

AUVERGNE

Sciences

N° 65 - mars 2007



LES LOGICIELS LIBRES

**INTRODUCTION À L'IMAGERIE
PAR RÉSONANCE MAGNÉTIQUE**

NANOSCIENCES ET NANOTECHNOLOGIES

BULLETIN DE L'ADASTA

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

éditorial



Michel NARANJO

L'ADASTA a changé de président et Jean-Claude Capelani, Président d'Honneur, fera profiter à Michel Naranjo de sa longue expérience pour poursuivre l'orientation de notre association qui fut définie il y a 21 ans : « diffuser et promouvoir la culture scientifique et technique dans la Région Auvergne, notamment auprès des jeunes » Elle propose de réaliser elle-même un certain nombre d'opérations locales répondant à ce but et de créer les conditions d'une coopération active avec l'ensemble des autres acteurs régionaux et nationaux susceptibles d'intervenir dans le domaine de la culture scientifique technique et industrielle.



Jean-Claude CAPELANI

Bien que les nouvelles technologies aient révolutionné le monde des médias, l'activité éditoriale reste encore incontournable, permettant aux lecteurs de revues le temps de la réflexion. Ainsi « Auvergne Sciences » rappelle à ses lecteurs que les sciences et techniques leur sont géographiquement proches par la découverte de la réalité des entreprises et laboratoires, et l'information sur l'activité scientifique et industrielle.

Ce numéro 65 reprend les idées qui ont fait le succès de notre revue : tout d'abord en renouant avec la tradition d'un supplément pédagogique où Paul-Louis Hennequin nous apprend « **comment fonctionne le sautoir de la Pascaline** » ; les plans permettront de reproduire cette ingénieuse machine pour une utilisation en classe et dans les journées de formation. Mais notre préoccupation est carrément tournée vers le XXI^{ème} siècle : aujourd'hui les nanotechnologies peuvent susciter des méfiances, voire des rejets : Frédéric Chandezon nous présente certains aspects montrant le caractère pluridisciplinaire de cette nouvelle science impliquant physiciens chimistes, biologistes et ingénieurs. « **La vulgarisation scientifique, utile mais difficile** » écrit Roland Fustier ; mais les propositions contenues dans son article devraient permettre de mener à bien cette mission de diffusion de la science et la technologie que s'est imposée l'équipe d'animateurs de l'ADASTA.

Michel NARANJO,
Président de l'ADASTA

Jean Claude-CAPELANI,
Président d'Honneur

Merci à nos sponsors



Comité de rédaction de la Revue Auvergne-Sciences

Président : Paul Avan

Rédacteur en chef : Philippe Choisel

Membres : Jocelyne Allée, Nathalie Andréoletti, Georges Anton, Vincent Barra, Jean-Claude Capelani, Jean Chandezon, Luc Dettwiller, Paul-Louis Hennequin, Michel Naranjo, Annie Ville.

Sommaire

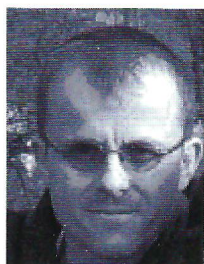
Introduction à l'imagerie par résonance magnétique	3
Les logiciels libres	10
De la toise au mètre	14
Nanosciences et nanotechnologies	18
La vulgarisation scientifique	30
Informations	33
L'unité mixte de recherche INSERM 484	34
Jeunes Pousses	36

Photo de couverture : voir figure 12 article nanosciences (page 28)

Remerciement également aux auteurs des autres photos.

Impression : Imprimerie Porcu - Courmon d'Auvergne

© Toute reproduction partielle ou totale interdite. Les articles publiés sont de la responsabilité exclusive de leurs auteurs



Introduction à l'imagerie par résonance magnétique

Par Vincent **BARRA**

Professeur des Universités, ISIMA, Université Blaise-Pascal. Membre de l'ADASTA.

L'imagerie par Résonance Magnétique (IRM), est aujourd'hui un outil d'investigation médicale puissant et utilisé en routine clinique dans de nombreux domaines. Son principe repose sur le phénomène de Résonance Magnétique Nucléaire (RMN), décrit pour la première fois par Bloch [1] et Purcell [4] en 1946 (figure 1-a et b), et pour lequel ils recevront un prix Nobel de Physique en 1952. L'objectif de cet article est de décrire ce phénomène et de montrer son application en imagerie médicale.

1. UN PETIT HISTORIQUE

La préhistoire de la RMN remonte à 1922, date à laquelle Stern et Gerlach mettent en évidence une curieuse propriété atomique d'origine magnétique. Depuis une vingtaine d'années déjà, l'atome qui commence à être exploré se comporte tout à fait étrangement vis-à-vis des lois de la physique alors connues. Le monde de l'infiniment petit jette le désarroi dans le monde macroscopique des physiciens, et un outil mathématique et physique révolutionnaire, la mécanique quantique, va permettre d'explorer ces nouveaux comportements. La propriété magnétique découverte par Stern et Gerlach est due justement à un des êtres

mathématiques de la mécanique quantique, le spin, à l'origine de toute la résonance magnétique.

Entre 1946 et 1952, la RMN ne sort pas des laboratoires de physique. Elle est testée, validée et de plus en plus utilisée comme outil de mesure par exemple (mesures de champs magnétiques). Dans le milieu des années 1950, cette technique, dont les perspectives spectroscopiques s'ébauchent, sort des laboratoires et est appliquée dans les domaines de la chimie, puis de la biochimie comme un puissant outil de découverte de structures et de dynamique d'édifices moléculaires jusque là mal compris. Entre 1960 et 1970, la technologie fait un bond. La RMN reste un outil de spectroscopie, mais les champs utilisés sont de plus en plus intenses grâce à l'apparition des aimants supraconducteurs. La résolution y gagne beaucoup, et les spectres s'affinent. Et c'est l'arrivée sur le marché des circuits traitant automatiquement la transformation de Fourier et permettant alors des études de plus en plus précises et rapides sur des échantillons de plus en plus petits, qui amène la RMN à étudier les protéines et les biomolécules.

C'est dans ce contexte que les premiers échantillons de tissus biologiques sont étudiés. En 1971,

Damadian (figure 1-c) publie un article retentissant [2] : le temps de relaxation spin-réseau des tissus cancéreux paraît allongé par rapport aux tissus normaux. L'« index de malignité » de Damadian sera par la suite très contesté car l'interprétation des faits reste plus délicate et encore mal comprise. Mais qu'importe, la RMN est entrée en médecine. Elle n'en sortira plus.

A New-York, Lauterbur (figure 1-d) réalise à la même époque le premier imageur RMN [3] : la première image n'est certes pas très ambitieuse (coupe de deux tubes capillaires remplis d'eau, figure 2-a), mais le succès est retentissant, et confirmé par la première image d'un tissu vivant, un poivron. Les images font le tour du monde, et une nouvelle technique d'imagerie vient de voir le jour. Lauterbur se voit attribuer le prix Nobel de Physique en 2003 pour ces travaux. L'évolution est alors très rapide : Mansfield réalise la première image d'un sujet humain vivant en 1976 (coupe de doigt, figure 2-b). Les industriels américains prennent alors le relais des laboratoires, et les prototypes sortent rapidement des usines. En 1977, Damadian montre des images obtenues sur des volontaires. Le 28 mai 1979, Hawkes réalise la première image d'une tête.



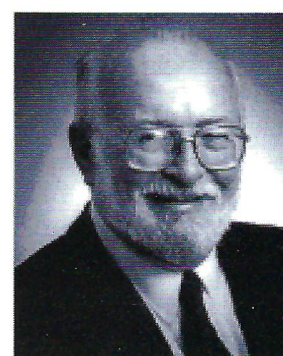
a-Félix BLOCH (1905-1983)



b-Edward PURCELL (1912-1997)



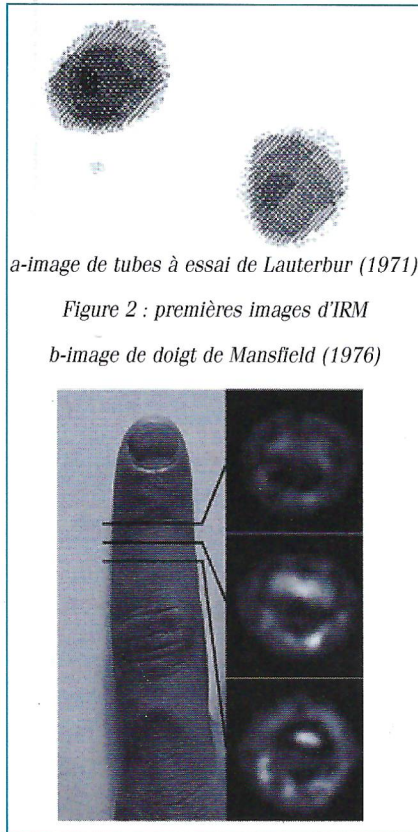
c-Robert DAMADIAN (1936-)



d-Paul LAUTERBUR (1929-)

Figure 1 : Quelques figures célèbres autour de la RMN

En 1980, ce sont les premières images publiées pour la tête et l'abdomen. Les techniques s'affinent, et à la fin de l'année 1982, environ 2000 patients ont eu une imagerie par résonance magnétique nucléaire. Aujourd'hui, l'IRM est une technique pratiquée quotidiennement dans tous les centres hospitaliers du monde.



Un des succès de la résonance magnétique tient à l'impressionnante concordance entre les résultats théoriques et expérimentaux et au fait que certains des aspects peuvent être expliqués et décrits par la physique classique. C'est d'ailleurs l'approche de la présentation proposée ici.

La RMN s'intéresse principalement :

- au noyau des atomes : alors que les techniques radiologiques conventionnelles utilisent les électrons périphériques du noyau, la RMN s'intéresse au noyau, coeur de l'atome, composé de nucléons (protons et neutrons) pour l'essentiel. Ces particules élémentaires sont caractérisées par leur masse, leur charge, leur stabilité et leur spin.

- aux propriétés magnétiques : du fait du spin, la plupart des noyaux atomiques peuvent être considérés comme de petites aiguilles aimantées susceptibles de s'orienter quand on les place dans un champ magnétique.
- aux échanges énergétiques résonnants : il est possible de forcer les

orientations des noyaux dans le champ magnétique, par échange d'énergie entre noyaux et une source d'énergie. L'effet est très faible, sauf pour une valeur bien précise de la quantité d'énergie échangée. C'est l'effet de résonance.

Dans la suite, nous décrivons chacun de ces aspects, pour préciser ce qu'est exactement la résonance magnétique nucléaire. Nous présentons ensuite son utilisation en imagerie par résonance magnétique nucléaire, ou IRM.

2. LE PHENOMENE DE RMN

2.1. Les propriétés magnétiques des noyaux

Les atomes de la matière sont constitués d'un noyau et d'un nuage électronique. En IRM, c'est un magnétisme d'origine nucléaire (noyaux des atomes) que l'on mesure. Les noyaux atomiques sont constitués de deux types de particules : les protons (de charges électriques positives) et les neutrons (de charges électriques nulles).

Les protons et les neutrons effectuent en permanence un mouvement de rotation sur eux-mêmes, appelé **spin**. Les charges électriques positives des protons sont donc en perpétuel mouvement. Or, une charge électrique en mouvement crée une force magnétique. Ainsi, chaque proton possède son propre champ magnétique (très faible) nommé **moment magnétique individuel** (μ). La valeur du μ de chaque proton est proportionnelle à la valeur de son spin.

Seuls les noyaux atomiques possédant un nombre impair de protons présentent un magnétisme détectable (par exemple H_1 , C_{13} ou P_{31}). Les atomes d'hydrogène (H_1) sont très abondants dans les tissus gras et liquidiens (l'eau entre pour 70% dans la composition de l'organisme humain). C'est donc en grande partie des protons d'hydrogène que provient le signal en IRM. Les atomes de Carbone 13 et de Phosphore 31, quant à eux, sont utiles en Spectroscopie par Résonance Magnétique.

2.2. Action d'un champ magnétique sur les μ des protons

A l'état naturel, l'orientation des moments magnétiques individuels est

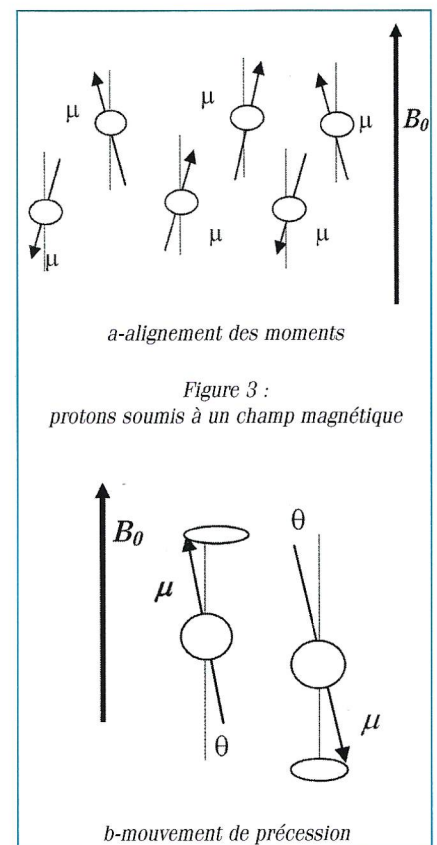
aléatoire et la résultante des moments magnétiques est nulle. Lors de l'introduction des protons d'hydrogène dans un champ magnétique principal B_0 , deux phénomènes se produisent :

- Alignement des μ dans la direction de B_0 (Figure 3-a) : certains moments s'alignent dans le même sens que B_0 (sens parallèle). D'autres s'alignent dans le sens opposé (sens antiparallèle). Les μ alignés dans le sens parallèle sont dits de « basse énergie ». Les μ alignés dans le sens antiparallèle sont dits de « haute énergie » (s'aligner dans le même sens que B_0 nécessite moins d'énergie que s'aligner dans le sens opposé).

- Mouvement de précession (figure 3-b) : en réalité, les μ ne s'alignent pas exactement suivant l'axe de B_0 . Ils s'en écartent d'un angle très petit θ (**l'angle de précession**) et tournent autour de l'axe de B_0 avec une certaine fréquence. C'est ce que l'on appelle le **mouvement de précession**. La fréquence de rotation des μ autour de l'axe de B_0 est appelée **fréquence de précession** ou **fréquence de Larmor** :

$$f_p = \frac{\gamma B_0}{2\pi}$$

où γ est le rapport gyromagnétique du proton étudié.



Ainsi, sous l'influence de B_0 , les protons produisent un moment magnétique macroscopique (ou aimantation) d'équilibre M orienté dans la direction de B_0 . Le vecteur d'aimantation M peut être décomposé en deux vecteurs d'aimantations :

- M_L (aimantation longitudinale) correspondant à la projection de M sur l'axe Z , parallèle à B_0 .
 - M_T (aimantation transversale) correspondant à la projection de M sur le plan XY , perpendiculaire à B_0 .
- A l'état d'équilibre dans le champ magnétique principal B_0 , les mouvements de précession des spins ne sont pas en phase : les composantes transversales microscopiques s'annulent et il n'y a donc pas d'aimantation transversale résultante lorsque l'on considère un groupe de spins. Ainsi, M_L est maximale, et M_T est nulle. Un problème se pose alors : M est très inférieur à B_0 , même si on additionne les magnétismes de tous les protons de l'organisme. M est donc masqué par B_0 et ne peut pas être mesurable s'il reste dans le même axe. Il faut donc trouver un moyen de basculer les aimantations des protons dans un axe différent de celui de B_0 .

2.3. La résonance

A l'état d'équilibre, dans le champ magnétique B_0 , les aimantations des protons (parallèles à l'axe de B_0) sont donc trop faibles par rapport à l'intensité du champ principal pour être quantifiables. Il faut donc placer le système hors de cette position d'équilibre. Pour cela, un apport d'énergie est nécessaire, qui s'effectue grâce à un rayonnement électromagnétique, et plus précisément une onde de radiofréquence (RF). Il y a alors transfert d'énergie de l'onde RF vers les protons et **bascule** des moments magnétiques dans un axe différent de celui de B_0 . C'est le phénomène de **résonance**. Ce transfert d'énergie n'est possible que sous la condition que la fréquence de l'onde RF appliquée soit égale à la fréquence de précession des protons. En pratique, donc, l'onde RF est créée par un champ magnétique B_1 non colinéaire à B_0 , et tournant à la fréquence f_p .

Une onde RF peut être représentée sous la forme d'une fonction sinusoïdale, caractérisée par sa fréquence, son amplitude et sa durée d'application. L'angle de bascule des

aimantations des protons est directement proportionnel à l'amplitude et à la durée d'application de l'onde radiofréquence. Par exemple une onde dite de 90° basculera l'aimantation des protons orthogonalement à B_0 , tandis qu'une onde dite de 180° basculera l'aimantation des protons parallèles (resp. antiparallèles) en antiparallèles (resp. parallèles).

2.4. Relaxation

A l'arrêt de l'onde B_1 , un signal dit de **précession libre** est enregistré. Il accompagne le retour à la position d'équilibre (en spirale) du vecteur M (figure 4). En particulier (cf. 2.5), le retour à l'équilibre des aimantations, longitudinale et transversale est mesuré par une antenne (phénomène d'induction). Seule M_T participe au signal recueilli dans l'antenne.

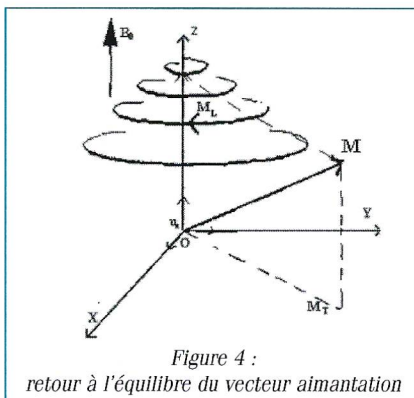


Figure 4 : retour à l'équilibre du vecteur aimantation

La cinétique de l'évolution de la composante longitudinale M_L lors du retour à l'équilibre constitue la **relaxation longitudinale**. Elle est encore appelée relaxation spin-réseau car elle est entre autres due à des interactions des protons avec le milieu environnant. La relaxation longitudinale est un gain d'aimantation. Le retour à l'équilibre suit une cinétique exponentielle, qui dérive des équations de Bloch :

$$M_L(t) = M_0 - (M_0 - M_L(0))e^{-t/T_1}$$

T_1 , appelé **temps de relaxation longitudinale**, est le temps au bout duquel 2/3 de l'aimantation longitudinale d'équilibre a été récupérée. Il dépend essentiellement de l'intensité du champ magnétique et de la microviscosité du milieu. Trois grands types de milieux organiques possèdent ainsi des courbes de relaxations longitudinales bien distinctes :

- les tissus (muscles, substance grise, substance blanche,...) ($T_1 = 500$ ms)
- les liquides ($T_1 > 2000$ ms)
- la graisse ($T_1 = 220$ ms)

La cinétique de l'évolution de la composante transversale M_T lors du retour à l'équilibre constitue la **relaxation transversale**. Elle est encore appelée relaxation spin-spin car elle est entre autres due à des interactions des protons entre eux. La relaxation transversale est une perte d'aimantation. Le retour à l'équilibre suit également une cinétique exponentielle, qui dérive des équations de Bloch :

$$M_T(t) = M_T(0)e^{-t/T_2}$$

T_2 , appelé temps de relaxation transversale, est le temps au bout duquel 2/3 de l'aimantation longitudinale d'équilibre a été perdue. Il est d'autant plus grand que le milieu est fluide. Deux grands groupes de milieux organiques possèdent des courbes de relaxations transversales bien distinctes : la graisse et les tissus (substance blanche, substance grise, muscles) ($T_2 \approx 100$ ms), et les liquides ($T_2 > 2000$ ms)

2.5. Le signal de RMN

Après l'application de l'onde radiofréquence, le vecteur d'aimantation M se trouve sur un axe différent de celui de B_0 , et sa composante M_T (non nulle) est ainsi quantifiable. Lors de la relaxation, M_T continue à tourner autour de B_0 . Ainsi, si on place une antenne (bobine métallique de détection) devant M_T , cette dernière peut détecter la variation d'un champ magnétique au cours de la relaxation. Un signal apparaît dans l'antenne sous la forme d'une variation de champ magnétique à chaque fois que le vecteur d'aimantation passe devant l'antenne. Or la variation d'un champ magnétique dans un bobinage métallique provoque l'apparition d'un courant électrique induit dans ce bobinage. Ce courant électrique est mesurable après amplification: c'est le signal RMN (figure 5).

