement perpétuel est impossible. L'Académie des Sciences le reconnaît. De nos jours, on ne peut plus breveter de mouvement perpétuel puisque de tels dispositifs sont jugés contraires aux lois de la physique - c'est dans les statuts de l'office des brevets. Nombreux sont cependant les illuminés qui pensent encore en avoir inventé un. Bien entendu, on ne parle plus de mouvement perpétuel, mais de sur-unité (des machines dont le rendement est supérieur à 1) pour faire sans doute plus moderne.

L'ÉNERGIE

On peut montrer que quand les lois physiques qui gouvernent un système ne changent pas avec le temps, il y a forcément une quantité qui se conserve. C'est ce que nous appelons l'énergie. L'énergie ne se mesure pas, c'est une quantité qu'on peut calculer. C'est sans doute pour cette raison qu'il est si difficile de

comprendre que le mouvement perpétuel est impossible : l'énergie est une quantité très abstraite. L'énergie prend différentes formes : elle passe d'une forme à une autre, mais toujours en se conservant. Il y a deux grands types d'énergie : l'énergie cinétique, qui est visible, et l'énergie potentielle, qui est invisible.

L'énergie cinétique est celle du mouvement. S'il s'agit de mouvements macroscopiques, c'est une forme très visible. C'est celle qui intéressait les anciens, finalement. S'il s'agit de mouvements microscopiques, c'est ce qu'on appelle la chaleur, l'énergie d'agitation des constituants qui composent un objet. Cette agitation n'est pas visible, mais elle est sensible : en touchant, on peut savoir si les constituants s'agitent ou pas.

Et puis il y a l'énergie potentielle. Quand on lâche une balle, elle tombe : elle gagne, au cours de sa descente, une énergie cinétique qu'elle n'avait pas au départ. On dit donc qu'elle avait une énergie potentielle, liée à son poids puisque c'est bien lui qui la tire vers le bas. C'est donc de l'énergie potentielle gravitationnelle.

Pour chaque type de force, il existe une énergie potentielle : pour la gravitation, pour les forces électromagnétiques, et pour les forces nucléaires.

Prenons l'exemple de la combustion du pétrole. Quand le pétrole brûle, beaucoup de chaleur et de lumière sont libérées. Ce sont des formes d'énergie visibles. Donc le pétrole

contient une énergie potentielle : elle est liée au fait que lorsque les liaisons chimiques se réarrangent, c'est en général pour que certains électrons prennent des places plus proches des noyaux. Les électrons sont en effet attirés par les noyaux grâce à la force électrique. Plus ils sont loin du noyau, plus on peut dire qu'ils ont en fait d'énergie potentielle électrique. Lors d'une réaction chimique, comme les électrons se rapprochent, ils perdent de l'énergie potentielle électrique qui est libérée sous forme de chaleur et de lumière. On dit en général qu'il s'agit d'énergie potentielle chimique.

Il y a aussi une énergie potentielle nucléaire : quand deux noyaux d'hydrogène se rencontrent, ils peuvent fusionner en libérant cette énergie potentielle. C'est ce qui se passe dans les étoiles et qui fait qu'elles brillent. Cette énergie est aussi libérée quand un noyau d'uranium se brise spontanément.

L'énergie est donc un concept très puissant parce que c'est une quantité qui se conserve - quels que soient les phénomènes physiques mis en jeu. C'est pour étudier l'énergie que la thermodynamique a été inventée, à la croisée de toutes les disciplines de la physique et de la chimie. Une fois

qu'on a bien compris que, par définition, l'énergie est ce qui se conserve, le mouvement perpétuel paraît vraiment utopique puisqu'il nierait l'existence d'une quantité conservée. Pour qu'un mouvement perpétuel puisse fonctionner, il faudrait que les lois de la physique changent en permanence.

Le problème, c'est que l'énergie a tendance à se dissiper : si vous prenez un mouvement macroscopique, il est en général freiné et son énergie cinétique initiale devient de la chaleur. La chaleur, c'est de l'agitation microscopique désordonnée. Autant on peut tirer quelque chose de l'énergie cinétique macroscopique, autant, pour nous elle est (presque) perdue si elle est sous forme de chaleur. Presque, parce que ce n'est pas vrai si cette chaleur est suffisamment concentrée - c'est bien le cas dans les centrales nucléaires ou thermiques. Bref pour nos besoins nous avons besoin d'une énergie concentrée et utilisable - et ça, c'est beaucoup plus difficile à trouver que de l'énergie tout court. On ne devrait pas dire « source d'énergie », mais « source d'énergie utilisable ». Justement, voyons ce dont nous disposons dans ce registre.

● ● ● ● ● LES SOURCES D'ÉNERGIE

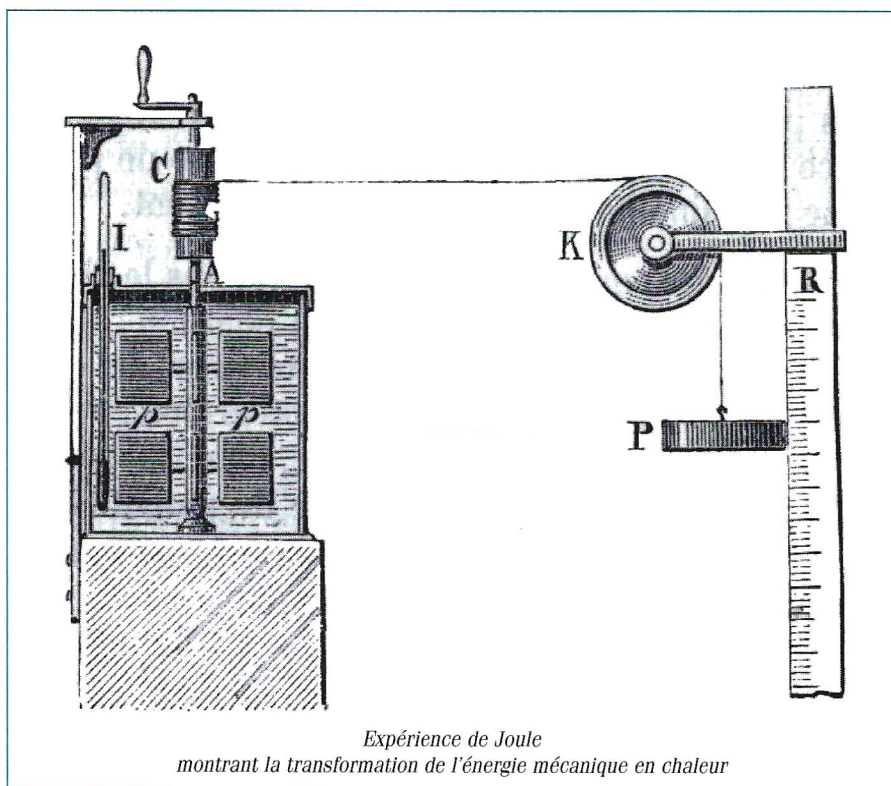
Nous habitons la lithosphère, c'est à dire l'écorce terrestre. L'énergie nous parvient sous forme utilisable de trois sources différentes. La principale est la lumière du soleil. La seconde est la chaleur et les éléments radioactifs (ils ont une énergie potentielle nucléaire) qui viennent du centre de la terre. La dernière, qu'on oublie souvent, est l'énergie des marées.