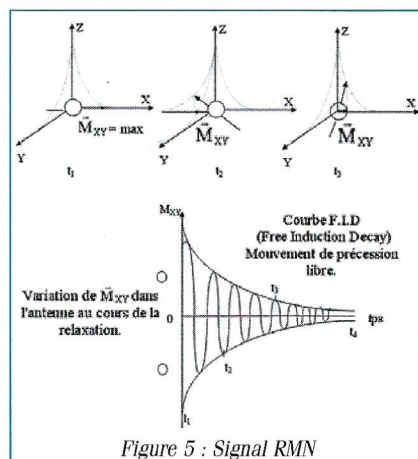


Figure 5 : Signal RMN

L'aimantation transversale est la seule à induire ce signal. Son signe est positif ou négatif selon l'orientation de l'extrémité du vecteur d'aimantation transversal par rapport à l'antenne. De plus, l'oscillation est amortie car M_T décroît au cours du temps, mais aussi parce que les moments magnétiques se déphasent. Ce déphasage est dû au fait que les moments magnétiques individuels des protons ne tournent pas tous exactement avec la même fréquence. On détermine ainsi une bande passante très étroite autour de f_p comprenant les faibles variations des fréquences de précession des moments magnétiques.

Si l'obtention d'un signal RMN grâce à une onde RF est relativement aisée à comprendre, deux problèmes se posent quant à la réalisation pratique :

- l'arrêt de l'impulsion RF, appelée impulsion d'excitation, n'est pas instantané.
- cette impulsion d'excitation est beaucoup plus intense que le signal détecté.

Pour ces deux raisons, on ne peut pas enregistrer le signal RMN tout de suite. Il faut, par l'intermédiaire de séquences d'impulsions (Spin Echo, Echo de gradient, Inversion/récupération..), créer un écho du signal. C'est cet écho que l'on cherchera alors à mesurer. A titre d'exemple, nous illustrons le principe de la séquence d'impulsion par la séquence écho de spin.

2.6. La séquence d'impulsions par écho de spin

Figure 6 - TR est le Temps de Répétition (temps entre deux impulsions à 90°). TE est le Temps d'écho (temps entre l'impulsion à 90° et l'écho du signal).

Les impulsions appliquées sont les suivantes :

- l'onde RF 90°, encore appelée impulsion d'excitation, bascule les aimantations des protons dans le plan transversal. A l'arrêt de cette onde, l'aimantation transversale (aimantation mesurée par l'antenne) est maximale. Mais les protons vont très vite se déphaser en raison des interactions qui s'opèrent entre eux. La résultante des aimantations (et par là-même le signal) va alors décroître très rapidement. On obtient ainsi une courbe F.I.D.
- l'onde RF 180° au temps TE/2, appelée impulsion de rephasage, permet aux protons de se rephaser et

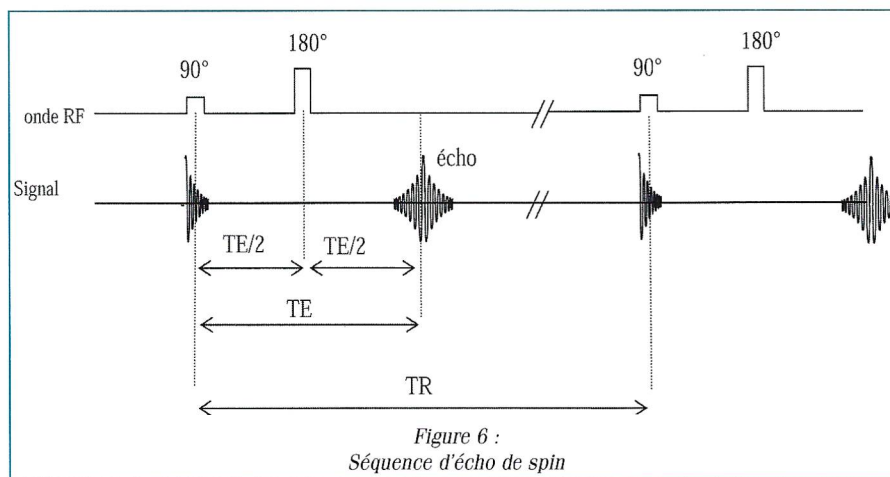


Figure 6 :
Séquence d'écho de spin

de regagner ainsi leur aimantation transversale. Au bout d'un nouveau temps TE/2 après l'impulsion de rephasage, un nouveau signal apparaît: c'est l'écho. Ce signal est quantifiable et c'est de lui que sont tirées les informations nécessaires au recueil du signal RMN.

Des valeurs de TR et TE dépendent les contrastes observés dans une image. Ces paramètres permettent donc d'obtenir, dans le cas de l'imagerie par résonance magnétique, des images **en pondération** :

- TR court (400 à 600 ms) et TE court (20 à 30ms) : pondération T_1
- TR long (> 1500 ms) et TE court : pondération ρ (densité de protons)
- TR long et TE long (80 à 110 ms) : pondération T_2

3. LA LOCALISATION SPATIALE DU SIGNAL

Plongés dans un champ magnétique, les protons d'un échantillon homogène résonnent donc tous à la même fréquence f_p . Le principe de la forma-

tion d'une image IRM est d'induire une dépendance entre la position d'un proton et ses caractéristiques (fréquence de résonance et phase), en utilisant des gradients de champ magnétique. La localisation spatiale du signal s'effectue donc grâce à trois gradients de champ magnétique, appliqués consécutivement dans le champ principal B_0 :

- un gradient de sélection de coupe
- un gradient de codage par la phase
- un gradient de codage par la fréquence

Pratiquement, les gradients sont des bobinages métalliques dans lesquels passe un courant électrique, produisant ainsi un champ magnétique induit. Ce champ magnétique vient s'ajouter à B_0 et le modifie de façon linéaire dans l'espace.

3.1. Sélection du plan de coupe

La sélection de la coupe d'acquisition s'effectue en appliquant pendant l'impulsion d'excitation un gradient de sélection de coupe G_S (figure 7). Il y a alors sélection d'une coupe perpendiculaire à la direction de ce gradient.

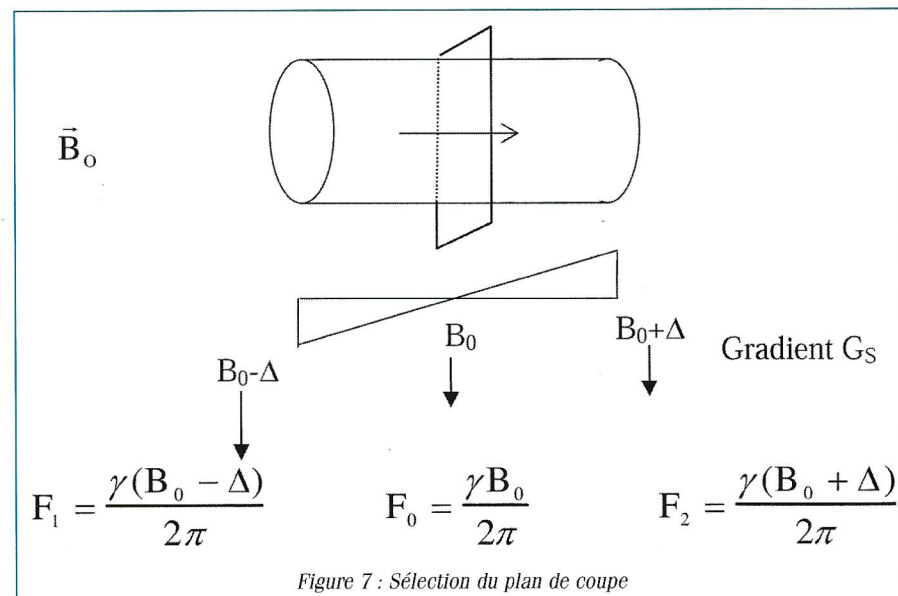


Figure 7 : Sélection du plan de coupe

Ainsi, au moment de l'application d'une impulsion d'excitation de fréquence $F_0 = \gamma B_0 / 2\pi$, seules les aimantations des protons tournant avec une fréquence de $F_0 = F_p$ vont pouvoir entrer en résonance, basculer et renvoyer un signal. Le plan de coupe situé à l'endroit où la fréquence de précession des protons est égale à la fréquence de l'onde RF appliquée est donc sélectionné.

Pour des raisons techniques, l'onde RF appliquée ne peut jamais être ponctuelle. On détermine ainsi une bande passante la plus faible possible autour de la fréquence théorique de l'onde. En raison de la non ponctualité de l'onde RF, la coupe sélectionnée possède une certaine épaisseur que l'on peut faire varier en modifiant la pente du gradient G_s . Un imageur IRM possède donc, entre autres, comme caractéristiques essentielles la pente maximum de son gradient et le temps de montée à cette valeur. En pratique, on ne choisit pas directement la pente du gradient en fonction de l'épaisseur de coupe désirée, mais on choisit directement l'épaisseur et la pente du gradient en est déduite.

3.2. Codage par la fréquence

Maintenant qu'un plan de coupe est sélectionné, il reste à déterminer la localisation précise de chaque signal dans ce plan afin de pouvoir former une image. Pour cela, on applique pendant la lecture du signal un gradient de lecture, ou gradient de codage par la fréquence (G_r) qui permet d'introduire des informations en fréquence dépendantes de la localisation spatiale dans la coupe.

Afin que les μ soient tous en phase (mais avec des fréquences de précession distinctes) lors de la réception de l'écho, un premier gradient positif est appliqué juste après l'impulsion d'excitation (figure 8).

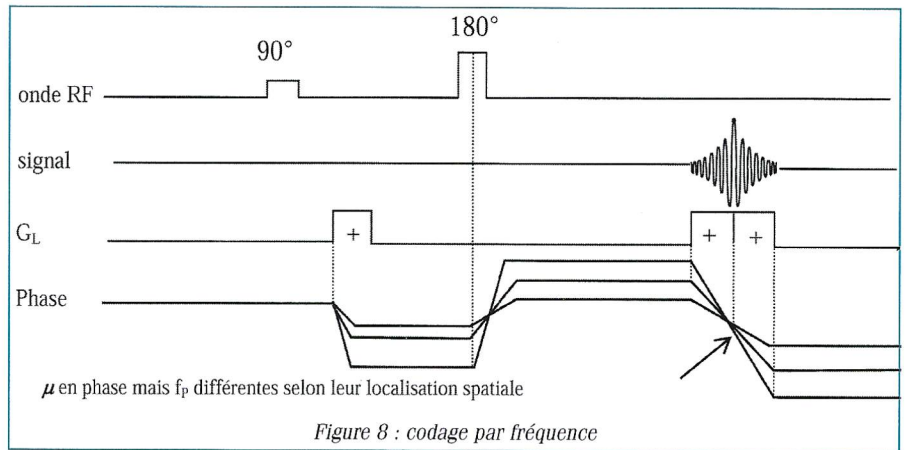
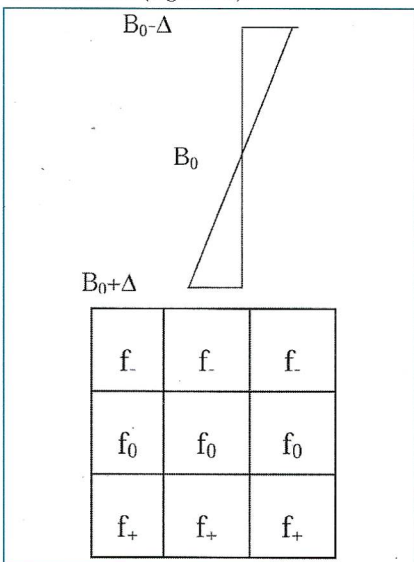
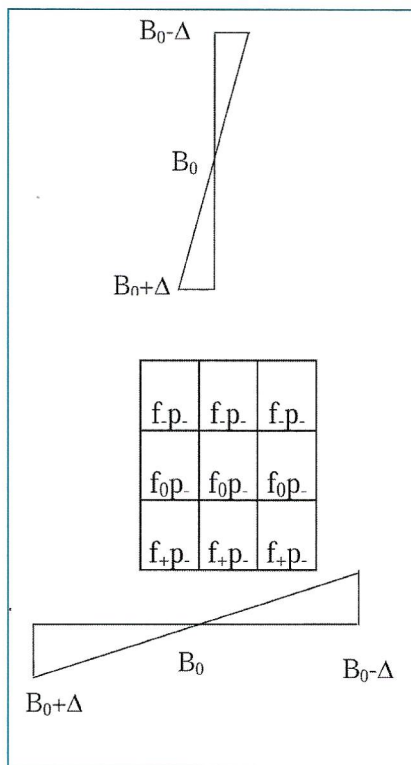


Figure 8 : codage par fréquence

3.3. Codage par la phase

Le plan de coupe est codé dans un sens par des différences de fréquences. Il reste à coder l'autre axe grâce à un gradient de codage appelé gradient de codage par la phase (G_p) et appliqué immédiatement après l'impulsion d'excitation.



Les μ présentent des f_p différentes et un très léger déphasage en fonction de leur localisation spatiale.

Le gradient de codage par la phase (G_p) doit être répété autant de fois qu'il y a de lignes dans la matrice d'acquisition. A chaque codage par la phase, G_p est légèrement incrémenté. Dans le cas des matrices asymétriques, le codage par la phase est appliqué du côté de la matrice la plus faible (gain de temps d'acquisition).

3.4. La transformation de Fourier

La transformation de Fourier est une opération mathématique permettant de placer dans une matrice les informations obtenues par l'application des gradients G_L et G_p . Elle permet donc de transformer un signal dépendant du temps en un signal dépendant de la fréquence ou du spectre.

Le signal enregistré lors d'une séquence d'IRM est stocké dans l'espace K, qui correspond en fait à un plan de Fourier. L'emplacement des données enregistrées dans l'espace K dépend directement de l'intensité et de la durée d'application des gradients de codage de phase et de fréquence : un gradient de faible intensité ou appliqué

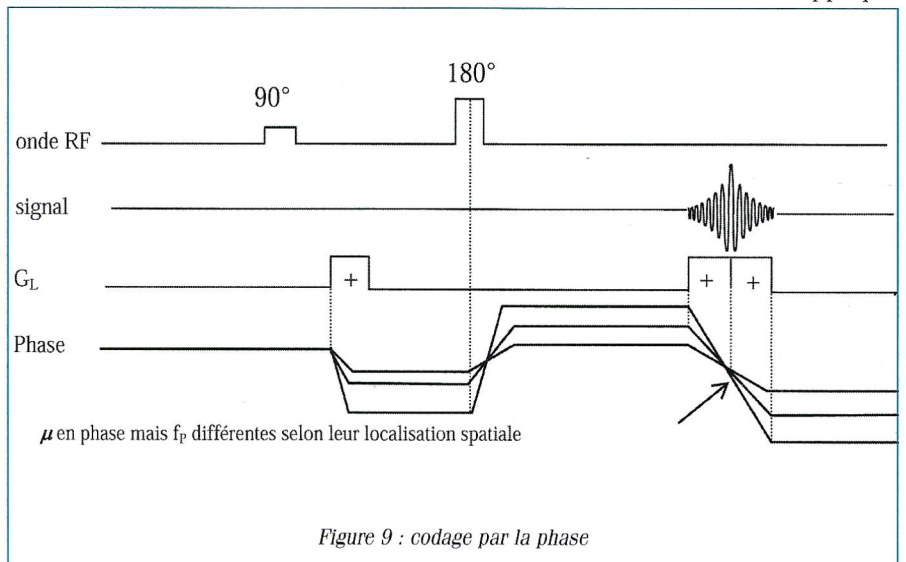


Figure 9 : codage par la phase

pendant un temps court code pour les basses fréquences spatiales, tandis qu'un gradient de forte intensité ou appliqué pendant longtemps code pour les hautes fréquences spatiales. Les basses fréquences spatiales sont situées à proximité du centre de l'espace K, tandis que les hautes fréquences spatiales correspondent à la périphérie de l'espace K. Le signal périodique amorti y apparaît alors sous la forme de différents pics de fréquences dont la largeur, la position et la forme sont fonction des paramètres des signaux. Il suffit donc d'appliquer une transformée de Fourier 2D inverse sur l'espace K pour obtenir une image de la coupe du corps imagé. Par la suite, une chaîne d'amplification du signal transforme les hautes fréquences (MHz) en moyennes fréquences (kHz). Un convertisseur transforme le signal analogique en signal numérique. Les données sont ensuite stockées et peuvent être traitées.

3.5. Imagerie 3D

Dans l'imagerie 3D, G_s est remplacé par un second gradient de codage par la phase appelé G_z . G_z est appliqué dans le même sens que G_s autant de fois que l'on veut de coupes dans le volume. Par exemple, pour 60 coupes de matrices 256 x 192 (voir figure 10).

4. QUELQUES IMAGES

Terminons cette courte présentation de l'imagerie par résonance magnétique par quelques images permettant d'apprécier de manière non exhaustive la variété des acquisitions qui peuvent être produites par cette technique autorisant ainsi une exploration du corps humain selon de nombreux points de vue.

4.1. Imagerie en pondération

En modifiant les valeurs des différents paramètres de séquence, une grande diversité de volumes variant par le contraste peuvent être acquis. Le choix d'un ensemble de paramètres est alors fonction de l'étude clinique sous-jacente. Nous illustrons ce principe sur l'imagerie du cerveau. Le cerveau humain est un organe de forme schématiquement ovoïde à grand axe antéro-postérieur, dont le volume moyen est de 1100 cm³ chez la femme et de 1400 cm³ chez l'homme, et dont le poids varie de 1400 à 1800 grammes. Il est placé dans la boîte crânienne mais n'est pas directement au contact de la cavité osseuse. Il est situé dans une enceinte liquidienne dont la particularité est d'être à la fois à l'extérieur et à l'intérieur du cerveau (le système ventriculaire). Le cerveau est composé de trois « matières principa-

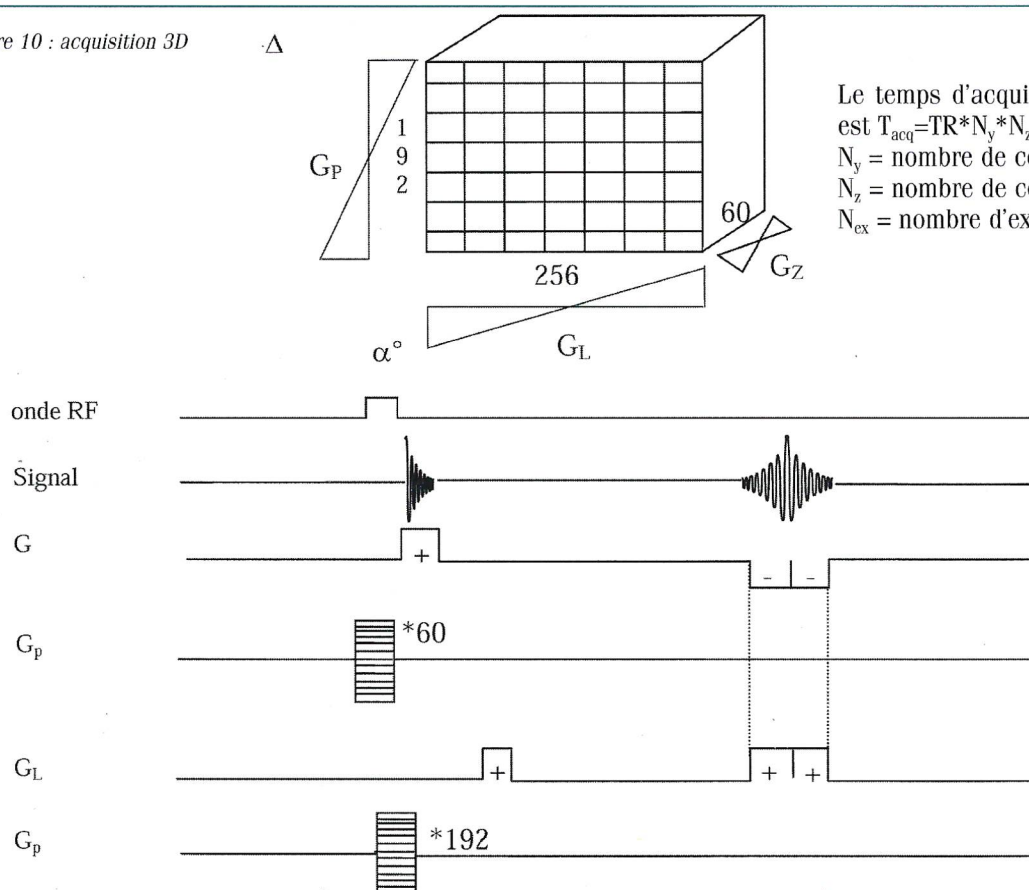
les », la substance blanche (gaines de myéline regroupées en faisceaux), la substance grise (constituée d'une population de cellules neuronales) et le liquide cérébro-spinal.

Pour un TR long (de l'ordre de 2s) et un TE court (de l'ordre de 20ms), la différence de densité protonique entre la substance grise et la substance blanche s'exprime. On obtient une séquence pondérée en densité de protons (ou ρ) qui reflète la localisation et la concentration des noyaux d'hydrogène des différentes structures. Les tissus sont ordonnés par niveaux de gris croissants en substance blanche, substance grise et liquide cérébro-spinal (figure 11-a)

Pour des TR longs (de l'ordre de 2s) et des TE longs (environ 90ms), la décroissance du signal domine la différence de densité protonique entre tissus, et le signal est suffisant pour réaliser une image dite pondérée T_2 , où les tissus sont ordonnés par niveaux de gris croissants en substance blanche, substance grise et liquide cérébro-spinal (figure 11-b).

Pour des TR courts (de l'ordre de 600ms), le contraste entre les tissus dépend essentiellement de leur vitesse d'aimantation, donc de T_1 . Pour des TE courts (environ 20ms), les différences de décroissance du signal entre les tissus n'ont pas le temps de s'exprimer, rendant le contraste indépendant de T_2 . Ainsi, on

Figure 10 : acquisition 3D



Le temps d'acquisition d'un tel volume est $T_{acq} = TR * N_y * N_z * N_{ex}$ où :

- N_y = nombre de codages par la phase
- N_z = nombre de coupes
- N_{ex} = nombre d'excitations

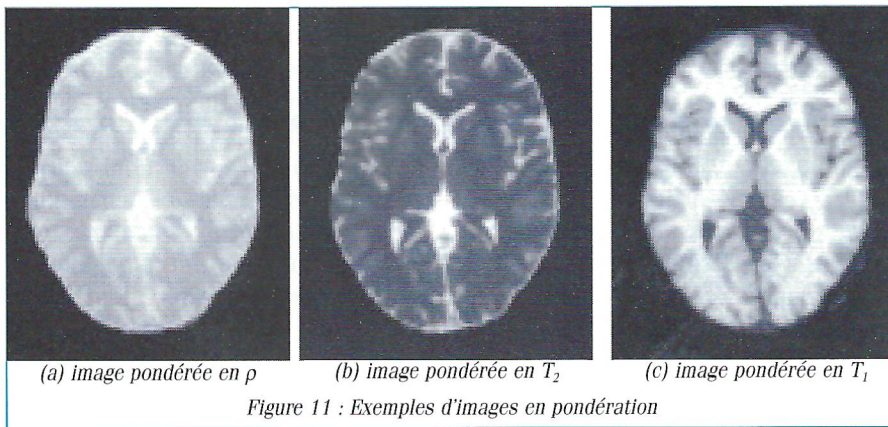


Figure 11 : Exemples d'images en pondération

obtient une image pondérée en T_1 , où les tissus sont ordonnés par niveaux de gris croissants en liquide cérébrospinal, substance grise et substance blanche (figure 11-c).

4.2. Imagerie par tenseur de diffusion

L'imagerie par tenseur de diffusion (DTI) est une technique IRM permettant de visualiser la position, l'orientation et l'anisotropie des faisceaux de matière blanche du cerveau. En effet, l'organisation et la composition (myéline) des axones en faisceaux parallèles et organisés facilitent la diffusion des molécules d'eau le long de leur axe. Les mouvements microscopiques dus à cette diffusion peuvent être capturés par une technique d'acquisition d'IRM

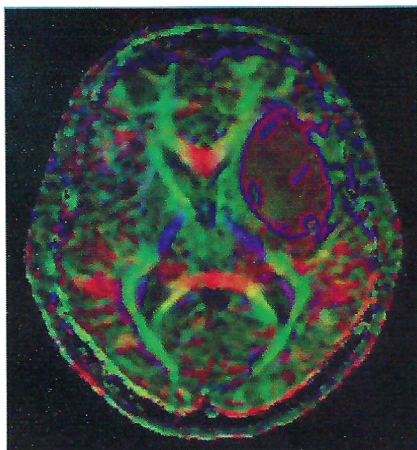


Fig. 12(a) : coupe d'une acquisition DTI

Figure 12 : exemples d'images DTI

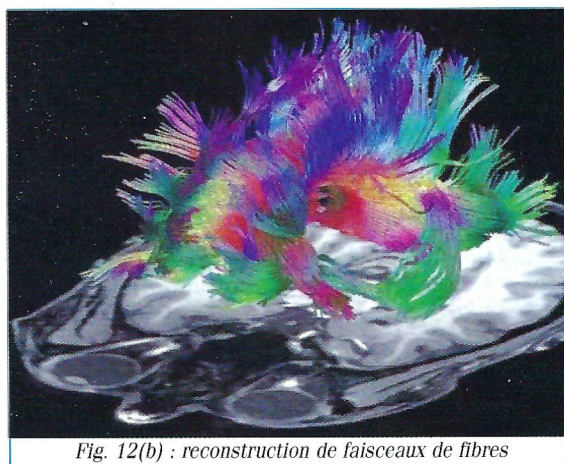


Fig. 12(b) : reconstruction de faisceaux de fibres

simple, et des algorithmes de traitement d'images permettent ensuite de reconstruire les faisceaux de fibre de matière blanche. Ce type d'acquisition possède de nombreuses applications cliniques, qui vont de l'évaluation de la maturation de la matière blanche chez les enfants à la recherche de faisceaux touchés par des plaques de sclérose (figure 12).

4.3. Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle

L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) est une application de l'IRM à l'étude du fonctionnement du cerveau. La localisation des zones cérébrales activées est basée sur l'effet BOLD (Blood Oxygen Level Dependence), lié à l'aimantation de l'hémoglobine contenue dans les globules rouges du sang. L'hémoglobine se trouve en effet dans le sang sous une forme oxygénée (contenant de l'oxyhémoglobine, molécule non active en RMN) et désoxygénée (contenant de la désoxy-hémoglobine), cette dernière étant paramagnétique, et donc visible en RMN. Lors d'une séance de RMN, le patient se voit demander d'effectuer une tâche (bouger le pouce, compter, suivant le processus que l'on souhaite étudier). Dans les zones cérébrales impliquées

dans la tâche, une petite augmentation de la consommation d'oxygène par les neurones est compensée par une large augmentation de flux sanguin. La concentration en désoxyhémoglobine diminue alors, et le signal RMN (plus particulièrement le temps de relaxation T_2^* des noyaux d'hydrogène) augmente de manière très faible ainsi pendant les périodes d'activation. C'est un traitement statistique des signaux récupérés au cours du temps dans chaque petit élément de volume (les voxels) qui permet de décider si oui ou non une zone est concernée par l'action, et si elle répond de manière correcte au stimuli.

5. Références

- [1] Bloch F., Hansen W.W. and Packard M., Nuclear induction, *Phys. Rev.*69: 127, 1946
- [2] Damadian R., Tumors Detection by Nuclear Magnetic Resonance *Science*, 171: 1151-1153, 1971.
- [3] Lauterbur P.C., Image formation by induced local interactions: examples employing NMR, *Nature*, 242: 190-191, 1973
- [4] Purcell E.M., Torrey R.V. and Pound R.V., Resonance absorption by nuclear magnetic moments in a solid, *Phys. Rev.*: 69:37-43, 1946

Le lecteur intéressé pourra également se reporter à l'article paru sous la signature de Jean-Claude Capelani dans le N° 2 de « Auvergne-Sciences » Avril-Mai-Juin 1987 (copie de cet article peut être obtenue sur demande au secrétariat Adasta)

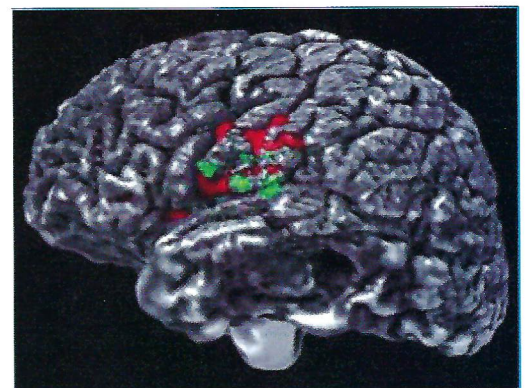


Fig. 13(a) : exemple de zones activées pendant une activité impliquant le cortex moteur (code couleurs)

Fig.13 : Exemples d'images d'IRM fonctionnelle

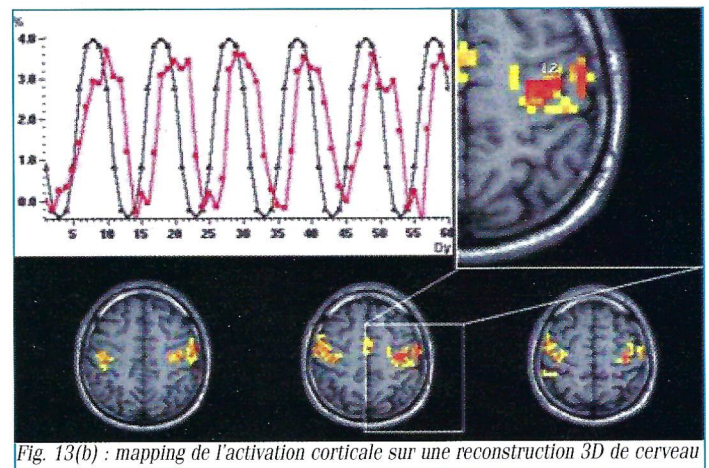
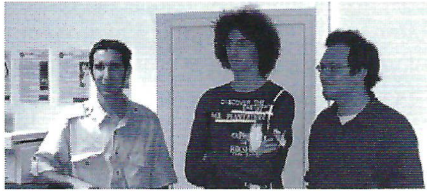


Fig. 13(b) : mapping de l'activation corticale sur une reconstruction 3D de cerveau



Le 17 janvier 2007 MM. Nicolas Dumoulin et Jean-Marie Favreau respectivement Président et Membre de l'association LINUX ARVERNE ont bien voulu nous faire l'honneur de donner une conférence sur ce sujet dans nos locaux de Chamalières, ils nous ont fait parvenir l'article ci-après.

Depuis les premières idées de Turing jusqu'aux supercalculateurs toujours plus performants dans la recherche de la puissance, quelques décennies se sont écoulées. L'informatique a évolué, quittant doucement les laboratoires de recherche pour devenir accessible au grand public. Aujourd'hui, cette science est devenue un outil majeur de notre quotidien, à la fois complexe par son fonctionnement interne et accessible d'utilisation.

Malgré sa complexité technique et scientifique, un ordinateur n'est pourtant rien d'autre qu'un automate très rapide, qui ne sait résoudre que des petits problèmes simples. L'apparente ingéniosité de cet outil réside dans la performance des concepteurs de logiciels, qui ont pour rôle d'exprimer dans un langage rigoureux la suite d'opérations élémentaires qui mènera à l'exécution réussie d'une tâche.

Cependant, le seul langage que comprend un ordinateur est binaire et n'est formé que de 0 et de 1. Ce langage est structuré sous forme d'instructions basiques difficiles à appréhender aisément par les humains. C'est pourquoi les concepteurs de logiciels expriment leurs idées dans un langage certes rigoureux, mais aussi compréhensible : il comporte une structuration en langage naturel codifié aisément manipulable. On parle de code source. La transformation en un programme compréhensible par l'ordinateur est alors réalisée par un compilateur.

Les logiciels libres

Cette compilation produit un exécutable (ou code binaire) correspondant à la transcription exacte du programme initial dans le langage binaire.

Or, autant il est facile de transformer un code source en un programme binaire exécutable, autant l'opération inverse est quasi impossible : si l'on ne dispose que du programme binaire, on ne peut appréhender complètement le fonctionnement de ce programme.

```
#include <iostream>
int main() {
for(unsigned int i = 0; i < 10; ++i)
std : :cout << "Bonjour le monde !"
<< std : :endl;
return 0;
}
```

Issu des milieux universitaires, le logiciel libre propose un cadre juridique et fonctionnel à la diffusion de programmes accompagnés de leur code source, offrant ainsi à l'utilisateur de nombreuses libertés lui garantissant une utilisation sereine.

Nous présenterons ici l'histoire du logiciel libre, ainsi que le mode de fonctionnement quotidien de la communauté. Nous verrons également comment ces logiciels sont distribués, comment tout le monde peut participer à leur amélioration, et comment leur utilisation apporte de réels bénéfices à tous.

● ● ● ● ● NAISSANCE DU LOGICIEL LIBRE

Jusque dans les années 70, l'informatique était un domaine essentiellement universitaire et militaire. La complexité de l'outil rendait très difficile son approche par le grand public. Pendant toute cette période, la plupart des logiciels qui servaient à faire fon-

ctionner les ordinateurs étaient distribués accompagnés de leur code source, et les utilisateurs avertis avaient alors le loisir de modifier leurs comportements.

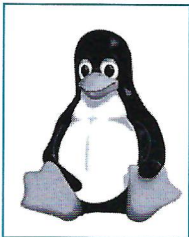
Cependant au début des années 80, avec la démocratisation de l'accès à ces machines, plusieurs entreprises de conception de logiciels émergèrent. Elles choisirent de vendre uniquement les versions binaires des logiciels, sans distribuer les sources : les logiciels étaient devenus propriétaires, impossible d'en modifier le comportement. Les utilisateurs achetaient alors uniquement un droit d'utilisation du logiciel, et non plus le logiciel lui-même.

C'est devant ce constat que Richard M. Stallman, alors chercheur au MIT, décida de lancer le projet GNU (pour « GNU is Not Unix », acronyme récursif qui décrit le projet en référence aux systèmes UNIX existants). L'idée principale du projet était de proposer un cadre juridique permettant de distribuer des logiciels de manière libre, accompagnés de leur code source, et offrant de réelles libertés à l'utilisateur (voir en fin d'article « Zoom sur les 4 libertés »).

Le projet commença doucement dès 1984. Au début des années 90, l'ensemble des briques constituant un système d'exploitation libre existait sous licence libre, excepté un élément fondamental : le noyau. Ce logiciel est le cœur du système d'exploitation, l'outil qui permet aux logiciels de dialoguer correctement avec le matériel. C'est alors que Linus Torvalds, un étudiant en informatique finlandais, diffusa sous licence libre une première version de son système d'exploitation nommé Linux.

En quelques années, le système d'exploitation GNU/Linux (composé du noyau Linux et des logiciels libres du

projet GNU) est devenu un acteur majeur dans de nombreux domaines, depuis les serveurs internet jusqu'à la bureautique en passant par les bornes interactives et les lecteurs multimédia de salon. C'est l'un des rares systèmes d'exploitation à fonctionner sur la quasi-totalité des ordinateurs disponibles sur le marché.



Logo de GNU/Linux



Logo du projet GNU

EN PRATIQUE

L'émergence des logiciels libres a été conditionnée par l'accessibilité d'un réseau électronique planétaire : Internet. Ce réseau a d'ailleurs très tôt profité de la stabilité et de la performance des logiciels libres. Aujourd'hui encore, près de 70% de l'infrastructure d'Internet repose sur des logiciels libres. On peut par exemple citer le serveur Apache qui assure le fonctionnement de nombreux sites Internet, ou encore Postfix qui assure les correspondances par courriel. La flexibilité des logiciels libres le place également aujourd'hui parmi les principaux logiciels qui équipent les appareils programmables évolués (lecteurs multimédia de salon, routeurs wifi, etc).

On pourrait croire avec la présence dans ces marchés très pointus que le logiciel libre n'est pas accessible au quotidien pour des non informaticiens. Ce serait ignorer la percée que réalise le système d'exploitation GNU/Linux depuis quelques années maintenant.