Ces trois types d'énergie créent des mouvements, ou de la chaleur, et finissent donc dissipés. La croûte terrestre s'en débarrasse alors en émettant cette énergie sous forme de lumière : les infrarouges. C'est pour cette raison que les nuits sans nuages sont plus fraîches : les nuages retiennent les infrarouges, donc la chaleur. Lorsque le ciel est dégagé, la terre se refroidit en émettant des infrarouges dans l'espace.

La lumière du soleil traverse l'atmosphère, qui est transparente. Elle chauffe le sol, qui chauffe l'air juste au dessus. Or l'air chaud est plus léger que l'air froid et il a tendance à monter à cause de la poussée d'Archimède (pensez à une montgolfière !). C'est ce qu'on appelle des mouvements de convection, et c'est ce qui crée le vent. L'énergie éolienne est donc une énergie dérivée de l'énergie solaire.

Le vent crée les vagues à la surface de la mer. La surface de la mer, chauffée par les rayons solaires, laisse s'échapper de la vapeur d'eau, qui ira dans les nuages et créera la pluie : l'énergie hydraulique des barrages est donc de l'énergie solaire. Une partie de cette énergie solaire est aussi stockée sous forme chimique dans les plantes.

Les animaux, et nous, mangeons les plantes et nous récupérons cette énergie chimique - c'est elle qui nous permet de nous mouvoir et tout simplement de vivre. Parfois les plantes se fossilisent sous forme de charbon, de gaz « naturel » ou de pétrole dans le sous-sol. Les énergies fossiles sont justes des réserves d'énergie solaire !



*Expérience de Joule
montrant la transformation de l'énergie mécanique en chaleur*

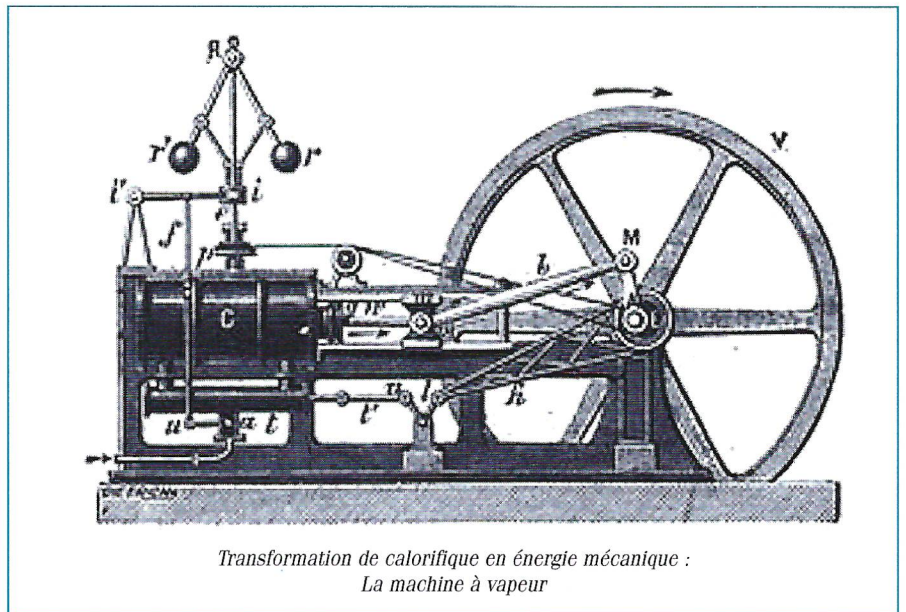
De l'intérieur de la terre nous proviennent de la chaleur et des éléments radioactifs (dont la désintégration produit la chaleur en fait). Les mouvements de convection qui se créent à cause de cette chaleur et des différences de températures sont responsables de nombreux phénomènes. Citons le champ magnétique terrestre qui nous protège, le volcanisme, la tectonique des plaques (donc les tremblements de terres, les raz-de-marée et les montagnes !).

L'énergie nucléaire que nous produisons provient des éléments radioactifs dont nous accélérons la désintégration, c'est-à-dire la transformation de l'énergie potentielle nucléaire en chaleur.

Les marées sont dues à la différence entre la période de la rotation diurne de la Terre (1jour) et celle de la révolution de la Lune autour de la Terre (27 jours). Sous l'effet des marées, ces deux mouvements évoluent lentement de façon que leurs périodes se régularisent. Dans le cas du système Terre-Lune la source d'énergie marémotrice est essentiellement l'énergie cinétique de rotation de la Terre. Les marées dissipent un peu cette énergie, la durée du jour augmente très doucement.

Il y a plusieurs centaines de millions d'années, le jour durait en fait 18 heures !

L'énergie des usines marémotrices est en fait de l'énergie de rotation de la terre. Dans l'absolu, ce n'est donc pas une énergie « renouvelable », mais en réalité, il nous faudrait tellement de temps pour arrêter la rotation de la terre à l'aide d'usines marémotrices que le soleil aurait déjà explosé. On peut donc presque dire qu'il s'agit d'une énergie renouvelable (on devrait dire inépuisable à l'échelle humaine).



La terre se débarrasse de sa chaleur en émettant des infrarouges, parce que tout corps chaud émet de la lumière naturellement. C'est d'ailleurs pour cela que le soleil nous éclaire. Comme elle est moins chaude, la terre n'émet pas de lumière visible, que des infrarouges. Une partie de ces rayonnements est absorbée par l'atmosphère : c'est ce qu'on appelle l'effet de serre. Sans lui, la chaleur de la terre partirait trop vite, et il ferait vraiment froid - la terre serait glacée et inhospitalière. Mais en ce moment, parce que le dioxyde de carbone que l'homme a rejeté dans l'atmosphère absorbe encore plus les infrarouges, la terre emmagasine de plus en plus de chaleur : c'est le réchauffement climatique.

LA RAREFACTION DE L'ENERGIE

Maintenant que les bases sont posées, nous allons voir en quoi un véritable défi nous attend dans le domaine de l'énergie.

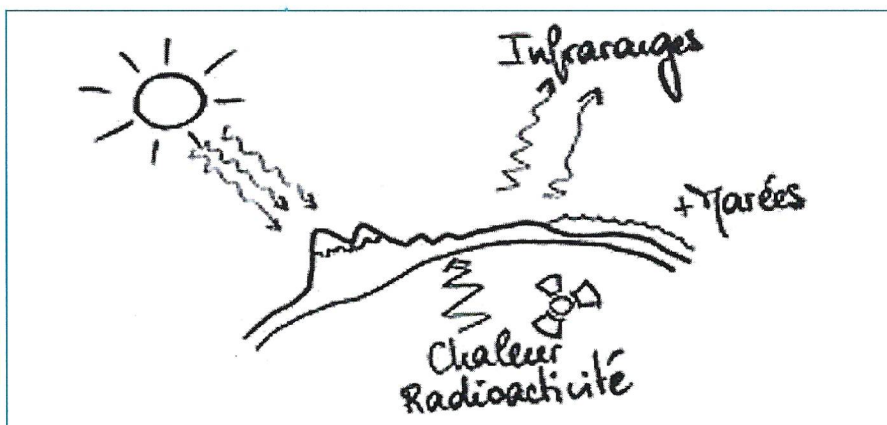
Nous consommons en France, consommateurs ou industriels, une énergie finale équivalente à celle contenue dans 160 millions de tonnes de pétrole (de l'énergie potentielle chimique).

- L'électricité représente 20% de cette consommation, elle est produite en utilisant le nucléaire à 80% et l'hydraulique (les barrages) pour le reste, en gros. L'éolien ou le solaire photovoltaïque sont négligeables.
- La moitié de ce que nous consommons provient effectivement du pétrole.
- Le gaz représente 20% de l'énergie consommée, le charbon 5%.
- Et le bois utilisé pour le chauffage représente 7% de notre consommation d'énergie (c'est de l'énergie solaire).

Que faisons nous de cette énergie ? Eh bien ce sont les ménages qui la consomment à hauteur de 30% (il ne faut donc pas croire que seuls les industriels ont un défi à relever), essentiellement pour chauffer leurs habitations (75% des 30% consommés) et pour faire fonctionner les appareils électroménagers.

Le tertiaire (les services, l'enseignement) consomment 12% de cette énergie - dont presque la moitié pour le chauffage des bâtiments. Le reste est utilisé pour les ordinateurs ou l'éclairage.

Les transports consomment le tiers de notre énergie. Et aux deux tiers, cette énergie est consommée sous



forme de pétrole ou de dérivés. Bref, nous sommes dépendants du pétrole pour nous déplacer.

Enfin, l'industrie n'utilise qu'un quart de cette énergie, essentiellement pour produire les matières premières (acier, papier, aluminium...) mais pas tellement pour en faire un produit fini (comme une voiture). Cette dernière opération demande surtout du temps humain.

Le problème est simple : nous avons trois bonnes raisons de nous priver des sources fossiles d'énergie. D'abord parce qu'elles nous rendent dépendants de pays tiers pas toujours très séduisants. De plus, ces sources finiront par se tarir. Enfin, il serait bien que nous limitions le réchauffement climatique. Pour cela, nous devons diviser le plus vite possible par quatre notre consommation d'énergies fossiles. Soit remplacer les deux tiers de l'énergie que nous utilisons actuellement !

Si nous ne le faisons pas, les ressources viendront à s'épuiser. Mais les problèmes arriveront avant que nous ayons vraiment tout épuisé. Quand nous aurons extrait la moitié du pétrole existant, nous ne pourrons pas extraire l'autre moitié au même rythme. Nous paierons alors de plus en plus cher le pétrole, qui représente la moitié de notre consommation énergétique ! Et la date que retiennent les pétroliers (très prudemment) c'est 2020 pour que le problème se pose. Autrement dit : demain.

Je souhaiterais faire une petite parenthèse qui concerne l'économie. Un système dans lequel on laisse chacun faire selon ses goûts est un système libéral : chacun essaie de gagner le plus possible d'argent, et d'en payer le moins possible pour un service (un objet manufacturé est une forme de service). En faisant cela, on minimise le temps humain nécessaire pour faire fonctionner les choses. Plus on a besoin de temps humain pour quelque chose, plus c'est cher. Si la main-d'œuvre est chère en France, c'est qu'on paie aussi pour le système éducatif et le système de santé qui se trouvent derrière l'ouvrier. Si la main-d'œuvre est si peu chère en Chine, c'est simplement qu'en payant un ouvrier chinois, on ne paie que le paysan qui

le nourrit ou presque. L'économie est donc la discipline qui étudie le temps humain et son utilisation. C'est pour cela qu'elle apparaît à la fois déconnectée de toutes les autres disciplines et comme la discipline reine : c'est celle qui s'occupe de ce que nous faisons de nos vies.

Jusqu'à il y a peu, nous ne payions dans le pétrole que le temps humain nécessaire à son extraction, soit 10\$ par baril en gros. Ce prix n'a pas vraiment augmenté. Mais maintenant, on paie de plus en plus la rareté du produit - à cause d'une très forte demande. D'où un baril à 60 \$. Et on peut raisonnablement penser que ce n'est que le début.

Pour l'instant, l'énergie en économie, c'est une sorte de sous-domaine : nous avons, sous forme fossile, une énergie abondante et peu chère c'est-à-dire demandant peu de main-d'œuvre pour être extraite. L'énergie, c'est donc quelques pourcents de notre PIB. Or en réalité, on a besoin d'énergie pour tout faire - et ça, c'est une loi physique. Le jour où l'énergie deviendra vraiment très chère, on s'apercevra qu'elle conditionne à peu près tout : non seulement pour faire quelque chose il faut du temps humain, mais il faut aussi de l'énergie. Et ce jour là, les processus qui sont énergétiquement plus efficaces deviendront aussi économiquement très rentables ce qui est rarement le cas aujourd'hui.

● ● ● ● ● LES ENERGIES DU FUTUR

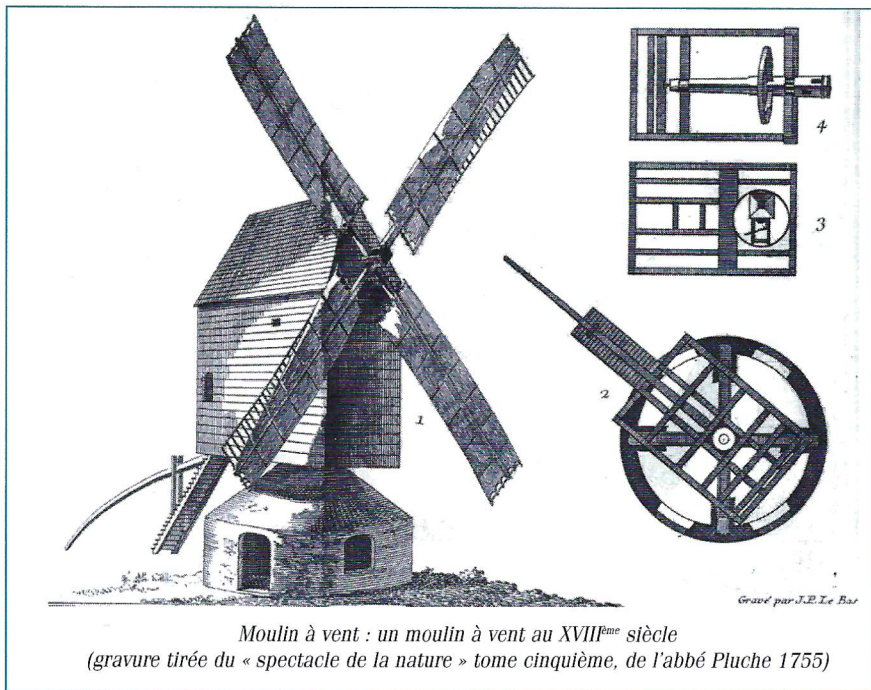
D'où tirerons-nous l'énergie que nous utiliserons dans le futur si ce n'est pas des énergies fossiles ? En réalité, si on regarde les choses en face, on s'aperçoit qu'absolument rien ne permettra de remplacer rapidement les énergies fossiles.