UN LARGE CHOIX DE LOGICIELS

Il existe aujourd'hui un large choix de logiciels libres couvrant tous les domaines d'application. On en dénombre par exemple près de 20 000 fonctionnant sous Debian GNU/Linux. Le nombre impressionnant de ces logiciels pourrait laisser croire qu'il n'y a pas ou peu de cohé-

rence entre eux, et que leur utilisation est complexe et réservée aux spécialistes. Il n'en est rien.

En effet, plusieurs projets et entreprises ont choisi de regrouper autour du noyau Linux l'ensemble des outils nécessaires pour former un ensemble complet de logiciels. Cet ensemble de logiciels s'appelle une distribution et peut être simplement installé à l'aide d'un CD-Rom téléchargeable sur Internet ou disponible dans le commerce.

De nombreux logiciels libres sont également disponibles sous des systèmes d'exploitation non libres, comme par exemple OpenOffice.org ou Mozilla Firefox sous Microsoft Windows ou Mac OS X. Ils permettent de découvrir progressivement la puissance et la flexibilité de ces outils avant une migration plus générale.

UNE SOLUTION LOGICIELLE REPANDUE

Loin d'être anecdotique le choix d'une solution libre a été fait par de nombreuses collectivités ou entreprises de grande envergure. Parmi celles-ci, on peut citer la migration de la Gendarmerie Nationale qui en janvier 2006 a choisi OpenOffice.org, Mozilla Firefox et Mozilla Thunderbird pour équiper l'ensemble des postes du personnel. Plus récemment, Peugeot PSA a migré

20 000 postes de travail et 2500 serveurs sous la distribution Suse GNU/Linux. De nombreuses structures de plus petite taille ont aussi fait ce choix, démocratisant les outils libres dans tous les secteurs professionnels.

Bien évidemment, les universitaires ont dès le début adhéré massivement aux solutions libres, en utilisant et en développant ces outils au quotidien. Outre l'infrastructure réseau et les machines de bureau dans le campus clermontois, on peut citer plusieurs grilles de calcul fonctionnant exclusivement sous GNU/Linux.

Les acteurs du logiciel libre se réunissent également pour concevoir et développer des solutions logicielles pérennes pour les professionnels, réduisant chaque jour les secteurs d'activité sans logiciel libre.

EFFERVESCENCE

La plupart des logiciels libres sont développés par des particuliers passionnés par le développement de logiciel et désireux de partager le fruit de leur passion. Ces développeurs pratiquent cette activité sur leur temps libre, à titre bénévole. On assiste donc à un foisonnement de logiciels libres initiés par une multitude de personnes. Une fois un projet de logiciel libre commencé, de nouveaux développeurs sont généralement les bienvenus pour apporter

La capture d'écran illustre l'utilisation de logiciels libres. Elle est divisée en deux parties principales :

- En haut :** Un lecteur vidéo (Kaffeine) qui diffuse une émission de télévision. On voit deux présentateurs à un plateau. Le titre "LE 18H" est visible en bas à gauche de la vidéo.
- En bas :** Un lecteur de musique (Amarok) qui affiche une liste de morceaux. Le titre principal est "Loreena McKennitt".

Titre	Artiste	Album	Durée	Score	Vote
Prologue	Loreena McKennitt	The Book Of Secrets	4:25	74	
Skellig	Loreena McKennitt	The Book Of Secrets	6:10	0	7
Marco Polo	Loreena McKennitt	The Book Of Secrets	5:19	37	
The Highwayman	Loreena McKennitt	The Book Of Secrets	10:20	0	
La Sérénissima	Loreena McKennitt	The Book Of Secrets	5:09	0	
Night Ride Across The Caucasus	Loreena McKennitt	The Book Of Secrets	8:32	74	
Dante's Prayer	Loreena McKennitt	The Book Of Secrets	7:21	0	
Blacksmith	Loreena McKennitt	Elemental	3:21	86	
She Moved Through The Fair	Loreena McKennitt	Elemental	4:05	86	
Stolen Child	Loreena McKennitt	Elemental	5:07	74	
The Lark In The Clear Air	Loreena McKennitt	Elemental	2:07	85	
Carrighfergus	Loreena McKennitt	Elemental	3:27	85	
Kilwater	Loreena McKennitt	Elemental	5:17	86	
Banks Of Cloudy	Loreena McKennitt	Elemental	5:37	74	
Come By Yips Hills	Loreena McKennitt	Elemental	3:04	85	
Lullaby	Loreena McKennitt	Elemental	4:27	74	

Capture d'écran de logiciels libres

leur contribution au développement du projet. Cette contribution prend généralement la forme de programmation informatique, mais d'autres formes de contributions sont également possibles :

- **rapport de bogues** : l'évaluation du logiciel d'un point de vue utilisateur permet de détecter les erreurs de programmation (bogues), et donc aux développeurs de corriger ces erreurs. Un bogue peut aussi bien venir d'une erreur de programmation technique que d'une plus profonde erreur de conception. Pour résoudre un tel bogue, les développeurs sont alors amenés à dialoguer avec les utilisateurs.

- **documentation** : pour qu'un logiciel soit utilisable, son utilisation doit être guidée à l'aide d'une documentation. Pour rédiger cette documentation, il faut certes connaître le fonctionnement du logiciel, mais aucune connaissance en programmation n'est nécessaire. En revanche, des qualités plus littéraires sont en général les bienvenues.

- **aspect graphique** : les développeurs de logiciels ont souvent une conception très interne des logiciels qu'ils produisent. Cette conception est souvent très éloignée de celle des utilisateurs. Aussi, l'aspect esthétique et fonctionnel doit souvent être travaillé par d'autres personnes que les développeurs. Quand il est question d'ergonomie ou d'illustration, de nombreuses personnes peuvent aider : des utilisateurs qui suggèrent une simplification de l'interface aux psychologues qui scrutent les habitudes d'utilisation, en passant par les infographistes, tout le monde est mis à contribution.

- **traduction** : la plupart des logiciels libres majeurs sont traduits dans plusieurs dizaines de langues, permettant d'offrir à tous l'accès à leurs fonctionnalités. La seule limite étant qu'un traducteur s'intéresse à un logiciel, il arrive que l'on trouve des logiciels traduits dans des langues « minoritaires », comme le breton ou le tibétain.

Ainsi, la diversité des contributions possibles permet à toute personne intéressée d'améliorer le logiciel. La dynamique des logiciels libres est ainsi propulsée par l'implication directe des utilisateurs dans le cycle de développement des projets.

Cette multiplicité des tâches est propice à la création de nombreux

groupes de travail qui coordonnent leurs efforts pour produire un ensemble d'outils cohérents et complets. Cette dynamique assure un cycle de développement accéléré comparé à celui de la concurrence propriétaire.

ÉCONOMIE

Cependant, tous les logiciels libres ne sont pas issus de ce bénévolat.

Certaines entreprises (leur nombre croît d'année en année) contribuent au développement de logiciels libres aussi bien en libérant leurs projets qu'en assurant un support de classe professionnelle pour les entreprises qui utilisent leurs logiciels libres. Certaines entreprises s'associent à des projets pour financer le développement de fonctionnalités additionnelles.

Les aides d'entreprises aux logiciels libres sont donc multiples, permettant de diversifier les axes de développement de nombreux projets libres.

D'autre part, la plupart des entreprises sensibilisées au logiciel libre sont enclines à utiliser ce modèle de diffusion pour les produits qu'elles peuvent être amenées à développer : l'offre libre s'accroît encore par ce vecteur.

CONCLUSION

Nous avons vu à travers cet article que les logiciels libres avaient émergé des milieux universitaires, reprenant les idées de diffusion libre des connaissances pour offrir aux utilisateurs des libertés pérennes.

La communauté des utilisateurs et développeurs de logiciels libres s'est étoffée depuis les universitaires, en passant par les passionnés, pour maintenant atteindre les milieux professionnels. La démocratisation de ces solutions logicielles permet aujourd'hui d'envisager une utilisation dans tous les domaines d'activité, depuis le loisir jusqu'à l'utilisation au sein de l'entreprise.

Remerciements : les auteurs tiennent à remercier Annaïs Denis et Vincent Barra pour leur soutien et leurs remarques pertinentes.

Bibliographie

- Le livret du libre : <http://www.livretdulibre.org/>
- L'article « Logiciel Libre » sur Wikipédia : http://fr.wikipedia.org/wiki/Logiciel_libre
- Le site de l'association LinuxArverne : <http://linuxarverne.org>

- Un annuaire de logiciels libres pour tout système : <http://framasoftware.net>

Zoom sur les 4 libertés

Tout logiciel, qu'il soit issu du logiciel libre, ou qu'il soit distribué de manière fermée, est accompagné d'une licence d'utilisation. Ce document décrit ce que l'utilisateur peut ou non faire avec le logiciel, et dans quel contexte. La plupart des logiciels propriétaires ont une licence qui décrit les interdictions et restrictions d'utilisation qui sont autorisées.

Les logiciels libres sont au contraire distribués accompagnés d'une licence qui décrit les libertés assurées à l'utilisateur.

La Free Software Foundation (FSF) créée par Richard M. Stallman en 1985 pour aider au fonctionnement du projet GNU a ainsi défini les 4 libertés fondamentales qu'une licence doit offrir aux utilisateurs afin que le logiciel correspondant soit dit libre :

- Liberté 0 : la liberté d'exécuter le programme, pour tous les usages.
- Liberté 1 : la liberté d'étudier le fonctionnement du programme.
- Liberté 2 : la liberté de redistribuer des copies.
- Liberté 3 : la liberté d'améliorer le programme et de publier ses améliorations.

Ces quatre libertés assurent que le logiciel, composé d'une suite logique d'instructions élémentaires, pourra être utilisé et partagé sans restriction. Dans les faits, cela permet à l'utilisateur d'avoir accès à des logiciels de qualité, dont l'amélioration est vertigineuse : en quelques années, le système d'exploitation libre GNU/Linux est passé d'un outil d'initiés à une solution informatique fiable, complète et simple d'accès.

Pour aller plus loin

- Le site de la FSF europe : <http://www.fsfeurope.org/index.fr.html>
- Le site du projet GNU : <http://www.gnu.org/home.fr.html>

Zoom sur l'Art Libre

Depuis maintenant quelques années, les logiciels libres offrent un tout cohérent, permettant de répondre à la majeure partie des besoins quotidiens des utilisateurs. Avec la diversité des solutions logicielles proposées, on a vu émerger de nouveaux besoins. Il était évident que les logiciels devaient être agréables à

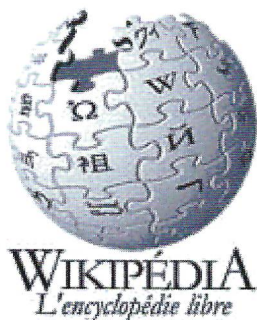
utiliser, esthétiques. C'est ainsi que les premiers graphistes sont venus contribuer au logiciel libre. Puisqu'il était distribué librement, il était évident que les créations graphiques devaient l'être. Les premières briques de l'Art Libre étaient posées.

Après quelques années de créations artistiques sous licences libres, de nombreux domaines ont suivi l'exemple du graphisme. On peut par exemple citer le portail dogmazic.net qui propose en téléchargement légal et gratuit de la Musique Libre, ou encore artlibre.org qui se propose comme un annuaire général d'artistes produisant sous la licence libre éponyme.

Pour aller plus loin

- L'article « Culture Libre » sur Wikipédia : http://fr.wikipedia.org/wiki/Culture_libre
- Le portail de musique libre dogmazic : <http://dogmazic.net>
- L'annuaire d'artistes libres artlibre : <http://artlibre.org>
- L'association Libre Attitude de promotion de la culture libre : <http://libre-attitude.org>

Zoom sur Wikipédia



Créée en 2000 par Jimmy Wales et Larry Sanger, Wikipédia est une encyclopédie dont le fonctionnement s'inspire des logiciels libres. Elle se présente sous la forme d'un site internet (accessible à l'adresse <http://fr.wikipedia.org>) dont chacune des pages est librement modifiable, permettant à tous les visiteurs d'apporter les informations manquantes.

L'accroissement de Wikipédia est vertigineux, ainsi on peut compter au 27 janvier 2007 près de 435 000 articles en français, et plus de 6 millions dans les 249 langues disponibles. L'encyclopédie est devenue en quelques années une source d'information incontournable. Ainsi en novembre 2006, le cabinet de mesure d'audience Comscore a estimé que

Wikipédia était le 6^{ème} site le plus visité au monde.

L'objectif du projet Wikipédia est de proposer une encyclopédie libre, universelle et multilingue, dans un respect de la « neutralité de point de vue ».

Cependant, l'aspect collaboratif du fonctionnement de Wikipédia lui est souvent reproché, notamment par la presse traditionnelle, bien que celle-ci s'en serve de plus en plus fréquemment comme source d'information. Ces craintes ont en partie pour cause la méconnaissance du fonctionnement de l'encyclopédie, qui pourrait laisser penser que le contenu, laissé en libre modification, tendrait à produire un document d'une qualité moindre que les équivalents propriétaires.

Une étude comparative du magazine scientifique Nature (Jim Giles, « Internet encyclopædias go head to head », Nature, December 15, 2005 : 900-01) portant sur 50 articles du domaine scientifique issus de la version anglaise de Wikipédia et de l'Encyclopædia Britannica a néanmoins montré que le nombre d'erreurs contenues dans les articles des deux encyclopédies était sensiblement équivalent. De plus, la vigilance constante des contributeurs réguliers sur les articles de leur domaine assure une correction très rapide des vandalismes, souvent de

l'ordre de la minute.

Afin de promouvoir l'encyclopédie et dans le but de réunir le budget nécessaire au fonctionnement technique de Wikipédia, la fondation Wikimedia a été créée en 2003. Elle emploie aujourd'hui une dizaine de personnes, comptables, développeurs et techniciens pour l'essentiel. Ce faible nombre est rendu possible par l'implication d'un grand nombre de bénévoles dans le projet. Ainsi, depuis novembre 2006, la fondation Wikimedia est présidée par Florence Nibart-Devouard, une bénévole qui réside à Clermont-Ferrand et consacre tout son temps à la gestion du projet international.

La fondation est également à l'origine d'autres projets fonctionnant sur le même principe que Wikipédia. Parmi ceux-ci, on peut citer le dictionnaire *Wiktionary*, la bibliothèque de livres pédagogiques *Wikibooks* ou encore la base de documents multimédia *Wikimedia Commons* qui offrent un large panel de documents accessibles sous licence libre.

Pour aller plus loin

- Le site de wikipédia en version française : <http://fr.wikipedia.org>
- Le site de la fondation wikimedia : <http://wikimedia.org/>

The screenshot shows the Wikipedia page for Clermont-Ferrand. The article text includes:

Clermont-Ferrand (dans le dialecte auvergnat : *Clermont-Ferrand* ou *Clermont d'Auvergne*) est une commune française, située dans le département du Puy-de-Dôme et dans la région d'Auvergne. Ses habitants sont appelés les Clermontois. En partie pour des raisons historiques, la ville est souvent appelée *Clermont*.

La ville moderne est née d'une union de deux villes distinctes, Clermont et Montferrand imposées par Louis XIII et confirmée sous Louis XV.

Alors que Montferrand fut fondée au début du XII^e siècle par les comtes d'Auvergne sur le modèle des bastides du Sud-Ouest, Clermont est beaucoup plus ancienne, puisqu'elle existait déjà dans l'Antiquité. La plus ancienne mention de l'existence de Clermont figure dans l'œuvre de Strabon, au début du I^{er} siècle. La ville est alors dénommée *Nemossos* et qualifiée de « métropole des Avernes ». Elle prit par la suite la dénomination d' *Augustonemetum* et connut une phase d'extension qui se termina au milieu du III^e siècle.

A summary table is visible on the right:

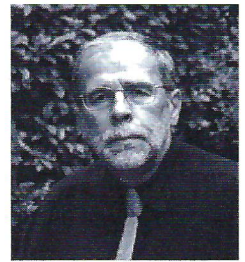
Pays	France
Région	Auvergne (chef-lieu)
Département	Puy-de-Dôme (préfecture)
Arrondissement	Arrondissement de Clermont-Ferrand
Canton	Chef-lieu de 8 cantons
Code INSEE	63113

Capture d'écran d'une page Wikipédia

De la toise au mètre

Par Jean CHANDEZON

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



1. LES ANCIENNES UNITÉS DE LONGUEUR

Les anciennes unités de mesure sont généralement basées sur des comparaisons avec les mensurations de l'être humain : la longueur du pied pour le pied, la largeur du pouce pour le pouce, la longueur des deux bras étendus pour la brasse ou la toise, la distance parcourue en une heure pour la lieue. Avec de telles définitions, elles ne pouvaient être que très variables dans l'espace et dans le temps, ce qui n'est pas très grave lorsqu'il s'agit uniquement d'avoir des ordres de grandeur, mais devient très ennuyeux lorsqu'il s'agit de faire du commerce ou de normaliser des objets. La multiplication des échanges humains et commerciaux a peu à peu conduit à utiliser des mesures plus universelles comme les mesures du roi au XVIII^{ème} siècle avec le pied

du roi. Il fallait donc disposer d'un étalon à partir duquel on construit tous les instruments de mesure. Cette unification est actuellement terminée puisqu'il existe, depuis 1960, un système d'unité mondial, le système international SI, adopté par les scientifiques du monde entier. Il existe malgré tout quelques poches de résistance, dans l'aviation par exemple, où l'on mesure toujours les altitudes en pieds et les distances en miles.

Au choix de l'étalon de longueur s'ajoute le choix de la façon de le diviser : dans les systèmes anciens, c'est la simplicité de la division par 12 qui permet d'avoir très simplement 1/2, 1/3, 1/4, 1/6. Cette manière de compter simplifie la mesure ; pour s'en convaincre, il suffit de voir la difficulté qu'il y a de diviser une tarte en dix parts égales, alors que c'est assez simple de le faire avec douze parts égales. Par contre, la division en douze complique très sérieusement les calculs qui se font en base 10. Sous l'Ancien Régime, cette difficulté était encore aggravée pour les transactions commerciales, car la monnaie était comptée en livres divisées en vingt sols de chacun douze deniers. Ces difficultés de calcul ont fait le bonheur des arithméticiens comme François Barreme (1640-1703) qui a écrit un ouvrage à l'usage des marchands appelé « le barème » et son fils Nicolas Barreme avec « L'arithmétique du sieur Barreme ».

Dans le monde moderne, il reste encore quelques vestiges de la base douze : les oeufs par exemple sont toujours vendus à la douzaine.

Les principales unités anciennes pour la mesure des longueurs sont :

1. **Le point**, encore utilisé en typographie

2. **La ligne** qui contient 12 points; elle est de la grandeur d'un grain d'orge

3. **Le pouce** qui contient 12 lignes ; il est de la largeur du pouce d'un homme fait (?)