Ainsi l'hydrogène n'est qu'un vecteur, comme l'électricité. De la même manière qu'on ne produit pas l'électricité en récupérant du courant dans la nature, on ne trouve pas l'hydrogène à l'état naturel, il faut le produire donc consommer de l'énergie pour ce faire. L'hydrogène ne sera pas la solution. L'hydraulique est en France au maximum de ses capacités et ne représentera jamais que 3% en

gros de notre consommation totale. Les usines marémotrices demandent des sites très particuliers, très rares et très étendus et elles resteront sans doute marginales. L'éolien pourrait potentiellement fournir (et à condition d'avoir plusieurs centaines de milliers d'éoliennes, ce qui est loin d'être le cas), 2% de notre consommation totale actuelle. L'énergie solaire pourrait fournir jusqu'à 20% de notre consommation à condition de couvrir tous les toits de panneaux solaires, tous.

Et cela demandera une énergie considérable pour le faire une première fois - énergie dont nous ne disposerons pas si jamais nous n'avons plus de pétrole. Le bois est une forme d'énergie solaire - sous une forme facilement utilisable. Il représente déjà 7% de notre consommation totale, il pourrait représenter un peu plus de 10%. Au delà, il faudrait couvrir de grandes parties du pays de forêts à pousse rapide. Il y a aussi les biocarburants, produits à partir de blé, de betterave ou de colza. Mais en réalité, il faut en énergie à peu près autant (sous forme de pétrole ou de ses dérivés) que ce que les biocarburants fournissent - ce n'est rentable que grâce aux taxes, car c'est énergétiquement pratiquement absurde -. Seule la canne à sucre est très rentable énergétiquement : elle pousse toute seule sans qu'on ait besoin de beaucoup s'en occuper. De toutes façons, les plantes stockent au maximum 3% de l'énergie solaire qu'elles reçoivent. C'est faible même comparé aux 15% des panneaux photovoltaïques.

Ces raisonnements ne s'appliquent qu'à la quantité d'énergie que pourraient fournir les différentes sources. Pas s'il est facile ou non de l'utiliser. Si on choisit les panneaux photovoltaïques, il faudra consommer au maximum l'électricité sur place et ne pas compter la faire beaucoup voyager : au moins un tiers de l'électricité produite est perdue pendant le transport. Elle se stockera sans doute aussi très mal. Or il le faudra, car comme l'éolien, les panneaux produisent de façon intermittente. Les nuages ou la nuit, et même l'hiver perturbent nettement la production pendant les périodes où nous en aurons sans doute le plus besoin...



LES ECONOMIES D'ENERGIE

Il faudra donc que nous renoncions tôt ou tard à une grande partie de l'énergie que nous consommons actuellement. Est-ce possible ?

Il faudrait par exemple que nous arrêtions de nous chauffer. C'est possible : il suffit d'isoler nos habitations suffisamment, et de bien les penser. Nous pouvons déjà le faire et ainsi économiser 30% de toute l'énergie que nous consommons au bas mot !

Il y a un tiers de l'énergie pour lequel les choses se feront au cas par cas, à coup de petites améliorations : c'est le fonctionnement de l'électroménager, des ordinateurs ou la fabrication des matières premières.

Et il y a un gros tiers où les choses devront évoluer énormément : ce sont les transports. Car les transports sont basés sur le pétrole et ses dérivés. C'est ainsi que les avions ne survivront pas à la fin du pétrole parce qu'ils sont trop dépendants du kérosène – même ceux qui gèrent l'aviation civile en sont convaincus. Nous renoncerons donc à nos vacances d'une semaine à l'autre bout du monde : seuls les riches pourront prendre l'avion. Un avion utilise en fait une part énorme de son énergie non pas pour avancer, mais pour se maintenir en l'air. Faire un voyage en avion, dans le meilleur des cas, consomme autant d'énergie que de le faire seul en voiture.

Les voitures telles que nous les connaissons ne survivront sans doute pas non plus. Le rendement des moteurs thermiques qui équipent nos voitures est faible : 30% seulement de l'énergie contenue dans l'essence ou le diesel est convertie en mouvement. Nos voitures sont lourdes, parce qu'elles sont supposées pouvoir rouler à des vitesses élevées (voire très élevées) en toute sécurité. Elles sont censées le faire sur de grandes distances - d'où l'utilisation du pétrole, qui a une densité énergétique inégalée : en emportant peu de poids, on emporte beaucoup d'énergie.

Mais avons nous vraiment besoin d'une voiture capable de faire 1000 km d'une traite à une vitesse de plus de 100 km à l'heure quand nous faisons surtout 30 km dans une même journée à une vitesse moyenne de 40 km à l'heure ? En réalité non. Alors pourquoi ne pas imaginer que nous utilisions des voitures électriques (le rendement d'un moteur électrique est de 90%) qui se chargeraient au soleil (le rendement des cellules est de 15%, 10% si on stocke l'énergie, ce qui est à comparer aux 3% des plantes si on utilise des biocarburants) ? Elles seraient forcément légères car elles n'auraient pas besoin de résister à des chocs frontaux à 100 km à l'heure. Elles pourraient même être confortables pour tous : en ne polluant pas, en ne faisant que peu de bruit. Elles demanderaient peu d'entretien (un moteur électrique, ça ne s'use pas

beaucoup c'est un fonctionnement très simple). Pour les longs trajets, nous pourrions simplement louer des voitures à moteur thermique, ou prendre le train ou le bateau énergétiquement très sobres. Bien que nous ne soyons manifestement pas prêts à de telles extrémités, c'est presque inévitable. Nous allons devoir changer nos modes de vie - particulièrement en ce qui concerne les transports.

CONCLUSION

Le défi énergétique sera difficile à relever, au sens où il ressemblera un peu à une sorte de guerre : le début de la seconde guerre mondiale est la seule fois dans l'histoire de France où l'on a divisé par quatre la consommation énergétique. Mais ce n'est pas impossible : nous aurons du temps pour nous adapter, et j'ai essayé de montrer ici quelles seront les voies que nous risquons d'emprunter quand la physique aura rattrapé l'économie. Il est sûr que nous allons devoir isoler nos habitations de façon bien meilleure - on entend déjà beaucoup parler. Il est sûr qu'ensuite le tour des transports viendra : la consommation de l'éclairage est ridicule en comparaison. Nous n'éviterons donc pas d'envoyer nos voitures actuelles à la casse en mettant des ampoules basse consommation. Il semble probable que nous ne nous déplacerons plus de la même manière - en tous les cas, les automobiles du futur ne ressembleront sans doute pas à celles que nous utilisons maintenant. Nous ne prendrons plus l'avion, mais le bateau ou le train. Et il faut nous y préparer le plus tôt possible : il faut du temps et de l'énergie pour déployer des solutions, comme l'isolation des logements ou les panneaux solaires. Il faut le faire avant d'y être obligé par la pénurie d'énergie.

Références : J'ai choisi de ne mettre ici que des références qu'on trouvera sur le web. D'abord mon propre site de vulgarisation, où l'on retrouvera les notions de bases sur l'énergie : <http://www.e-scio.net>

Le site de Jean-Marc Jancovici, un incontournable du changement climatique et du défi énergétique : <http://www.manicore.com>

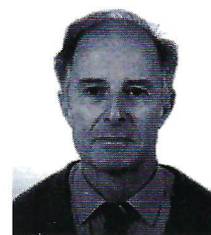
Enfin, le site du ministère de l'industrie sur lequel on retrouvera les principaux chiffres et un certain nombre des prévisions que j'ai faites ici. Le défi énergétique est peut-être avant tout un défi de communication !

<http://www.industrie.gouv.fr/>

Récréation mathématique : la quadrature du cercle

Par *Georges ANTON*

Ingénieur chimiste ENSCT, Vice Président de l'ADASTA



Rappel :

On appelle « quadrature » l'opération géométrique permettant de construire un carré équivalent à une aire donnée.

Ayant été recherchée durant des siècles pour ne pas dire des millénaires, la quadrature du cercle a été reconnue impossible au cours du XIX^{ème} siècle (en 1882 très exactement par le mathématicien allemand von Lindemann qui a montré le caractère transcendant du nombre π).

On remarquera qu'une très bonne valeur approchée de π est le nombre d'Adrien Metius c'est-à-dire 355/113.

En effet :

$$355/113 = 3,14159292\dots$$

$$\pi = 3,14159265\dots$$

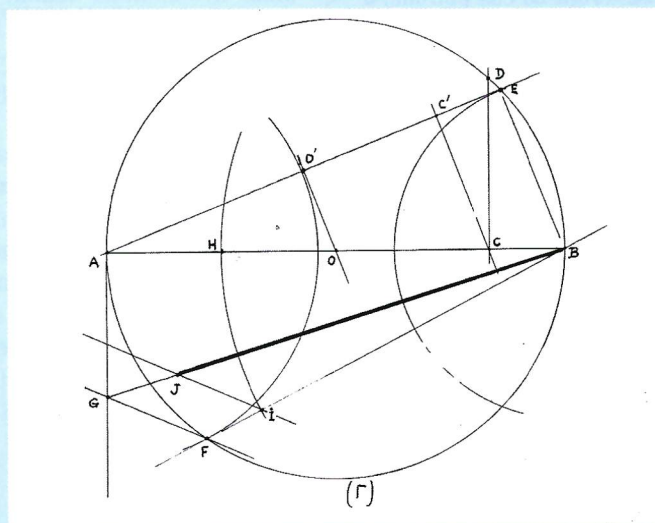
Les 2 nombres ne diffèrent donc que d'environ 3 dix-millionièmes. Donc, si partant d'un cercle de rayon 1, on arrive à construire un carré dont le côté est égal à $\sqrt{355/113}$ en s'aidant uniquement de la règle et du compas, on aura réalisé la quadrature du cercle à quelques dix-millionièmes près.

Cette construction, remarquable par son ingéniosité, pose la question du cheminement de la pensée. Nous l'indiquons ci-dessous et invitons le lecteur à la reproduire à l'aide d'un crayon et d'une feuille de papier, ne serait-ce que pour en apprécier la beauté et pour en saisir la complexité.

Elle a été imaginée par le mathématicien indien Srinivasa Ramanujan (1887-1920).

CONSTRUCTION GEOMETRIQUE

- 1°) Soit [AB] le diamètre d'un cercle (Γ) de centre O et de rayon unité. On construit le point C tel que $OC = 2/3 OB$.
(la division en 3 parties d'un segment donné se fait sans difficulté à l'aide de la règle et du compas)
 - 2°) La perpendiculaire à [AB] en C coupe (Γ) en D. On trace le cercle de centre B et de rayon CD. Il coupe le cercle (Γ) en un point E, que l'on place du même côté que le point D par rapport au diamètre [AB].
 - 3°) On trace les droites parallèles à [BE] en O et C qui coupent respectivement [AE] en O' et C'.
 - 4°) Le cercle de centre A et de rayon AO' coupe le cercle (Γ) en deux points. Soit F celui de ces points qui n'est pas du même côté de [AB] que D.
 - 5°) On trace la tangente en A au cercle (Γ) et on place le point G tel que $AG = O'C'$, le point G étant situé du même côté que le point F par rapport à [AB].
 - 6°) Soit H le milieu de [AO]. On trace le cercle de centre B et de rayon [BH]. Il coupe [BF] en I.
 - 7°) On trace la parallèle à [GF] passant par I. Elle coupe [BG] en J.
- En calculant BJ on trouve $BJ = \sqrt{355/113}$
Un carré de côté BJ a donc pour aire : $\sqrt{355/113} \times \sqrt{355/113} = 355/113$



Démonstration :

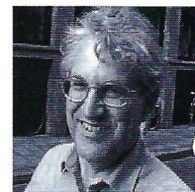
- dans ODC (Pythagore) $CD = BE = \sqrt{5} / 3$ et $OO' = \frac{1}{2} BE = \sqrt{5} / 6$
 dans AO'O (Pythagore) $AO' = AF = \sqrt{31} / 6$ et $AG = O'C' = 2/3 AO' = 2 \sqrt{31} / 18$
 dans ABF et AGB (Pythagore) $BF = \sqrt{113} / 6$ et $BG = \sqrt{355} / 9$ $BI = BH = 3/2$
 dans BJI et BGF (Thalès) $BJ/BI = BG/BF$ d'où $BJ = \sqrt{355/113}$

Le Cust est devenu : Polytech' Clermont-Ferrand

Par Michel NARANJO

Président de l'ADASTA,

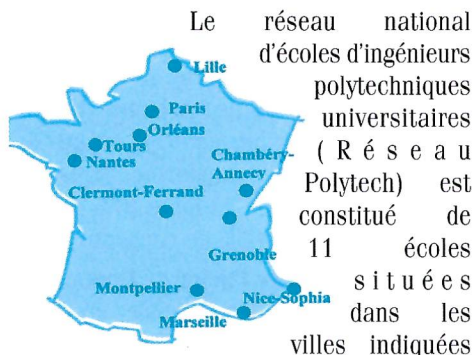
Professeur émérite à l'Université Blaise Pascal, enseignant au CUST de 1969 à 2004.



Créé en 1969 sous le nom de Centre Universitaire des Sciences et Techniques, le CUST est devenu, lors de la partition de l'Université de Clermont-Ferrand : l'Institut des Sciences de l'Ingénieur de l'Université Clermont II (Blaise Pascal). Très vite, le besoin de travailler en réseau, en particulier pour le recrutement des élèves ingénieurs, a conduit à la mise en place du « Réseau Eiffel » regroupant les quatre premiers Instituts des Sciences de l'Ingénieur en France : Clermont-Ferrand, Grenoble, Lille et Montpellier. Ces quatre écoles ont favorisé et animé l'élargissement du Réseau Eiffel à un ensemble d'écoles universitaires d'ingénieurs donnant ainsi naissance à un vaste réseau d'écoles polytechniques universitaires.

QU'EST-CE QU'UNE ECOLE POLYTECHNIQUE UNIVERSITAIRE ?

Une école polytechnique universitaire est constituée de filières d'ingénieurs en formation initiale, continue, en alternance et par apprentissage. Elle a un flux minimal de 250 élèves ingénieurs, des laboratoires de recherche en commun avec l'Université et participe à la formation doctorale de l'Université.



Le réseau national d'écoles d'ingénieurs polytechniques universitaires (Réseau Polytech) est constitué de 11 écoles situées dans les villes indiquées sur la carte ci-contre. Il offre 50 spécialités de formation représentant 2700 ingénieurs diplômés par an.