4. **Le pied** qui contient 12 pouces ; il est de la dimension d'un pied

5. **La toise** qui contient 6 pieds; elle est de la dimension d'un homme très grand

6. **La perche** dont on se sert pour arpenter un terrain. La perche de Paris est de 3 toises donc 18 pieds. Ailleurs la perche est de 22 pieds soit 3 toises et 4 pieds

7. **La lieue** qui est la distance que peut parcourir un attelage en une heure ; cette définition assez floue à conduit à des mesures très variables :

- **l'ancienne lieue de Paris** (avant 1674) est de 10 000 pieds soit 1666,66 toises

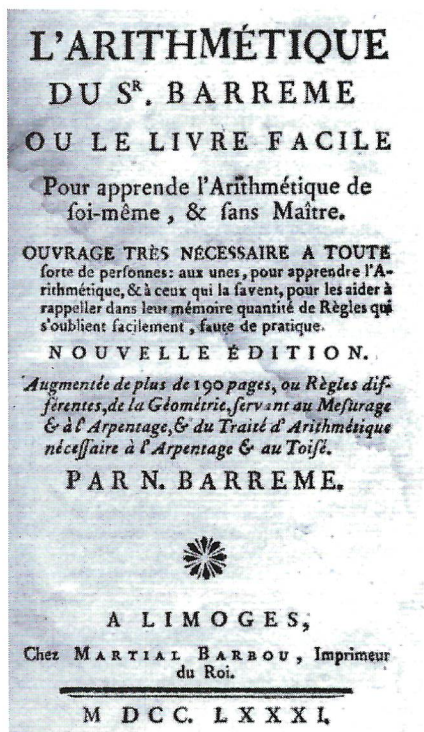
- **la petite lieue ou lieue de Paris** (après 1674) est de 2000 toises

- **la lieue des Postes (après 1737)** est de 2200 toises

- **la lieue tarifaire** (après 1737) est de 2400 toises

- **la lieue commune ou lieue terrestre** qui a une définition géodésique : 25 lieues valent un degré du méridien terrestre ou 2282 toises ; cette définition se trouve dans l'édition du « spectacle de la nature » de l'abbé Pluche paru en 1755. Elle correspond à 57 050 toises pour un degré de méridien. Dans « le nouveau spectacle de la nature » de Chevignard, paru en 1798 cette lieue est donnée pour 2283 toises soit 57 075 toises pour un degré de méridien

- **la lieue métrique**, après la révolution, définie à partir du système métrique qui vaut 4 km



LA SCIENCE USUELLE. Les toises font la petite lieue : deux mille deux cents quatre-vingt-deux toises font la lieue commune ; dont vingt-cinq répondent à un degré du méridien. Nous omettons le reste, dont la variété est encore plus grande & même plus arbitraire. Il suffit pour bien opérer, qu'on sache à quelle mesure on s'en tient.

Ces unités qui variaient d'une seigneurie à une autre ont peu à peu été unifiées dans le royaume de France, et portent alors le qualificatif "du roi" comme la ligne du roi, le pied du roi.

Les unités anglo-saxonnes sont du même type mais plus petites car le pied du roi de France était vraiment très grand.

A ces unités s'en ajoutaient d'autres utiles à certaines corporations : l'aune pour les drapiers, l'arpent pour les arpenteurs...

L'étalon à partir duquel étaient définies toutes les autres mesures était la toise. (L'étalon est une barre de fer muni d'épaulements, ou talons, entre lesquels on plaçait la mesure à comparer). Un étalon de la toise dite toise du Châtelet fut fabriqué en 1666. Après l'expédition du Pérou elle fut remplacée en 1747 par la toise du Pérou plus précise. La mesure devait se faire à une température de 10° Réaumur sinon, il fallait corriger la longueur pour tenir compte de la dilatation. Dans l'échelle Réaumur ancienne l'eau gèle à 0° et bout à 80°, la convention imposa en 1793 une nouvelle échelle de 0° à 100° pour les thermomètres qui devinrent alors centigrades.

2. LA MESURE DU MERIDIEN TERRESTRE

La première évaluation du rayon de la terre, mesuré à partir de la longueur des ombres, remonte au III^{ème} siècle avant J.-C. avec Erathostène.

L'une des mesures directes, par arpentage, du méridien terrestre est celle faite vers 1530 par un médecin célèbre : Fernel. Il partit de Paris et marcha vers le nord de 1° de latitude. Il revint ensuite dans un coche et nota le nombre de tours de roue. Après correction des détours

du chemin il estima que le degré de méridien valait 56 746 toises au lieu de 57 075 toises, précision de l'ordre de 2% assez inespérée avec un tel système de mesure.

Le Hollandais Snell (1580-1626), plus connu pour avoir découvert les lois de la réfraction, mit au point la méthode de triangulation pour mesurer les distances. *Cette méthode consiste à faire une mesure la plus exacte possible de la distance entre deux points pas trop éloignés l'un de l'autre. Le segment qui joint ces deux points est appelé « base » ; ensuite on calcule la distance entre deux points éloignés en construisant, à partir de points remarquables, un ensemble de triangles qui partagent deux à deux un côté. En mesurant ensuite uniquement les angles de ces triangles, avec l'aide du calcul trigonométrique, on déduit la distance entre les deux points éloignés. Cela oblige de disposer de tables trigonométriques précises.* En 1617 Snell appliqua cette méthode pour mesurer la distance entre Aalkmar et Bergen-Op-Zoom en Hollande. Il proposa alors 55 110 toises pour un degré de méridien.

En 1669 l'abbé Picard (1620-1682) utilise la méthode de Snell pour faire une nouvelle mesure du degré de méridien. Il prit comme base un chemin pavé rectiligne sans irrégularité entre Villejuif et Juvisy. Il mesura ensuite la longueur de la base avec deux règles en bois de 2 toises chacune. Il trouva que la base était de 5663 toises à 1 pied près. Ensuite, à partir de cette base, avec un réseau de 13 triangles entre Malvoisine et Amiens, il conclut que le degré de méridien vaut 57 060 toises.

Les résultats de Picard étant mis en doute en raison d'une base jugée trop petite et des besoins, en constante augmentation, de la cartographie à la fin du XVII^{ème} siècle, il fut décidé de reprendre ces mesures. Ce travail, commencé par Jacques Cassini en 1673, repris en 1683, abandonné, puis repris, fut terminé par le fils de Jacques Cassini en 1718. De ce travail il ressortait que la longueur

de l'arc de méridien diminuait de l'équateur vers le pôle, un degré de méridien étant égal à 58 019 toises à l'équateur et à 56 224 toises au pôle. Il résultait de cela que la terre était un ellipsoïde allongé aux pôles. Comme ce résultat était en contradiction avec les hypothèses de Newton et de Huyghens, il s'ensuivit une des polémiques les plus célèbres de l'histoire des Sciences. Pour tirer cela au clair, il fut décidé sous Louis XV de faire deux nouvelles campagnes de mesures, l'une au voisinage de l'équateur, l'autre au voisinage du cercle polaire. Pour ce faire à partir de la « toise du Châtelet », l'étalon de l'époque, on fabriqua deux toises étalon en fer : la toise du nord et la toise du Pérou (en 1747 sur proposition de La Condamine c'est la Toise du Pérou, déposée à l'Académie des Sciences qui devint l'étalon de longueur).

En 1736 une première expédition avec Maupertuis et Clairaut eut lieu en Laponie, près du cercle polaire, au fond du golfe de Botnie entre la Suède et la Finlande. Le résultat fut de 57438 toises pour un degré d'arc. Maupertuis et Clairaut, reprenant les calculs de Picard, trouvent 57 183 toises pour un degré au niveau de la France ce qui montre que, comme le prévoit la théorie de Newton, le degré de méridien diminue en allant vers l'équateur. La terre est donc bien un ellipsoïde aplati aux pôles.

Le 16 mai 1735 une autre expédition avec Bouguer, La Condamine et Godin est partie pour le Pérou qu'elle atteint le 9 mars 1736. La campagne de mesure eut lieu au voisinage de Quito dans l'actuel état de l'Equateur. Ils ne revinrent en France qu'en 1744. La Condamine et Bouguer trouvèrent 56 767 toises par degré, mais la mesure ayant été faite à 1226 toises d'altitude, le résultat ramené au niveau de la mer est de 56 748 toises. De son côté Godin a trouvé 56 746 toises. Ces résultats, inférieurs à la valeur trouvée pour la France, confirment bien que la terre est un ellipsoïde aplati aux pôles et donc que Newton avait raison et que les Cassini avaient tort. De l'ensemble de ces résultats on peut penser que la précision obtenue est de l'ordre du dix-millième. Il est vraisemblable que c'est à partir des résultats de l'abbé Picard qu'a été

établie la valeur de la lieue terrestre dont on trouve une définition dans l'ouvrage de l'abbé Pluche, paru dans l'édition de 1755 de « Le spectacle de la nature ». Cette lieue, qui vaut $1/25^{\text{ème}}$ de degré de méridien, est donnée pour 2282 toises ce qui fait 57 050 toises par degré, ce qui, aux erreurs d'arrondi près, est identique au résultat de l'abbé Picard 57 060 toises. Avec la définition géodésique de la lieue la circonférence de la terre, considérée comme sphérique, est de 9000 lieues.

Avec l'apparition de la lieue terrestre on voit bien, qu'avant la Révolution, il y avait un mouvement qui s'amorçait pour prendre comme unité fondamentale de mesure, non pas les mensurations d'un homme, mais celles de la terre avec le degré de méridien. A la Révolution, le changement principal provient du rejet de la division des arcs en degrés qui est remplacée par la division en grade. Ce qui va devenir la référence sera la longueur du grade de méridien et non plus la longueur du degré de méridien. Cette définition rencontre une difficulté avec le fait que la terre n'est pas sphérique mais ellipsoïdale ; il convient donc alors de se référer à une valeur moyenne du grade de méridien et non pas à une valeur locale. C'est ce qui a conduit à la définition du mètre par la Convention : le mètre est égal à la dix-millionième partie du quart de la circonférence de la terre.

● ● ● ● ● 3. LES UNITÉS MÉTRIQUES ISSUES DE LA RÉVOLUTION

Les révolutionnaires ont décidé d'unifier les systèmes de mesure et donc d'abandonner les systèmes anciens d'unités et de ne plus utiliser que le système décimal. Cela a réussi à deux exceptions près :

- la mesure du temps où le jour décimal de dix heures de 100 minutes de 100 secondes a été abandonné le 18 germinal an III (7 avril 1795). Cela a été en grande partie motivé par la difficulté de fabriquer des horloges : en effet, il est relativement simple de faire des roues dentées avec 60 dents mais cela devient très compliqué avec cent. Le système décimal n'a pas que des avantages !

- la mesure des angles où, de nos jours, les grades sont actuellement presque complètement abandonnés. Après avoir hésité à choisir, sous l'influence de Borda, comme nouvelle unité la longueur du pendule battant la seconde, le 26 mars 1791 la Constituante a choisi de donner du mètre, la nouvelle unité de longueur, une définition géodésique :

- le mètre est égal à un dix-millionième du quart du méridien terrestre c'est à dire qu'un kilomètre est égal à un centigrade du méridien terrestre (il y a 400 grades soit 40000 centigrades dans une circonférence). (Le mille marin a une définition identique avec la mesure sexagésimale des angles : 1 mille marin correspond à une minute de méridien terrestre).

Cette définition très séduisante, et qui semble universelle, nécessite de connaître de façon précise la longueur du méridien terrestre. Le paradoxe est que, pour définir l'unité nouvelle, il faut faire appel à l'unité ancienne : la ligne pour mesurer le méridien, puis ensuite définir le mètre. C'est pour cela que la valeur du mètre sera donnée en lignes.

La Constituante a confié à deux géomètres Jean-Baptiste Delambre (1749-1822) et Pierre Méchain (1744-1804) la mission de mesurer le méridien terrestre entre Dunkerque et Barcelone. Cette mesure a été faite par triangulation avec deux bases de référence d'environ 6000 toises : l'une entre Melun et Lieusaint et l'autre entre Vernet et Salses près de Perpignan. En raison des troubles liés à la Révolution, ces mesures ont duré 6 ans de 1792 à 1798. Il a donc fallu, dans les premiers temps, définir le mètre à partir des mesures anciennes faites au Pérou et en Laponie.

● ● ● ● ● 4. LA CONVERSION DES ANCIENNES UNITÉS

Le 1^{er} août 1793 la Convention, par une loi, décide d'adopter une unité de longueur fondée sur la longueur du méridien terrestre. A partir des mesures du méridien faites par Maupertuis et La Condamine elle adopte pour le mètre la valeur provisoire suivante :

*Un mètre est égal à 3 pieds et
11,44 lignes de la toise du Pérou
soit : 443,44 lignes.*

La loi du 18 germinal an III (7 avril 1795), loi constitutive du système métrique précise « qu'il n'y aura qu'un seul étalon de longueur pour toute la République; ce sera une règle de platine sur laquelle sera tracé le mètre qui a été adopté pour l'unité fondamentale de tout le système des mesures ».

La conversion définitive des unités anciennes en unités métriques a été définie par la Loi du 19 frimaire an VIII (10 décembre 1799) qui précise que « le mètre est égal à 3 pieds et 11,296 lignes de la toise de Paris ». Le pied comprenant 144 lignes il y a donc, selon la Loi, 443,296 lignes dans un mètre. La précision de cette conversion qui est de 2 microns pour un mètre, paraît bien optimiste compte tenu de la précision des instruments de l'époque.

La toise étant de six pieds, contient 864 lignes. Par conséquent, avec le facteur de conversion précédent, la toise vaut 1,94904 m. Le facteur de conversion de 1,949 précis au dixième de millimètre, sera retenu.

Si l'on prend, pour calculer le facteur de conversion, la valeur de 2282 toises pour la lieue terrestre donnée par l'abbé Pluche, sachant



Le mètre étalon de la place Vendôme à Paris

Unité de longueur	lieue	perche	toise	Pied	pouce	ligne	point
Valeur en pieds	13692	22	6	1	1/12	1/144	1/1728
Valeur en mètres	4448	7,14	1,949	0,325	0,0271	0.002256	0.000188

Tableau de conversion des mesures anciennes en mètres

que 25 lieues terrestres correspondent à 1 degré de méridien, on en déduit que la toise est de 1,948 m ce qui ne diffère que de un dixième de millimètre de la valeur choisie par la Convention ; avec la valeur de 2283 toises pour une lieue au voisinage de Paris, issue des mesures de Maupertuis et La Condamine on trouve que la toise est de 1,947 m. Finalement la mesure du méridien terrestre par Delambre et Méchain a apporté très peu de choses, d'autant plus que cette mesure était légèrement erronée en raison d'erreurs de calcul.

5. EVOLUTION DE LA DÉFINITION DU MÈTRE JUSQU'A NOS JOURS

Définir l'étalon de longueur à partir d'une mesure géodésique est une idée très séduisante mais pas très commode. Cela exige en effet d'avoir une définition très précise du méridien terrestre. De plus, il faut disposer d'un étalon de longueur pour mesurer l'arc de méridien étalon, qui sera ensuite redéfini à partir de la mesure ! Il était délicat d'utiliser à nouveau la toise pour définir le mètre.

Le 4 messidor an VII (22 juin 1799), un étalon prototype du mètre est présenté au corps législatif et déposé le même jour aux Archives de la République (actuellement Conservatoire des Arts & Métiers) et enfermé dans une armoire de fer... jusqu'à nos jours. Le mètre est une règle plate de section rectangulaire qui fait un mètre d'un bout à l'autre.

Peu à peu, c'est l'étalon physique qui est devenu l'étalon de longueur. En

1889 le Bureau des Poids et Mesures redéfinit le mètre comme étant la distance entre deux points sur une barre d'un alliage de platine iridium déposée au pavillon de Breteuil à Sèvres. Cette barre est toujours conservée à Sèvres.

Avec l'augmentation de la précision de la mesure des longueurs, due principalement aux mesures optiques, il est devenu nécessaire de redéfinir le mètre. En 1960, la 11^e Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) définit le mètre comme 1 650 765,73 longueurs d'onde d'une radiation orangée émise par l'isotope 86 du krypton. Cette définition à partir de la période d'un phénomène périodique est un retour des choses car, en 1790, l'Assemblée Nationale qui avait adopté le principe de l'uniformisation des poids et mesures, avait envisagé de choisir comme unité la longueur d'un pendule simple battant la seconde.

Le mètre a été redéfini par la conférence de 1983 comme étant la distance parcourue par la lumière dans le vide en 1/299 792 458 seconde, la vitesse de la lumière dans le vide étant une constante universelle supposée parfaitement connue. La précision de un trois-cent-millionième correspond à peu près à une erreur de 10 cm sur la mesure de la circonférence terrestre ; pour avoir une telle précision avec une définition géodésique il faudrait mesurer le degré de méridien avec une précision meilleure que le millimètre.

Cette définition du mètre fait appel à une nouvelle définition de la seconde :

- La seconde a d'abord été définie comme une fraction du jour solaire

terrestre moyen (1/86 400). L'échelle de temps associée est le Temps universel TU

- En 1960, pour tenir compte des irrégularités du mouvement de la terre, elle a été définie comme une fraction de l'année tropique 1900, soit 1/31 556 925,9747. C'est la seconde du temps des éphémérides TE.

- Depuis la 13^e Conférence Générale des Poids et Mesures, la seconde est définie par rapport à une propriété spectrale de la matière. Cette unité de base du système international a été définie en 1967 dans les termes suivants :

La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133.

La seconde est actuellement l'unité dont l'étalon est le plus précis.

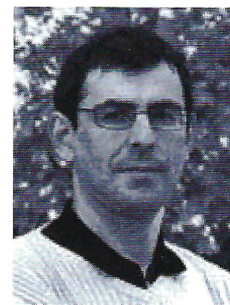
Bibliographie

- **Le spectacle de la nature**, abbé Pluche, Paris, 1755
- **Le nouveau spectacle de la nature**, A.T. Chevnard, Paris, An VI (1798)
- **L'arithmétique du Sieur Barreme**, Nicolas Barreme, Paris 1781
- **Géographie mathématique**, H. Bouasse, Paris, Delagrave, 1923
- **L'aventure du mètre**, musée national du CNAM, 1989

Nanosciences et nanotechnologies : des objets à quelques exemples d'applications

Par Frédéric CHANDEZON

Laboratoire d'Electronique Moléculaire Organique et Hybride (LEMOH) - Grenoble - DRFMC/SprAM UMR 5819



Monsieur Frédéric Chandezou nous a fourni cet article suite à la conférence qu'il avait bien voulu nous faire l'honneur de présenter à l'ADASTA en octobre 2006.

INTRODUCTION

Depuis l'invention du transistor et le développement de l'industrie des semiconducteurs, la microélectronique a été marquée par une course à la miniaturisation des composants. Cette course suit la fameuse "loi de Moore" qui prédit que la taille d'un composant électronique diminue d'un facteur deux tous les deux ans. Avec l'évolution actuelle des techniques de lithographie, on prévoit d'atteindre des tailles de gravure de l'ordre d'une vingtaine de nanomètres en 2010 (nm en abrégé, 1 nm = 10^{-9} m soit un milliardième de mètre). Des composants de cette taille sont constitués d'une quantité dénombrable d'atomes : les effets quantiques deviennent importants et donnent lieu à des propriétés physiques particulières. L'étude des propriétés de ces nano-objets est le domaine des nanosciences qui connaît un développement spectaculaire de par le monde depuis une dizaine d'années (1-3).