Le Réseau Polytech a pour objectif :

- le recrutement commun : dossier et entretien unique, affichage global des places disponibles, sessions de sélection à l'étranger,
- la mutualisation des relations internationales en particulier la gestion des programmes d'échanges et de bourses de stage à l'étranger,
- la mobilité des élèves entre les écoles du réseau sur la totalité de la troisième année. Ainsi un élève peut se former dans une spécialité très pointue professée dans une ville différente de celle de son recrutement initial.
- la mise en commun de différentes problématiques pédagogiques. Cela concerne en particulier les enseignements des disciplines transversales comme les langues, le management, l'expression et la communication.

POLYTECH' CLERMONT-FERRAND



Cette école d'ingénieurs regroupe 5 spécialités :

- Génie biologique, Génie civil, Génie électrique, Génie mathématique et modélisation, Génie physique.
- La recherche s'appuie principalement sur 6 laboratoires de l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand :
- LASMEA : Laboratoire des Sciences des Matériaux pour l'Electronique et d'Automatique ;
 - LGCB : Laboratoire de Génie Chimique et Biochimique ;
 - LGC : Laboratoire de Génie Civil ;
 - Laboratoire de Physique Corpusculaire ;

- LIMOS : Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et Optimisation des Systèmes. 60 doctorants issus de Polytech' Clermont-Ferrand côtoient les chercheurs provenant d'autres composantes de l'Université.

PARCOURS DES ECOLES D'INGENIEURS POLYTECH' POUR LES FUTURS BACHELIERS.

En fin de terminale un concours sur dossier est organisé, et les candidats retenus sont inscrits à Polytech' Clermont-Ferrand en parallèle à leur inscription en Licence universitaire. Ils suivent des enseignements supplémentaires, et les étudiants sont « tutorés » tout au long de leur parcours par des enseignants de Polytech' Clermont-Ferrand. Ce suivi personnalisé leur assure un accompagnement adapté tout au long de leur préparation. En fin de deuxième année, l'étudiant a la possibilité de :

- postuler dans l'une des Ecoles Polytechniques Universitaires du Réseau national et d'y être admis directement selon ses vœux et selon les places disponibles dans chacun des départements,
- être candidat dans d'autres écoles d'ingénieurs,
- poursuivre en troisième année de Licence.

LA FORCE DU RÉSEAU

Pour son rayonnement international économique et scientifique, la France a de plus en plus besoin d'ingénieurs de haut niveau. Les écoles polytechniques internes aux universités accompagnent cette évolution en se regroupant dans ce Réseau Polytech. Ceci permet d'augmenter l'efficacité, la visibilité, l'attractivité des formations d'ingénieurs à l'échelle nationale et internationale.

Des nouvelles des "Jeunes Pousses"

Par Pierrette **TOURREIX**



ACTIVITES REALISEES PAR LES JEUNES POUSSES DE SEPTEMBRE 2006 A JUIN 2007

Le 13 septembre : Visite de l'exposition « 1.2.3 ...Soleil » avec observation du ciel sous le planétarium de l'ADASTA installé à la Maison de l'Innovation.

Le 27 septembre : Accueil des Jeunes Pousses à l'ADASTA – différentes manipulations pour préparer la Fête de la Science.

Le 11 octobre : Fête de la Science au Centre Jaude - expériences sur l'eau et montages électriques.

Le 15 octobre : Forum des associations à Polydôme, beaucoup d'expériences amusantes.

Le 15 novembre : Reprise de l'expérience de Blaise Pascal : réalisation de la mesure de la pression atmosphérique rue de Bien Assis, à la Font de l'Arbre, au Col de Ceyssat et au sommet du Puy de Dôme.

Le 6 décembre : Utilisation et observation au microscope.

Le 10 janvier : Séance sur la lumière : synthèse et décomposition disque de Newton.

Utilisation de la mallette couleurs

L'après midi se termine par le tirage des Rois avec une galette offerte aux parents et enfants.

Le 7 février : Observation à la loupe binoculaire de tous les objets apportés par les Jeunes Pousses - cristaux, roches, plantes, pelotes de déjections, mites, artaisons du Saint Nectaire, etc.

Le 7 mars : Les enfants ont rendez-vous à Polytech école de formation d'ingénieurs située aux Cézeaux à Clermont-Ferrand.

Découverte de la fabrication de l'acier par projection d'un film vidéo sur ordinateur, réalisation d'un bas fourneau, utilisation de celui-ci pour forger un fer à cheval, puis toutes les opérations suivantes pour scier, limer et percer les emplacements des clous.

Le 18 avril : Préparation du voyage au Palais de la Découverte à Paris avec fabrication d'un aimant, électro-aimant, utilisation de la boussole.

Le 21 avril : Voyage à Paris :

Palais de la Découverte

Bateau mouche

CNAM (Musée du Conservatoire des Arts et Métiers)

Tour panoramique dans Paris

Le 2 mai : Expo Sciences à Polydôme : expériences amusantes avec l'eau et observations à la loupe binoculaire.

Le 23 mai : visite culturelle et historique au Château de la Batisse à Chanonat, visite animée par les Compagnons de Gabriel sur l'époque du Moyen-Age.

Le 13 juin : L'éruption volcanique.

Le 5 juillet : invitation par l'Etablissement Thermal de Royat au coin des curistes pour une présentation des Jeunes Pousses et de leur activités scientifiques au sein de l'ADASTA.

LES « JEUNES POUSSES » DE L'ADASTA A POLYTECH

Mercredi 7 mars 2007, les « Jeunes Pousses » se sont rendus à Polytech sur le Campus des Cézeaux.

Mademoiselle Hélène de Baynast (maître de conférence à l'Université) et son équipe nous recevaient pour la deuxième fois.

Cette année, c'est une initiation à la fabrication de l'acier et le travail sur la forge qui avait été retenue.

Le bas fourneau en briques réfractaires avec sa soufflerie est installé dans la cour extérieure. Les enfants sont répartis en cinq groupes correspondant au cinq niveaux de fabrication du fer à cheval. Ils commencent par visualiser un documentaire CD sur l'acier, puis approvisionnent le bas fourneau, chauffent leur métal et forgent le fer à cheval ; Après les finitions, ils réalisent le poster explicatif de leur travail effectué.

1-L'acier dans tous ses états (CD commenté par Patricia Teyssonneyre et Michel Naranjo)

Le minerai de fer (oxyde de fer + gangue ou impuretés) est introduit avec du charbon dans le bas fourneau. La combustion du coke par l'oxygène produit du monoxyde de carbone qui transforme l'oxyde de fer en fer. On recueille de la fonte (mélange de fer et de carbone). La fonte est ensuite introduite dans un convertisseur qui transforme, sous l'action de l'oxygène, la fonte (6% de carbone) en acier (2% de carbone)

2-La fabrication de l'acier de Damas (CD commenté par Jean Chandezon)

Une lame de damassé soudé ou acier de Damas se fait de la façon suivante :
- formation d'un « lopin » en alternant de l'acier dur et de l'acier doux.

- Le lopin est chauffé, forgé, plié. L'opération est renouvelée de façon à obtenir un lopin en mille-feuilles acier dur/acier doux.