Pour être plus précis, les nanosciences traitent d'objets dont au moins une des dimensions est inférieure à 100 nm, soit encore 0,1 μm ou bien 1/10 000^e de mm (figure 1).

Cette limite supérieure de 100 nm peut sembler arbitraire mais elle correspond plus ou moins à un seuil au-dessus duquel les effets de taille sur les propriétés physiques deviennent négligeables. En dessous de cette limite, une légère variation de

taille peut avoir des conséquences importantes sur certaines grandeurs physiques. Prenons à titre d'exemple la température de fusion T_f d'un matériau : dans le cas de l'or, cette température vaut 1063°C à la pression atmosphérique. En 1976, deux chercheurs de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne ont montré que T_f chute pour des gouttelettes d'or de diamètre inférieur à une vingtaine de nm, cette chute atteignant jusqu'à 500°C pour des particules de diamètre de 4 nm (4). Cet effet est dû à la part croissante de la surface comparée au volume pour des particules de petite taille. Par ailleurs, dans le domaine de tailles qui nous intéresse, les lois de la physique quantique peuvent devenir prépondérantes donnant lieu à des évolutions nouvelles en fonction de la taille. Un exemple est le cas de nanoparticules de semiconducteurs ou "points quantiques" (*quantum dots* en anglais) qui sera développé plus tard dans cet article. L'écart entre les niveaux électroniques de ces particules augmente avec la taille – un peu comme la fréquence d'une corde de violon tend vers les aiguës lorsque la longueur pincée diminue – ce qui occasionne d'importantes variations des propriétés optiques des nanoparticules avec la taille. Enfin, de nouveaux matériaux issus des recherches en nanosciences sont apparus. Le cas le plus célèbre est celui des nanotubes de carbone, découverts en 1991, qui sont des tubes creux de carbone de dimension nanométrique en diamètre et de longueur micrométrique (2,3,5). Les nanotubes de carbone sont des matériaux aux propriétés étonnantes. Ils ont ainsi une résistance mécanique

supérieure à celle de l'acier tout en étant bien plus légers. Suivant leur structure, ils peuvent être métalliques ou semiconducteurs. Nous reviendrons plus loin dans cet article sur ces nano-objets.

La richesse des matériaux du nanomonde et les perspectives d'applications qui en découlent font que les nanosciences connaissent un fort engouement depuis quelques années. Les budgets de recherche alloués sont en augmentation dans de nombreux pays et des initiatives nationales ou internationales sont menées pour coordonner les efforts de recherche dans le domaine. D'après une étude récente, la France se classe ainsi 6^e dans le monde en terme d'investissements publics et du nombre de publications dans le domaine des nanosciences-nanotechnologies (6). Des pôles de recherche-développement dédiés aux nanosciences et aux nanotechnologies ont été créés dans le monde. Le pôle d'Innovation en Micro et Nanotechnologies, MINATEC, situé à Grenoble et inauguré en 2006 en est un exemple (7). Le mode de travail des scientifiques est également modifié par le caractère pluridisciplinaire intrinsèque des nanosciences, imposant un dialogue permanent entre physiciens, chimistes, biologistes et ingénieurs.

Cet engouement autour des nanosciences s'accompagne de fortes interrogations sociétales et éthiques suscitant parfois des situations de rejet global de la part de certains groupes (8,9). Des événements médiatiques ont également suscité l'interrogation voire l'inquiétude du public sur les risques liés aux nanosciences et aux nanotechnologies. Ce

fut le cas lors de la publication aux Etats-Unis en 2002 du roman « La proie » de Michaël Crichton (10). Ce thriller traite d'une "gelée grise" faite d'essaims de nanobiorobots qui échappe au contrôle de leurs concepteurs et attaque l'homme. Un événement plus récent est la prise de position du Prince Charles en 2003 qui appelait les scientifiques britanniques à s'interroger sur les « risques énormes pour l'environnement et la société » liés aux nanosciences et aux nanotechnologies. Suite à cet appel au monde scientifique, la *Royal Society* et la *Royal Academy of Engineering* lancèrent une enquête sur les potentialités mais aussi les risques liés à ce domaine de recherche (11). D'autres initiatives allant dans le sens ont eu lieu dans le monde, notamment en France (12).

Parmi les aspects qui suscitent des interrogations, un point important concerne les risques toxicologiques liés aux nanoparticules vis-à-vis de l'homme et de l'environnement (13). Un autre point concerne le risque de pertes de libertés individuelles. Les nanotechnologies ouvrent en effet des possibilités de miniaturisation dans le domaine des technologies de l'information qui laissent envisager la possibilité d'identifier et de localiser un individu via une puce miniature implantée sous la peau, puce qui pourrait contenir des informations personnalisées. On imagine les possibilités qui pourraient en découler comme un suivi de personnes fragiles (enfants, malades,...) mais également les inquiétudes qu'elles soulèvent sur les dérives possibles par des personnes ou des états mal intentionnés. Enfin, l'association des nanotechnologies et du vivant ouvrent la possibilité de nouveaux traitements médicaux, d'implants auditifs ou visuels plus performants, de tissus artificiels, etc (2). Mais quelle limite mettre à l'amélioration de l'humain par la technique ? Tous ces aspects font l'objet de recherches et de réflexions dans le monde pour apporter des réponses satisfaisantes sur le sujet. L'enjeu est taille car il s'agit d'obtenir une acceptation par la société des nanotechnologies et des produits dérivés et d'éviter un rejet global comme cela c'est produit pour les OGM.

Le but de cet article est de présenter, de manière non exhaustive, quelques aspects des nanosciences depuis les

objets jusqu'aux applications. A partir de quelques exemples, seront abordés les points suivants :

- Les objets du nanomonde : quels sont ils ? En me basant sur quelques exemples, je présenterai leurs propriétés et leurs particularités.

- Les nanosciences et nanotechnologies sont-ils des domaines totalement nouveaux ? Je démontrerai à partir de quelques exemples d'objets que les artisans des siècles passés étaient parfois des nanotechnologues qui s'ignoraient.

- Enfin, quelles sont les perspectives d'applications actuelles des nanosciences ? Je présenterai quelques exemples en étant forcément restrictif. Le lecteur intéressé par tous ces points pourra consulter des ouvrages spécialisés pour plus d'informations (1-3).

● ● ● ● ● LES NANOPARTICULES, "BRIQUES DE BASE" DU NANOMONDE

Parmi les objets qui peuplent le nanomonde, on peut dire que les nanoparticules en sont les "briques" de base. C'est à partir de ces "briques" de base que seront construits des matériaux et des dispositifs plus complexes. Les nanoparticules sont de diverses natures : agrégats moléculaires, nanoparticules colloïdales, nanotubes de carbone, nanofils, etc (2,3). On les distingue suivant leur forme, leur constitution, le ou les matériaux dont ils sont composés.

Le premier exemple qui va nous intéresser est celui des agrégats moléculaires. Un agrégat moléculaire est un amas de n atomes ou molécules, noté A_n où A représente un atome de la classification périodique ou une molécule. Suivant la valeur de n , l'agrégat peut être décrit soit comme une molécule, soit comme un petit morceau de solide. En étudiant la variation des propriétés physiques en fonction de n , on peut ainsi suivre l'évolution depuis l'atome (la molécule) jusqu'au solide massif. Ainsi, il est possible d'étudier l'apparition de la propriété de conduction métallique et ses conséquences sur les propriétés d'agrégats de métaux.

Les agrégats de sodium Na_n représentent un système modèle dans cette famille d'agrégats. A l'état solide, le sodium est un métal de

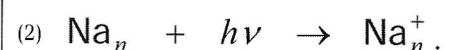
valence 1 : chaque atome fournit un électron de valence qui peut participer à la conduction de l'électricité. Il en est de même dans les agrégats de sodium, à la différence majeure près que dans ce cas, les électrons de valence restent confinés dans le volume de l'agrégat. Une représentation schématique d'un agrégat de sodium Na_n est donnée en figure 2. En première approximation, l'agrégat est représenté comme une sphère dans laquelle sont délocalisés les n électrons de valence de l'agrégat. Le rayon de la sphère est proportionnel à $n^{1/3}$, en d'autres termes le volume de la sphère est proportionnel à n le nombre d'atomes et s'écrit

$$(1) R = r_s n^{1/3} \Rightarrow V = \frac{4}{3} \pi R^3 = \left(\frac{4}{3} \pi r_s^3 \right) \times n$$

Le facteur de proportionnalité r_s est le rayon de Wigner-Seitz, le rayon de la sphère équivalente au volume occupé par un atome dans le solide. Il vaut environ 2,1 Å dans le cas du sodium. Pour fixer les idées, un agrégat de sodium contenant 1000 atomes a un rayon d'environ 2,1 nm.

La figure 3 représente le schéma d'un dispositif expérimental pour étudier les agrégats de sodium Na_n . Il est composé d'une source d'agrégats et d'un spectromètre de masse "à temps de vol". La source d'agrégats représentée sur la figure 3 est constituée d'un four dans lequel est chauffé du sodium solide. La vapeur de sodium est entraînée par un gaz porteur, en général de l'hélium ou de l'argon, vers une buse qui communique avec une enceinte à vide. Le mélange sodium et gaz porteur subit une détente adiabatique à la sortie de la buse ce qui entraîne le refroidissement du mélange et une condensation du sodium en gouttelettes qui grossissent par accréation d'atomes de sodium. La croissance s'arrête lorsque la densité de gaz devient trop faible. On obtient finalement un jet directif d'agrégats de sodium électriquement neutres. Ce jet est constitué d'agrégats de différentes tailles.

Pour analyser la distribution de taille des agrégats, on utilise un spectromètre de masse "à temps de vol". Les agrégats sont tout d'abord ionisés par un faisceau de lumière



Les agrégats chargés sont ensuite accélérés sous une différence de potentiel V_{acc} . En fin d'accélération, ils atteignent la zone dite de "vol libre" avec la vitesse :

$$(3) \quad \frac{1}{2}(nm_{Na})v(Na_n^+)^2 = eV_{acc} \Leftrightarrow v(Na_n^+) = \sqrt{\frac{2eV_{acc}}{m_{Na}}} \frac{1}{\sqrt{n}}$$

Les agrégats dérivent ensuite librement dans la zone de "vol libre" jusqu'au détecteur qu'ils atteignent au bout d'un temps

$$(4) \quad T(Na_n^+) = \frac{L}{v(Na_n^+)} = L \sqrt{\frac{m_{Na}}{2eV_{acc}}} \sqrt{n}$$

équation que l'on peut réécrire sous la forme simplifiée

$$(5) \quad T(Na_n^+) = T(Na^+) \sqrt{n}$$

En enregistrant le signal reçu par le détecteur en fonction du temps, on obtient une série de pics qui correspondent à "l'arrivée" sur le détecteur d'agrégats d'un nombre d'atomes n bien défini. Un exemple de spectre expérimental est présenté en figure 3. En mesurant l'aire de chaque pic, on obtient un spectre d'abondance, c'est-à-dire la population d'agrégats Na_n^+ en fonction de n . On peut ainsi remonter à la distribution de taille des agrégats neutres Na_n émis par la source.

En 1984, en mesurant le spectre d'abondance d'agrégats de sodium Na_n avec un dispositif expérimental similaire à celui de la figure 3, des chercheurs de l'Université de Berkeley (Californie) observèrent des irrégularités avec de brusques chutes d'intensité pour des nombres d'atomes (électrons) $n = 2, 8, 20, 40, 58, 92, 138$. Un des spectres expérimentaux obtenu par ces chercheurs est présenté en page 197 de la référence (3). Quelques années plus tard, un groupe de l'Institut Niels Bohr (Roskilde, Danemark) observa des irrégularités similaires pour des agrégats de quelques centaines d'atomes (figure 4 et référence (14)). De même, le potentiel d'ionisation, c'est-à-dire l'énergie à fournir pour arracher un électron d'un agrégat, présente également des chutes avec le nombre d'électrons n pour les mêmes valeurs de n que celles obtenues dans les spectres d'abondance (figure 4). En d'autres termes, certains agrégats semblent plus abondants et plus stables pour certains nombres d'atomes (électrons), les "nombres magiques" notés n_0 . En affectant des indices i (entiers) aux nombres magiques n_0 , on trouve d'après les résultats expérimentaux la loi empirique suivante

$$(6) \quad (n_0)^{1/3} \approx 0,604 \times i$$

En se rappelant que le rayon d'un agrégat est proportionnel à $n^{1/3}$, il en découle que les rayons des agrégats associés aux nombres magiques varient linéairement avec i . Le même type de comportement fut par ailleurs observé sur des agrégats d'autres métaux (alcalins, métaux nobles...). Ce surcroît de stabilité est lié à l'existence d'une structure en couches électroniques, une conséquence du confinement des électrons de valence dans les agrégats. La répartition des niveaux électroniques en fonction de l'énergie n'est pas uniforme mais présente des irrégularités : les niveaux se regroupent par paquets, les "couches", et sont séparés par

des zones d'énergie sans niveaux électroniques, les *gaps*. Ainsi, il est relativement moins coûteux en énergie d'arracher un électron à un agrégat ayant toutes ses couches électroniques occupées pleines plus un électron célibataire plutôt qu'à un agrégat ayant un atome (électron) de moins. Ce dernier cas correspond aux agrégats à nombres "magiques" d'atomes.

Cette structure en couches électroniques est similaire à ce qui est observé pour les atomes de la classification périodique de Mendeleïev. On peut en effet faire le parallèle entre le potentiel de première ionisation des atomes, qui présente une évolution en dents de scie avec le numéro atomique Z avec des maxima pour les atomes de gaz rares, et celle pour les agrégats de sodium où les maxima correspondent aux agrégats "magiques" (figure 4).

Il est possible de retrouver la séquence des nombres magiques par la résolution de l'équation de Schrödinger appliquée au système des n électrons de valence confinés dans un puits de potentiel correspondant à l'agrégat. Ces calculs rentrent dans le cadre de la théorie du problème à N -corps qu'il n'est possible de traiter que de manière approchée. La séquence des nombres magiques obtenus est néanmoins en très bon accord avec les valeurs expérimentales (3).

Une autre approche dite semi-classique permet de retrouver de manière approchée l'évolution des nombres magiques n_0 avec l'indice de couche i . Un tel modèle associe une approche classique à la mécanique quantique, un peu dans l'esprit du modèle de l'atome d'hydrogène proposé par Niels Bohr en 1913. Dans le cas des agrégats de sodium, on considère que les électrons de valence se déplacent en lignes droites dans le volume de l'agrégat et sont réfléchis par les parois. Ils décrivent des trajectoires polygonales fermées (3). Une approche fine montre que les trajectoires les plus probables pour les électrons sont des trajectoires triangulaires et carrées (figure 5) dont les longueurs respectives sont

$$L_{\Delta} = 3\sqrt{3}R \quad \text{et} \quad L_{\square} = 4\sqrt{2}R$$

soit en moyenne

$$\bar{L} \approx 5,43R \approx 11,4n^{1/3}$$

D'après le principe de Louis de Broglie (1924), on sait qu'à une particule de masse m et de vitesse v est associée une onde de longueur d'onde

$$(7) \quad \lambda = \frac{h}{mv}$$

Pour les électrons de valence dans le sodium, cette longueur d'onde dite longueur de Fermi λ_F , vaut environ 6,9 Å. Dans ce modèle, les nombres magiques correspondent aux tailles d'agrégats pour lesquelles les ondes associées aux électrons de valence sont stationnaires sur les trajectoires suivies par les électrons, c'est-à-dire

$$\bar{L} \approx \lambda_F \times i \quad \text{où } i \text{ est l'indice de couche. On obtient donc la relation suivante pour les nombres magiques } n_0$$

$$(8) \quad \bar{L} \approx 6,9 \times i \approx 11,4 \times (n_0)^{1/3} \Rightarrow (n_0)^{1/3} \approx 0,605 \times i$$

en très bon accord avec l'expérience. Ce modèle simple illustre l'importance des effets quantiques sur ces petits systèmes. Il peut être étendu aux agrégats d'autres métaux en prenant les paramètres adéquats.

Les agrégats de sodium que nous venons d'évoquer et les agrégats moléculaires d'une manière générale présentent un intérêt au point de vue fondamental, pour comprendre comment se fait la transition depuis l'atome jusqu'au solide. D'un point de vue pratique, ils ont en revanche peu d'intérêt. Ce sont en effet des particules très instables dans l'atmosphère ambiante du fait de la réactivité de leur surface. C'est pour cette raison qu'ils sont étudiés sous vide (figure 3).

Il est néanmoins possible de stabiliser des agrégats moléculaires ou des nanoparticules en recouvrant leur surface d'une couche de ligands (voir le schéma sur la figure 6). Ces ligands sont de petites molécules ayant à l'une de leurs extrémités une fonction chimique qui se fixe en surface des nanoparticules. Cette couche de ligands permet de stabiliser les nanoparticules à sec sous forme de nanopoudres, ou plus communément dans un liquide. On parle dans ce dernier cas de dispersion colloïdale. On synthétise ces nanoparticules colloïdales directement en solution par synthèse chimique. La référence (15) donne un aperçu de différentes voies de synthèse pour des nanoparticules à base de différents matériaux.

La figure 6 est une photo d'une dispersion colloïdale de nanoparticules d'or synthétisée par le chimiste et physicien britannique Michael Faraday (1791-1867). Si l'existence des colloïdes d'or est attestée depuis plusieurs siècles - au XVIII^e siècle, on appelait ces solutions "or potable" - c'est Michael Faraday qui en fit en 1857 une étude détaillée (16). Il compara ainsi les propriétés optiques de dispersions colloïdales de nanoparticules d'or obtenues par réduction de sels d'or avec celles de dépôts formés par "déflagration" de fils d'or avec une bouteille de Leyde¹. Il arriva à la conclusion que dans les différents cas, l'or devait être divisé en très petites particules qui étaient à l'origine de la couleur rubis si particulière des solutions et des dépôts (figure 6) : « *The state of division of*

these particles must be extreme ; they have not as yet been seen by any power of the microscope »² (16).

A l'époque des travaux de Faraday, les microscopes ne permettaient pas d'observer directement les nanoparticules d'or. Ce n'est qu'avec le développement du microscope électronique à transmission (MET) au XX^e siècle qu'elles ont pu être observées directement. La figure 7 présente ainsi une image de nanoparticules d'or de 5 nm de diamètre. Une question qui se pose est l'origine physique de la couleur des solutions colloïdales de nanoparticules d'or telles celles obtenues par Faraday (figure 6). Cette couleur est liée à une bande d'absorption (figure 7a) appelée "résonance plasmon" ou "résonance de Mie" (3). La résonance plasmon correspond à une oscillation collective des électrons de conduction de la nanoparticule par rapport au réseau des ions, sous l'influence du champ électrique de la lumière d'excitation (schéma sur la figure 7).