- Le « mille-feuilles » est torsadé à chaud puis la lame est découpée au coeur de cette torsade.

- Monsieur Chomilier, de Royat, nous a aimablement prêté une lame d'acier de Damas. Les enfants ont pu l'admirer, l'observer et la manipuler.

3-Le bas fourneau

Le minerai de fer (battitures de forge) est chargé dans le bas fourneau avec du charbon de bois. Il se dégage une importante chaleur et du monoxyde de carbone (CO) qui réduit l'oxyde de fer du minerai pour donner un mélange fer-carbone : la loupe de fer. Munis de leur blouse blanche, d'un tablier de cuir, de gants et lunettes haute protection, les enfants rechargent régulièrement en battitures et en charbon de bois le fourneau. Ils entretiennent le feu en soufflant de l'air à l'aide d'une soufflerie manuelle. La température du bas fourneau avoisine les 1100° C. Bien encadrés par l'équipe de l'ADASTA et de Polytech, les « Jeunes Pousses » ont respecté toutes les consignes, sans aucune brûlure par projection ou contact.

4- La forge

Toujours vêtus des différentes protections, les « Jeunes Pousses » forgent « leur » fer à cheval à partir d'une barre métallique.

Cette barre est prise par une pince, chauffée, lorsque le bout devient rouge le métal est alors malléable, facilement déformable lorsque l'on le frappe sur l'enclume avec un gros marteau. La forme de l'enclume est exploitée pour donner l'arrondi du fer à cheval et l'aplatir. La forme définitive s'obtient en frappant de manière continue et ingénieuse.

Une fois la forme finale obtenue, le fer à cheval est sectionné de la barre, les extrémités sont limées, les trous des emplacements des clous sont forés à l'aide d'une perceuse verticale, sous la surveillance des encadrants de Polytech.

5- Le poster

Chaque enfant réalise une bande dessinée sur ce qu'il a retenu des opérations qu'il a effectuées dans les différentes phases.

Les dessins sont actuellement exposés au laboratoire de Royat, les parents peuvent les admirer lors de leur venue avec les enfants.

Vers 17 heures, nous avons procédé à l'ouverture du bas fourneau, à la récupération de la loupe de fer et à l'extinction de toutes les braises par arrosage d'eau intensif.

L'après-midi a été enrichissante, tous les enfants sont repartis avec leur pièce forgée, un morceau de loupe de fer. Ils étaient ravis et ont formulé l'envie de revenir pour d'autres aventures, mais l'année prochaine...

Un grand merci à toute l'équipe de Polytech, au bénévoles de l'ADASTA qui ont su donner de leur temps pour encadrer les Jeunes Pousses dans ces opérations délicates de sidérurgie. Un grand nombre de photos ont été réalisées, mémorisant la joie des tous. Déjà en février et mars 2006, nous avons innové une expédition au CUST, devenu depuis « Polytech ». Les enfants avaient réalisé une enclume en étain selon la technique de la cire perdue. Après démoulage chacun avait récupéré sa mini enclume.

Cf : photos en 3^e page de couverture

Note :

METALLURGIE DU FER

Le fer pur est un métal blanc argent brillant qui se ternit rapidement à l'air. Il est tendre, malléable, ductile, et fortement magnétique. Il a peu d'emplois hormis en médecine pour soigner l'anémie. On emploie industriellement l'acier obtenu par diverses transformation des **minerais de fer** qu'on trouve sous forme

d'oxydes : *hématite* Fe_2O_3 et *magnétite* Fe_3O_4 , ainsi que le *carbonate* $FeCO_3$.

Les minerais de fer sont d'abord grillés pour éliminer l'eau, décomposer les carbonates et oxyder les sulfures. Industriellement, ils sont réduits avec du coke dans un haut fourneau. On ajoute aux minerais contenant du calcaire ou du carbonate de magnésium un fondant acide tel que le sable ou l'argile, pour former une scorie liquide. En revanche, le calcaire est utilisé comme fondant pour les minerais contenant un excès de silice. Le mélange de minerai, fondant et coke est introduit dans la partie supérieure du haut fourneau et on souffle de l'air préchauffé à la base à travers des tuyères. Au fur et à mesure que les matières solides descendent lentement dans le four, elles se transforment complètement en gaz qui s'échappent au sommet et en deux couches liquides, le fer fondu et la scorie que l'on fait couler à la base. Les réactions importantes qui ont lieu dans le haut fourneau sont :

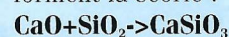
1. la combustion du coke en oxyde de carbone :



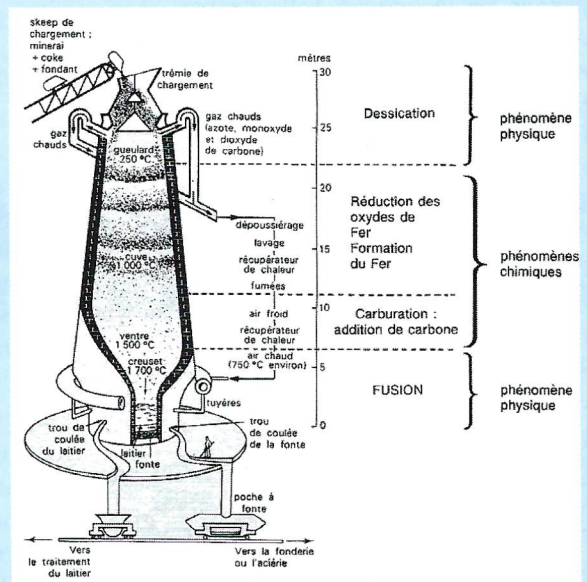
2. la réduction de l'oxyde de fer par l'oxyde de carbone :



3. la combinaison des oxydes acides avec les oxydes basiques qui forment la scorie :



Le fer fondu du haut fourneau, qui s'est trouvé au contact du coke à la partie inférieure du four, contient 6% de carbone dissous ainsi que du silicium, du manganèse, du phosphore et du soufre. Ce fer impur est la fonte et en général on la coule en barres. Cette fonte est ensuite introduite dans un convertisseur qui la transforme sous l'action de l'oxygène en acier contenant moins de 2% de carbone.





LES « JEUNES POUSSES » DE L'ADASTA A PARIS

Samedi 21 avril 2007, 4 heures du matin, 19 enfants et 16 adultes adhérents de l'ADASTA prennent la route de Paris pour un voyage culturel et scientifique.

Arrivée aux abords du Grand Palais sous un ciel d'un bleu très pur faisant ressortir toutes les pierres des monuments avec une superbe luminosité. A pied, nous nous rendons au Palais de la Découverte (haut lieu de la Science), situé à proximité.

A partir de 10 heures, le groupe est installé sur les gradins pour écouter et participer aux célèbres expériences d'électrostatique réalisées à l'aide d'un générateur de 300kV.

Clémence Chevaux est désignée pour rentrer dans la cage de Faraday. Elle se prête avec le sourire à toutes les expériences d'électrisation. Lorsque sa chevelure et son écharpe se transforment « en hérisson », les cris et les rires fusent de toutes parts.