Le physicien allemand Gustav Mie donna une explication théorique à ce phénomène en 1908 (17). Dans sa théorie, il distingue deux régimes en fonction du diamètre des nanoparticules.

Pour des diamètres supérieurs à 20 nm, le champ électrique incident, dans la gamme du visible, n'est pas spatialement homogène dans tout le volume de la nanoparticule. En conséquence, les électrons de conduction ne voient pas tous le même champ électrique à un instant donné et n'oscillent donc pas tous en phase. La réponse est une somme de contributions dipolaires, quadrupolaires et d'ordres supérieurs. Il en résulte que la position spectrale de la résonance plasmon se décale "vers le bleu", c'est-à-dire vers les courtes longueurs d'onde, lorsque le diamètre des nanoparticules diminue. A noter que cette dépendance en taille est un effet purement classique.

Pour des diamètres inférieurs à 20 nm, le champ électrique incident peut être considéré comme spatialement homogène dans tout le volume de la nanoparticule et les électrons de conduction oscillent tous en phase. La réponse est uniquement dipolaire, comme schématisé sur la figure 7b. Dans ce cas, la section efficace d'absorption d'une nanoparticule - une grandeur homogène à

une surface et qui caractérise l'absorption de lumière par la nanoparticule - est donnée par la relation

$$(9) \sigma(\omega) = \frac{9V\epsilon_m^{3/2}}{c} \frac{\omega\epsilon_2(\omega)}{[\epsilon_1(\omega) + 2\epsilon_m]^2 + \epsilon_2(\omega)^2}$$

où V est le volume de la nanoparticule, c la vitesse de la lumière, ϵ_m la constante diélectrique relative du milieu environnant la nanoparticule et $\epsilon(\omega) = \epsilon_1(\omega) + i\epsilon_2(\omega)$ la fonction diélectrique du métal. Dans ce dernier cas, la fonction diélectrique est une fonction complexe qui dépend de la fréquence. La résonance plasmon correspond à la condition

$$(10) \epsilon_1(\omega_M) = -2\epsilon_m$$

pour laquelle une très forte absorption est observée.

On note dans la relation (9) qu'il n'y a pas de dépendance en taille si on prend pour $\epsilon(\omega)$ la fonction diélectrique du métal sous forme macroscopique, ce qui n'est qu'une approximation. Une dépendance en taille vient du fait que la valeur de $\epsilon(\omega)$ pour la nanoparticule peut différer de celle du solide. D'autres effets purement quantiques interviennent. Un effet important est que le nuage des électrons de conduction peut déborder légèrement du volume de la nanoparticule défini par les ions ce qui entraîne que la densité électronique dans la nanoparticule est inférieure à celle dans le solide massif et va varier aussi avec la taille de la nanoparticule. Un autre effet est que sous l'effet du champ électrique, les électrons dits "de cœur" peuvent aussi être légèrement polarisés. Le lecteur intéressé pourra trouver une discussion plus détaillée sur ces différents points dans la référence (3).

Ce phénomène de résonance plasmon n'est pas spécifique aux nanoparticules d'or mais s'observe pour de nombreux métaux. Il peut être mis à profit pour filtrer la lumière en dispersant par exemple les nanoparticules dans une matrice de verre ou en les déposant sur un

¹ La bouteille de Leyde est en fait un condensateur mis au point à Leyde en 1745 par le physicien hollandais Pieter Van Musschenbroek avec lequel il était possible de créer de violentes décharges électriques.

² « L'état de division de ces particules doit être extrême ; elles n'ont jusqu'alors pas pu être observées à l'aide d'un microscope ».

substrat. Quelques exemples seront présentés dans la section suivante. Dans le cas de nanoparticules de semiconducteurs, on a un tout autre comportement dominé par les effets quantiques. On parle dans ce cas de nanocristaux semiconducteurs fluorescents ou *quantum dots* en anglais. Ils peuvent être à base de matériaux semiconducteurs purs (Si,...) ou de semiconducteurs composés de type II-VI (CdSe, ...), III-V (GaAs,...).

S'il est possible de préparer de telles nanoparticules sous forme d'agrégats moléculaires pour s'affranchir des ligands, c'est sous forme de dispersions colloïdales qu'ils sont le plus communément étudiés.

De telles solutions de nanocristaux présentent des propriétés optiques qui dépendent de la taille des nanocristaux. Sous éclairage ultra-violet, les nanocristaux émettent une lumière de fluorescence dont la "couleur" est fonction de la taille du nanocristal (figure 8). Un exemple est présenté sur la figure 8 dans le cas de nanocristaux sphériques de CdSe : lorsque le diamètre des nanocristaux diminue, le seuil du spectre d'absorption et la raie de fluorescence se décalent vers le bleu. Ce décalage est une conséquence du "confinement quantique" (2).

À l'état massif, un semiconducteur non dopé présente une bande de valence (BV), pleine, et une bande de conduction (BC), vide, séparées par une bande interdite, le *gap*, de largeur E_g . Par excitation lumineuse avec des photons d'énergie $h\nu_{exc} \geq E_g$, on peut transférer un électron de la BV à la BC et créer une vacance (un trou) dans la BV. La fluorescence correspond à la recombinaison radiative de cette paire électron-trou (ou exciton) par émission d'un photon d'énergie $h\nu_{fluor} \geq E_g$, l'excès d'énergie $h\nu_{fluor} - h\nu_{exc}$ étant évacué sous forme de chaleur. La fluorescence est d'autant plus probable que la température est faible et que le semiconducteur présente peu de défauts de structure. Du fait du nombre fini d'atomes et du confinement quantique, les bandes d'énergie d'un nanocristal se scindent en niveaux discrets dont l'écart augmente lorsque que le rayon r du nanocristal diminue. C'est en particulier le cas des niveaux qui déterminent le *gap* (figure 9a). En première approximation, le *gap* E_g de nanocristaux sphériques est donné par la formule ci-dessus :

$$(11) \quad E_g = E_g^{solide} + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2r^2} \left(\frac{1}{m_e^* m_e} + \frac{1}{m_h^* m_e} \right) - \frac{1,8e^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}$$

Dans cette formule :

- Le premier terme E_g^{solide} correspond au *gap* du cristal massif ;

- Le deuxième terme en $1/r^2$ dit de "confinement quantique" est calculé dans l'hypothèse d'un nanocristal sphérique où sont confinés un électron et un trou de masses effectives respectives m_e^* et m_h^* (paramètres sans dimension), m_e étant la masse de l'électron ($m_e = 9,1 \times 10^{-31}$ kg) et \hbar le quantum de moment cinétique ($\hbar = 1,0546 \times 10^{-34}$ J.s) ;

- Le dernier terme correspond à l'attraction coulombienne entre l'électron et le trou, ϵ (sans dimension) étant la permittivité diélectrique statique du matériau relative à celle du vide ϵ_0 ($\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ F.m⁻¹).

Le confinement quantique entraîne une augmentation du *gap*, lorsque r diminue, d'autant plus marquée que r est faible (variation en $1/r^2$). La Formule (11) permet d'évaluer E_g pour des nanocristaux de différents semiconducteurs à partir des paramètres du solide massif (figure 9b). Sous excitation lumineuse appropriée, les nanocristaux peuvent ré-émettre par fluorescence des photons d'énergie égale au *gap*. Avec différents semiconducteurs, on couvre ainsi une large gamme d'énergies de *gap*, soit une gamme spectrale allant du proche infrarouge au proche ultraviolet.

Les physiciens s'intéressent à ces nanocristaux semiconducteurs depuis maintenant une vingtaine d'années. La mise au point dans les années 1990 de techniques de synthèse chimique performantes et sélectives en taille a permis des avancées significatives dans le domaine (15). Il est désormais possible de contrôler non seulement la taille mais également la morphologie des nanocristaux (figure 10). On s'intéresse désormais à la fonctionnalisation chimique des nanocristaux pour les rendre compatibles avec différents milieux et les greffer à d'autres nano-objets. Les applications sont nombreuses avec entre autres le marquage fluorescent en biologie, le traçage ou comme

composants de nouveaux matériaux pour le photovoltaïque. Certaines applications seront évoquées plus loin dans cet article.

La dernière famille de nano-objets à laquelle nous allons nous intéresser est celle des nanotubes de carbone. Ces derniers ont été découverts en 1991 par le physicien japonais Sumio Iijima (5). La famille des formes cristallines connues du carbone était jusqu'en 1985 limitée au graphite et au diamant. Mais en 1985, des chercheurs découvrirent le C60, une molécule cage sphérique constituée d'un arrangement de 60 atomes de carbone de haute symétrie (3). Cette découverte fut récompensée par le Prix Nobel de Chimie en 1996. Le C60 est la molécule la plus connue de la famille des fullerènes. En 1991, en étudiant au microscope électronique des sous-produits de synthèse de fullerènes, Sumio Iijima observa des structures tubulaires creuses de diamètre nanométrique mais dont la longueur pouvait atteindre le micron : les nanotubes de carbone (5).

La figure 11a présente le schéma d'un nanotube de carbone. C'est en fait un monofeuillet de graphite (appelé aussi graphène) enroulé sur lui-même et fermé à ses deux extrémités par deux demi-fullerènes. En fonction du pas d'enroulement caractérisé par deux indices entiers n et m appelés indices chiraux - ces indices correspondent aux coordonnées du vecteur d'enroulement dans le plan du feuillet de graphène - on obtient différentes structures : nanotubes "zigzag" pour $m = 0$, "armchair" pour $n = m$ et "chiraux" dans les autres cas (2,3).

La figure 11a est une représentation d'un nanotube monoparoie, SWNT en abrégé d'après l'anglais *single-walled nanotube*. Mais la synthèse n'est pas toujours sélective et on obtient également des nanotubes multiparoies ou MWNT (*multi-walled nanotube*) qui contiennent plusieurs nanotubes concentriques imbriqués à la manière de poupées russes. La figure 11b présente une image par microscopie électronique à transmission d'une section transversale d'un nanotube multiparoie. Dans la synthèse, les nanotubes se regroupent

aussi en faisceaux. La figure 11c est une image par microscopie à balayage de tels faisceaux de nanotubes.

Les nanotubes de carbone ont des propriétés étonnantes (2,3). Ce sont par exemple des structures 6 fois plus légères que l'acier tout en ayant une résistance mécanique supérieure 6 à 7 fois supérieure. Concernant les propriétés électroniques, les nanotubes monoparoies sont métalliques si $(n-m)$ est multiple de trois et semi-conducteurs (avec un *gap* d'énergie) dans le cas contraire. Du fait du confinement quantique, le *gap* d'énergie varie de manière inverse avec le diamètre du nanotube. Il est possible d'obtenir des jonctions intramoléculaires au sein d'un même nanotube qui associent une partie métallique avec une partie semiconductrice. Les laboratoires de recherche et l'industrie de la micro-électronique s'intéressent ainsi aux nanotubes de carbone comme substitués au silicium pour réaliser des circuits intégrés avec des composants de taille nanométrique.

Quelques exemples du passé d'applications des nanoparticules

Quand on parle de nanosciences et de nanotechnologies, cela évoque en général la révolution scientifique et technologique annoncée pour le XXI^e siècle, fruit de l'avancée du savoir et des techniques accumulées au cours du siècle précédent. On ignore de fait que nos ancêtres s'interrogeaient déjà sur la matière lorsqu'elle est finement divisée et qu'en parallèle des artisans ont produit, en général sans le savoir, des nanomatériaux qui leur permettaient d'obtenir des effets visuels particuliers en verrerie ou en céramique, et ce depuis l'époque romaine. Voici quelques exemples pour illustrer ce propos.

Le premier concerne l'usage de nanoparticules métalliques (or, argent, cuivre,...) pour teinter du verre dans la masse. Lorsque des nanoparticules d'or de tailles différentes sont dispersées dans une matrice de verre, elles agissent comme un filtre en absorbant une partie de la lumière du spectre visible du fait de la résonance plasmon évoquée plus haut. Il en résulte une teinte du verre spécifique de la taille et de la composition des nanoparticules. Un exemple célè-

bre est la coupe romaine dite "de Lycurgue", datée du IV^e siècle après J.C. et conservée actuellement au British Museum à Londres (18). La coupe est faite de "verre rubis" qui contient des nanoparticules d'or d'une taille inférieure à 20 nm ce qui donne une teinte rouge à la coupe lorsqu'on l'observe en transmission, en plaçant une source de lumière à l'intérieur. A noter, que lorsque la coupe est éclairée par une source lumineuse située à l'extérieur de la coupe, elle apparaît verte, ce qui en fait un des premiers exemples connus de verre dichroïques.

Le procédé de fabrication consiste à introduire dans la composition du verre des sels métalliques. La pâte de verre est d'abord cuite vers 1400°C puis subit une trempe rapide pour atteindre la température ambiante: le verre est alors incolore. Ce n'est que lors d'un recuit vers 500-700°C que les atomes de métaux contenus dans le verre s'agglomèrent en nanoparticules (19). Toute la difficulté consiste à contrôler la taille de ces nanoparticules qui détermine la teinte du verre. Il est remarquable de penser que dès l'époque romaine, les verriers avaient atteint un degré de maîtrise suffisant pour obtenir des objets de la qualité de la coupe de Lycurgue. Ce procédé a par ailleurs été utilisé à l'époque médiévale pour obtenir certaines teintes de rouge dans les vitraux d'église ou de cathédrales (20). Ainsi, les verres rouge et jaune d'or des vitraux de la Sainte-Chapelle à Paris (XIII^e siècle) tirent-ils leur coloration de nanoparticules respectivement de cuivre et d'argent (21). Il est donc probable qu'il en soit de même pour les vitraux du déambulatoire de la cathédrale de Clermont-Ferrand qui proviendraient du même atelier que ceux de la Sainte-Chapelle. A noter que ce procédé de coloration du verre par des nanoparticules est toujours utilisé pour la verrerie d'art (figure 12).

Une autre application est l'usage d'or colloïdal ou "pourpre de Cassius" pour la décoration de céramiques depuis le XVIII^e siècle (22). Le pourpre de Cassius est un colloïde contenant une dispersion de nanoparticules d'or agglomérées avec de l'oxyde d'étain SnO₂. Il est préparé par dissolution de poudre d'or dans de l'eau régale (un mélange d'acides chlorhydrique et nitrique). En ajoutant de l'étain et en

chauffant la solution, l'or précipite sous forme de nanoparticules et on obtient ainsi une solution rouge dont la teinte précise dépend de la taille des nanoparticules pour les raisons évoquées plus haut. La découverte du pourpre de Cassius est attribuée au médecin Andréas Cassius au XVII^e siècle et fut publiée par son fils dans le livre *De Auro* (Leyde, 1685) mais ce n'est que bien plus tard que la structure de ce colloïde fut comprise par le chimiste autrichien Richard Zsigmondy (1865 – 1929), prix Nobel de chimie en 1925. Il étudia le pourpre de Cassius à l'aide d'un ultramicroscope, un appareil qu'il avait spécialement développé pour l'étude des colloïdes (23).

Le pourpre de Cassius fut utilisé pour la décoration de porcelaines dès le début du XVIII^e siècle à la manufacture de Meissen en Allemagne. Il permettait d'obtenir toute une palette de roses et de rouges. La couleur était appliquée sur la porcelaine cuite et recouverte d'un émail (ou "couverte") puis fixée à une température plus faible car elle ne résiste pas aux températures de cuisson de la porcelaine : c'est la technique dite du "petit feu". L'utilisation du pourpre de Cassius en céramique se répandit en Europe et arriva en France vers le milieu du XVIII^e siècle où il fut notamment utilisé à la Manufacture de Sèvres et dans de grands centres faïenciers comme Strasbourg, Marseille et Sceaux (22). Il fut par ailleurs introduit en Chine par les jésuites où il fut abondamment utilisé à partir de 1723 pour décorer les porcelaines dites de la "famille rose". Le plat en faïence du XVIII^e siècle provenant d'une manufacture marseillaise et conservé au musée des Beaux-arts à Vienne en Isère (figure 13) est un bel exemple d'utilisation du pourpre de Cassius. Les teintes rouge et rose des pétales de fleurs ont été obtenues grâce à ce colorant. L'usage du pourpre de Cassius nécessitait néanmoins une grande maîtrise technique et était donc réservé aux grands centres faïenciers. Il est toujours utilisé dans certaines manufactures de porcelaines (Sèvres, Meissen,...).

Un dernier exemple d'usage de nanomatériaux toujours dans le domaine de la céramique est le décor dit de lustre métallique (24,25). Ce décor

donne des effets visuels variables suivant l'angle d'observation avec pour certaines directions une apparence métallique imitant l'or ou encore rouge, verte, violette ou bleue. Cette apparence est due à la présence de nanoparticules colloïdales d'argent et de cuivre en proportions variables dans la matrice vitreuse de la glaçure qui recouvre la céramique. C'est l'interaction de la lumière avec ces nanoparticules qui donne ces effets optiques si particuliers. La technique du lustre métallique fut découverte en Irak au IX^e siècle après J.C. et fut utilisée depuis lors dans le monde arabe en verrerie et pour les céramiques. Elle connut un grand succès car elle permettait d'obtenir une vaisselle aux reflets dignes de celle d'or et d'argent à un coût en apparence moindre, car c'était une technique très délicate réservée à des ateliers qualifiés. Elle fut introduite par les arabes en Espagne au XII^e siècle et se développa après la reconquête dans la région de Valence où elle fut utilisée jusque dans le courant du XX^e siècle. D'Espagne, la technique parvint en Italie où elle fut utilisée aux XV^e et XVI^e siècles pour décorer les majoliques produites dans les centres céramiques d'Italie centrale. La décoration de lustre métallique peut être monochrome ou polychrome pour les pièces les plus prestigieuses. Le plat hispano-mauresque présenté en figure 14 est un bel exemple des effets visuels qu'il est possible d'obtenir avec cette technique de décoration.

Plus récemment, des chercheurs allemands ont montré que l'acier des sabres dits de Damas, utilisés par les guerriers arabes notamment contre les croisés, contenait des nanotubes de carbone (26). Ceci serait lié à la technique de forge utilisée par les artisans arabes et pourrait être en partie à l'origine des excellentes propriétés mécaniques de ces aciers. En conclusion, ces exemples nous montrent certaines possibilités des nanomatériaux que surent exploiter des artisans des siècles passés pour obtenir des effets décoratifs particuliers. Bien sûr, ces artisans ignoraient qu'ils manipulaient déjà des nanomatériaux même si certains en eurent l'intuition notamment dans le cas du pourpre de Cassius. La compréhension des phénomènes ne viendra que plus tard avec les

travaux précurseurs de Michael Faraday sur les colloïdes d'or (1857) et ceux qui s'ensuivront (16).

Quelques exemples actuels d'applications des nanoparticules

Après avoir passé en revue quelques unes des applications anciennes des nanoparticules, voici maintenant quelques exemples d'applications récentes de ces mêmes objets. La différence principale est que dans ce dernier cas, ces applications tirent parti des propriétés spécifiques des nanoparticules en toute connaissance de cause. Les domaines d'applications des nanoparticules sont très variés et cet article ne prétend pas en donner une vue exhaustive. Le lecteur intéressé pourra consulter des publications récentes sur le sujet (1-3).