A 11 heures, nous nous rendons vers l'atelier d'électromagnétisme. Les expériences sont tout aussi spectaculaires. Comme il est difficile de tenir une barre en acier verticalement entre les bobines de l'un des plus gros aimants du monde ! Le transformateur à air (de Tesla) crée des étincelles de 1,50 m à 2 mètres au dessus des visiteurs, un plateau en aluminium de 80 cm de diamètre lévite au dessus des bobines parcourues par des courants alternatifs.

Puis, nos « Jeunes Pousses » se défoulent dans l'exposition sur « l'illusionnisme », ils testent les manipulations de mécanique et n'hésitent pas à soulever de très lourdes charges grâce à des systèmes de treuils, palans, poulies.

Nous quittons tous à regret ce Palais de la Découverte pour aller squatter un jardin public à proximité et tirer le pique-nique du sac.

A 13h30, nous embarquons sur un bateau-mouche pour une promenade sur la Seine.

Le soleil, toujours présent nous a permis d'admirer un certain nombre des monuments principaux situés en bordure de Seine, naturellement sans oublier d'admirer les différents et magnifiques ponts chargés d'histoire sous lesquels nous passions.

Puis le car devait nous transporter vers le Musée du CNAM, mais un brutal arrêt place de la Concorde (sic..) par suite de la rupture d'une courroie nous a obligés à modifier le déroulement de la visite. Nous prenons le métro à la station « Concorde » toute proche, c'est dans la joie, l'hilarité générale que nous avons mené, tambour battant nos 19 enfants vers le musée du CNAM. Créé en 1794 par l'Abbé Grégoire, le Conservatoire des Arts et Métiers réunit tous les objets, dessins, maquettes, inventions neuves et utiles pour constituer le musée de l'invention technologique. Il présente plus de 3000 inventions. Nous découvrons le théâtre des automates avec présentation d'un film et de quelques beaux exemplaires. La visite se poursuit dans le domaine de la communication, la mécanique, l'atelier de Madame de Genlis, le laboratoire de Lavoisier, les différents moyens de transports mis au service des voyageurs depuis 1750 à nos jours pour arriver dans la chapelle où nous nous émerveillons au dessous de l'aéroplane de Blériot suspendu à la nef.

A 17h, l'expérience de Foucault nous est présentée avec beaucoup de détails pour nous démontrer que la Terre tourne sur elle-même.

Vers 17h30, la visite se termine, le car est réparé, nous partons pour un tour de ville. Monsieur Massaux nous commente l'histoire des bâtiments et monuments que nous croisons. Un rapide passage devant Notre Dame de Paris, les quais de Seine et ses bouquinistes, la place Jean Paul II avec le point ZERO d'où partent toutes les routes de France. Nous quittons Paris pour arriver à Clermont Ferrand vers minuit.

Si, certes, nous sommes un peu exténués, tout le monde est content, les « Jeunes Pousses » sont à féliciter car ils ont écouté tous les exposés avec grande attention, ils sont restés très disciplinés. L'équipe d'encadrants est prête à repartir vers une nouvelle destination l'année prochaine.



INFORMATIONS DIVERSES

Les parents nous félicitent régulièrement pour notre action envers le

groupe des « Jeunes Pousses » et nous les en remercions. Ci-après quelques extraits :

« Bonjour, merci beaucoup pour cette "super" journée passée à Paris, Louis est ravi !!! »

« Bonjour à toute l'équipe, mon mari, ma fille tiennent à vous remercier pour cette magnifique journée passée à Paris, tant pour la qualité de l'organisation (irréprochable en dépit des aléas...) que pour celle des explications fournies et de l'intérêt des sujets »

« Merci pour ce voyage qui a beaucoup plu à mes filles »

Des jeunes de 1^{ère}S du Lycée Polyvalent de Chamalières se sont joints à la sortie de nos « Jeunes Pousses » consacrée à l'expérience de Pascal au sommet du Puy de Dôme et ont également bénéficié d'une séance faite à leur intention par M PL Hennequin. Ils ont inséré dans leur rapport d'étude :

« Remerciements aux membres de l'ADASTA, qui nous ont permis de faire l'expérience au Puy de Dôme, dont : M. Capelani, (NDLR président à l'époque), MM. Anton, Chandezon, Naranjo et Mme Bally, membres de l'ADASTA présents à la sortie, Mme Tourreix, responsable des « Jeunes Pousses » et organisatrice de la sortie, ainsi qu'à M. Hennequin professeur retraité de mathématiques à l'Université, pour ses précieuses connaissances sur Blaise Pascal ».



Nous vous rappelons ce que nombre d'entre vous savent déjà : depuis le début de 2007 Mme Claudie Bally est Secrétaire adjointe chargée du groupe des « Jeunes Pousses »

Activités et infos

M. Roland Fustier, membre de l'ADASTA nous a transmis un cliché de l'expérience reproduite par M. Gérard Thevand professeur au lycée Virlogeux de Riom et trésorier de l'UdPPC (Union des Professeurs de Physique et Chimie). Nous le remercions. Cette expérience avait été réalisée il y a plusieurs années par M. Roland Jouanisson fondateur de l'ADASTA).

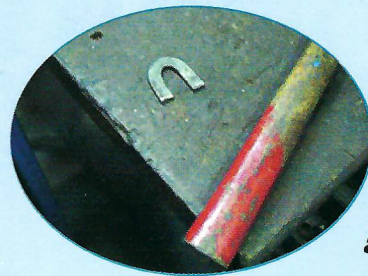
Plaque de cuivre excitée à l'aide d'un archet selon la méthode de Chladni. On montre les lignes nodales où s'accroissent les grains de semoule



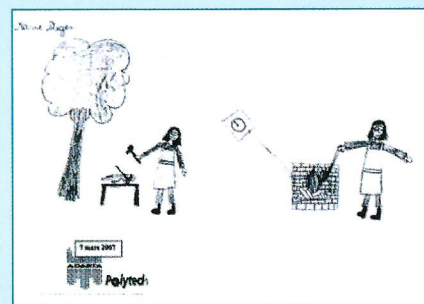
Les "Jeunes Pousses" de l'ADASTA



Les Jeunes Pousses à la Font de l'Arbre avec le Puy de Dôme en arrière plan (15 novembre 2006). Les Jeunes Pousses reproduisaient l'expérience de Pascal.



Les enfants travaillent à la réalisation d'un petit fer à cheval



Les Jeunes Pousses à Polytech le 7 mars 2007 : de la théorie à la pratique

Les Jeunes Pousses à Paris le 21 avril 2007



Palais de la Découverte
Attention soutenue :
on assiste aux expériences d'électrostatique



Depuis le bateau mouche
Regard sur Paris et ses monuments



Musée du CNAM : l'expérience de Foucault

Adhésions et Abonnements

Adhésions à titre individuel.....30€

Adhésions à titre collectif.....80€

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

Permanences - elles sont assurées par les bénévoles :

du Lundi au Jeudi de 8h à 12h et de 14h à 17h et le Vendredi de 8h à 12h (*juillet et août inclus*)

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

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

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

Tél. 04 73 92 12 24 - Fax 04 73 92 11 04 - E-mail : adasta@wanadoo.fr - Site internet : <http://perso.wanadoo.fr/adasta>

Dépôt légal Juin 2007 - N° ISSN - 1166-5904