Un premier exemple la biologie. Le marquage fluorescent d'objets biologiques par des fluorophores est une méthode d'analyse courante en biologie et en biotechnologies (biopuces,...). Ces fluorophores peuvent, par exemple, permettre d'imager des cellules pour étudier leur fonctionnement, visualiser des tumeurs cancéreuses *in vivo* ou servir de révélateur dans l'analyse d'échantillons (sang, sérum,...) sur puces à ADN. De manière standard, on emploie des fluorophores organiques (phycoérythrine, cyanine, alexafluor,...). Ceux-ci présentent néanmoins un certain nombre d'inconvénients essentiellement une bande d'absorption étroite et proche de la raie de fluorescence et un photoblanchiment (perte de fluorescence) rapide en quelques dizaines de secondes ou quelques minutes, au mieux, sous éclairage continu. Ceci impose de sévères limitations pour des applications nécessitant un marquage multiple (une source d'excitation par fluorophore) ou un suivi sur des temps longs. A tout cela, les nanocristaux semiconducteurs fluorescents apportent une alternative avantageuse : leur bande d'absorption est large, ce qui permet d'exciter différents nanocristaux avec une même source d'excitation ; ils sont très robustes au photoblanchiment sur des durées allant jusqu'à plusieurs heures. Tout ceci explique l'engouement pour les nanocristaux en tant que marqueurs pour la biologie depuis les premières publications sur le sujet en 1998.

Les nanocristaux ont été ainsi utilisés pour imager différents types de cellules *in vitro*. Suivant les biomolécules auxquelles ils sont conjugués, les nanocristaux se fixent sur la membrane cellulaire ou sont internalisés dans la cellule et ciblent des composants du cytoplasme ou du noyau. Un exemple de marquage de cellules neuronales est présenté sur la figure 15 (27). Les nanocristaux sont également envisagés comme marqueurs pour de l'imagerie optique *in vivo* de tumeurs, tissus, etc. Par micro-injection de nanocristaux dans une cellule d'un embryon de xénope (une espèce africaine de grenouille) à un stade très précoce, des chercheurs ont suivi le développement des embryons jusqu'au stade de têtard (28). Plus récemment, des chercheurs américains ont utilisé des nanocristaux fluorescents comme "marqueurs" pour la mise en oeuvre de la technique dite du "ganglion lymphatique sentinelle", une méthode de détection utilisée en cancérologie notamment dans le cas du cancer du sein (29). La technique consiste à injecter dans une tumeur des marqueurs qui vont parcourir en quelques minutes le système lymphatique et se concentrer dans les premiers ganglions qui drainent la tumeur, les "ganglions sentinelles". Le prélèvement et l'analyse de ces ganglions renseigne sur l'état de dissémination de la tumeur. L'opération a été réalisée sur des souris et sur des cochons du Yorkshire, des animaux d'un poids d'environ 35 kg proche de celui de l'homme. Ces travaux ouvrent la voie à l'utilisation des nanocristaux en cancérologie sur l'homme, sous réserve que les questions de toxicité soient réglées.

Les applications en biologie mentionnées ci-dessus font en général usage d'un grand nombre de nanocristaux. Une autre application concerne l'utilisation d'un nanocristal semiconducteur fluorescent **unique** comme nanosource de lumière pour de la microscopie optique de champ proche (*Scanning Near field Optical Microscopy* ou SNOM en anglais). Dans une variante de cette technique, une pointe optique excitée par une source lumineuse est positionnée à quelques nanomètres d'un échantillon pour l'éclairer en champ proche. La lumière diffusée ou réémise par l'échantillon est ensuite

collectée en champ lointain. Ceci permet d'obtenir une image dont la résolution dépend directement de l'ouverture de la pointe, alors qu'avec un microscope optique classique, la résolution est limitée par la diffraction à quelques centaines de nanomètres. Les pointes utilisées en microscopie optique de champ proche sont obtenues par l'amincissement d'une fibre optique, dont l'extrémité est étirée ou attaquée chimiquement, puis métallisée sur les côtés. A l'heure actuelle, il est impossible de fabriquer de manière reproductible des pointes d'ouverture inférieure à la centaine de nanomètres, ce qui limite la résolution d'autant.

En collaboration avec l'équipe de Serge Huant du Laboratoire de Spectrométrie Physique (CNRS/Université Joseph Fourier), nous avons mis au point un procédé pour améliorer la résolution des microscopes optiques de champ proche (figure 16): il s'agit d'implanter des nanocristaux fluorescents à l'extrémité de la pointe en déposant une fine couche de polymère transparent (PMMA) dopée avec une très faible concentration de nanocristaux (30,31). Ceux situés dans l'ouverture de la pointe sont excités par une lumière laser à 458 nm transmise par la fibre et réémettent une lumière de fluorescence qui dépend de leur taille et de leur morphologie. Les nanocristaux jouent donc le rôle de "nano-sources de lumière" qui permettent d'illuminer localement l'échantillon analysé. L'ensemble pointe-nanocristaux constitue ce qu'on appelle une sonde active. Théoriquement, cette méthode doit permettre d'obtenir une résolution spatiale de l'ordre de la taille du nanocristal, soit environ une dizaine de nanomètres.

Pour caractériser les sondes actives ainsi réalisées, l'extrémité de la pointe est placée dans un montage confocal et l'émission de lumière sous excitation est analysée temporellement et spectralement (figure 17a). Les nanocristaux sont connus pour être sujets au "scintillement" ou "clignotement", c'est-à-dire qu'ils passent de manière apparemment erratique d'un état émissif "On" à un état non émissif "Off", sans échelle de temps caractéristique. Ce phénomène n'est observable que dans le cas d'objets uniques ou d'agrégats de

très petite taille ; un ensemble statistique de nanocristaux donnerait en effet un signal moyenné. Les traces temporelles de la lumière émise en bout de la sonde active (figure 17b) montrent l'existence d'un "scintillement", preuve qu'un très petit nombre de nanocristaux, typiquement moins d'une dizaine, sont implantés à l'extrémité de la pointe. La prochaine étape est d'utiliser ces sondes actives en configuration SNOM sur des échantillons tests et de vérifier le gain en résolution attendu. On aura alors une véritable "nano-source de lumière" rapportée sur un support macroscopique, ce qui ouvre de nombreuses perspectives pour le champ proche optique.

Enfin une dernière application concerne l'utilisation de nanotubes de carbones comme émetteurs d'électrons pour de nouvelles générations d'écrans plats (32). Les nanotubes sont en effet des objets dont le rapport d'aspect (rapport de la longueur sur le diamètre) peut atteindre plusieurs milliers. Si des nanotubes sont soumis à un champ électrique, le champ local à l'extrémité du nanotube est amplifié par un facteur d'autant plus grand que le rapport d'aspect est élevé. Lorsque les nanotubes sont placés dans une structure en triode et avec une tension de grille raisonnable (figure 18), le champ local à l'extrémité des nanotubes peut être suffisant pour avoir l'émission d'électrons par effet de champ. Ces électrons interagissent avec un luminophore recouvrant l'anode ce qui permet d'obtenir l'émission de lumière.

Le marché visé est celui d'écrans plats de grande taille pour la télévision. Des travaux sont réalisés au Laboratoire d'électronique et de technologie de l'Information (LETI) du CEA Grenoble pour intégrer des nanotubes dans des structures d'écrans facilement réalisables sur de grandes surfaces. La figure 19 (haut) montre une image obtenue avec le premier écran vidéo monochrome réalisé avec cette technologie. L'écran a une diagonale de 6 pouces (environ 15 cm) et une résolution de 320 x 240 pixels. La figure 19 (bas) est une image de microscopie électronique à balayage montrant une partie de la cathode avec un amas de nanotubes. Ceux-ci sont disposés en plots de $5 \times 10 \mu\text{m}^2$

localisés entre les grilles de commandes. Les plots sont répartis en tranchées d'environ $12 \mu\text{m}$ de large et $280 \mu\text{m}$ de long. La taille totale d'un pixel qui comprend plusieurs tranchées est de $350 \mu\text{m}$. D'autres sociétés dans le monde développent des technologies d'écrans plats à base de nanotubes et ceux-ci pourraient apparaître sur le marché d'ici quelques années.

CONCLUSION

Même si il existe déjà des applications commerciales des nanosciences et des nanotechnologies, on peut considérer que ce sont là des domaines de recherche encore relativement "jeunes". On redécouvre néanmoins avec les outils actuels que nos ancêtres ont parfois été des nanotechnologues qui s'ignoraient et que ce que l'on croit être nouveau ne l'est pas forcément toujours. La grande différence est que le développement actuel se fait en connaissance de cause, un développement qui résulte de la convergence entre physique, chimie et biologie et l'ingénierie.

Beaucoup d'attentes sont portées sur les nanotechnologies notamment en termes de retombées économiques, à la hauteur des investissements réalisés. Ces nouvelles technologies soulèvent aussi beaucoup d'interrogations sur les bénéfices réels que la société en retirera et les nouveaux risques qui pourraient en résulter. Vu que l'histoire des nanotechnologies est en train de s'écrire, il est difficile de répondre à ces différents points. Le futur nous dira ce qu'il en est.

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie ses collègues du DRFMC (CEA Grenoble) et ceux de l'Institut Niels Bohr à Copenhague qui sont associés à certains des travaux présentés dans cet article. L'auteur remercie par ailleurs M. Serge Huant et collaborateurs (Université Joseph Fourier, Laboratoire de Spectrométrie Physique), M. Jean Dijon (CEA Grenoble, LETI), M. Didier Grünwald et M. Alain Dupuis (CEA Grenoble, DSV/DRDC) le Professeur Frank James (Royal Institution of Great Britain), M. Lauxerois et Mme Durand (Musées de Vienne, Isère) et M. Belhorma (CCSTI La Casemate, Grenoble).

BIBLIOGRAPHIE :

- (1) J.L. Pautrat : « *Demain le nanomonde : voyage au coeur du minuscule* », Librairie Arthème, Fayard (2002).
- (2) « *Le nanomonde: de la science aux applications* », Clefs du CEA N°52 (2005) - Pour les demandes d'abonnement, consulter l'adresse www.cea.fr/fr/actualites/publications.htm.
- (3) M. Lahmani, C. Dupas et P. ; Houdy : « *Les nanosciences I : nanotechnologies et nanophysique* », Belin, Collection Echelles (2004).
- (4) P.A. Buffat et J.P. Borel : « *Size effect on the melting temperature of gold particles* », Physical Review A, vol. 13, p. 2287 - 2298 (1976).
- (5) S. Iijima : « *Helical microtubules of graphitic carbon* », Nature, vol. 354, p. 56 - 58 (1991).
- (6) A. Hull Mann: « *Who is winning the global nanorace ?* », Nature Nanotechnology, vol. 1, p. 81 - 83 (2006).
- (7) www.minatec.com
- (8) L. Laurent et J.C. Petit: « *Les nanotechnologies doivent elles nous faire peur ?* », Collection Les petites pommes du savoir, Editions le Pommier (2005).
- (9) www.piecesetmainoeuvre.fr
- (10) M. Crichton : « *La proie* », collection Best Sellers, Robert Laffont (2003).
- (11) « *Nanoscience and nanotechnologies : opportunities and uncertainties* », Rapport de la Royal Society et de la Royal Academy of Engineering, juillet 2004, disponible sur www.nanotec.org.uk/finalReport.htm
- (12) « *Nanotechnologies, nanoparticules : quels dangers, quels risques ?* », Rapport du Comité de la prévention et de précaution, 2006, disponible sur www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/Nanotechnologies_juin_2006.pdf.
- (13) B. Hervé-Bazin : « *Nanoparticules, prudence !* », La Recherche, janvier 2007, p. 78 - 81.
- (14) F. Chandezon, S. Bjørnholm, J. Borggreen et K. Hansen: « *Electronic shell energies and deformations in large sodium clusters from evaporation spectra* », Physical Review B, vol. 55, p. 5485-5490 (1997).
- (15) C. Burda, X. Chen, R. Narayanan et M.A. El-Sayed : « *Chemistry and properties of nanocrystals of different shapes* », Chemical Reviews, vol. 105, p. 1025-1102 (2005).
- (16) M. Faraday: « *Experimental relations of gold (and other metals) to light* », Philosophical Transactions of Royal Society of London, vol. 147, p. 145-181, 1857.
- (17) G. Mie: « *Beiträge zur optik medien, speziell kolloidaler metallösungen* », Annalen der Physik, vol. 25, p. 329-445 (1908).
- (18) <http://www.thebritishmuseum.ac.uk/compass/>
- (19) F.E. Wagner, S. Haslbeck, L. Stievano, S. Calogero, Q.A. Pankhurst et K.P. Martinek: « *Before striking gold in gold-ruby glass* », Nature, vol. 407, p. 691-692 (2000).
- (20) R. Jouanisson « *Les verres colorés et leur histoire* », in « *Couleurs* », Auvergne Sciences, p 19-24, juin 2001.
- (21) P. Colombar: « *La Sainte-Chapelle au laser* », La Recherche, N°398, p. 68-73 (juin 2006).
- (22) A. Faÿ-Hallé et C. Lahaussais : « *Le grand livre de la faïence française* », Office du Livre, Fribourg (1986).
- (23) R. Zsigmondy: « *Properties of colloids* », conference Nobel, 11 décembre 1926.
- (24) P. Ball : « *Lessons from early chemists-Where is there wisdom to be found in ancient materials chemistry* », MRS Bulletin, vol. 30, p. 149, mars 2005.
- (25) J. Pérez-Arategui, J. Molera, A. Larrea, T. Pradell, M. Vendrell-Saz, I. Borgia, B.G. Brunetti, F. Cariati, P. Fermo, M. Mellini, A. Sgamellotti et C. Viti: « *Luster pottery from the thirteenth century to the sixteenth century : a nanostructured thin metallic film* », J. Am. Ceram. Soc., vol. 84, p. 442-446 (2001).
- (26) M. Reibold, P. Paufler, A.A. Levin, W. Kochmann, N. Pätzke et D.C. Meyer: « *Carbon nanotubes in ancient Damascus sabre* », Nature vol. 444, p. 286 (2007).
- (27) N. Charvet, P. Reiss, A. Roget, A. Dupuis, D. Grünwald, S. Carayon, F. Chandezon, T. Livache: « *Biotinylated CdSe/ZnSe nanocrystals for specific fluorescent labeling* », Journal of Materials Chemistry vol. 14, p. 2638-2642 (2004).
- (28) B. Dubertret, P. Skourides, D.J. Norris, V. Noireaux, A.H. Brivanlou et A. Libchaber : « *In vivo imaging of quantum dots encapsulated in phospholipid micelles* » Science, vol. 298, p. 1759-1762 (2003).
- (29) S. Kim et al.: « *Near-infrared fluorescent type II quantum dots for sentinel lymph node mapping* », Nature Biotechnology vol. 22, p. 93-97 (2004).
- (30) N. Chevalier, M.J. Nasse, J.C. Woehl, P. Reiss, J. Bleuse, F. Chandezon et P. Reiss : « *CdSe single-nanoparticle based active tips for near-field optical microscopy* » Nanotechnology vol. 16, p. 613-618 (2005).
- (31) N. Chevalier: « *Sondes actives à base d'un nanocristal semiconducteur unique pour l'optique en champ proche : concept et réalisation* », thèse de doctorat, soutenue le 25 mars 2005 à l'Université Joseph Fourier Grenoble I (spécialité : physique).
- (32) J. Dijon : « *Les nanotubes, canons à électrons à usages multiples* », Clefs du CEA N°52, p. 113-115 (2005).

Figures :

Figure 1 : Echelle situant le domaine des nanosciences et du "nanomonde" par rapport au monde du vivant (échelle du haut) et aux produits manufacturés (échelle du bas). La limite de taille supérieure du domaine des nanosciences et des nanotechnologies est fixée à 100 nm. Une particule ou un composant relève des nanosciences lorsqu'au moins une de ses dimensions est inférieure à cette limite de 100 nm. Photo extraite du N°189 du Journal du CNRS.

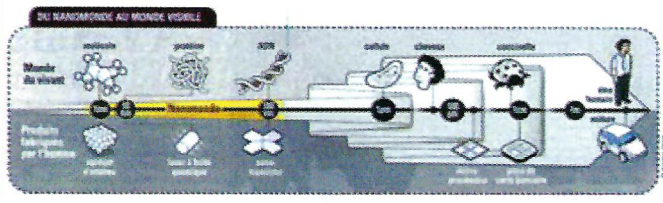


Figure 2 : Représentation schématique d'un agrégat de sodium Na_n .

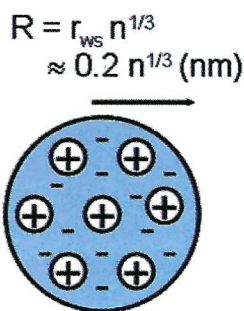


Figure 3 : Schéma d'un dispositif expérimental pour l'étude d'agrégats de sodium Na_n .

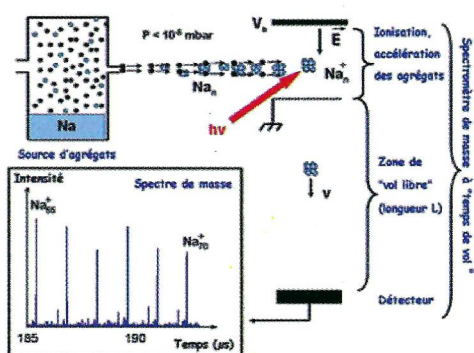
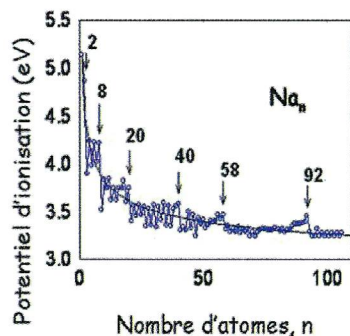
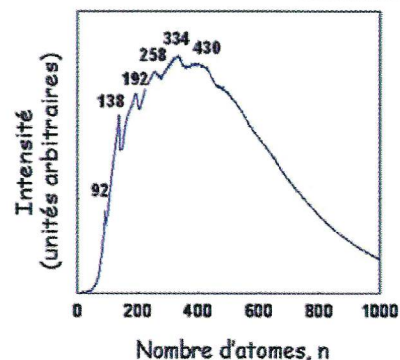


Figure 4 : Structure en couches électroniques dans les agrégats de sodium Na_n (14). Évolution du potentiel d'ionisation avec le nombre d'atomes (électrons) n . Les variations en dents de scie sont dues à la structure en couches électroniques, les maxima locaux correspondent aux "nombres magiques" pour lesquelles toutes les couches électroniques occupées sont pleines.



Spectre d'abondance d'agrégats Na_n en sortie d'une source d'agrégats.



Les conditions expérimentales permettent de mettre en relief la structure en couches électroniques, les maxima locaux correspondant aux "nombres magiques". On note que la structure en couches perdure pour des tailles de plusieurs centaines d'atomes.

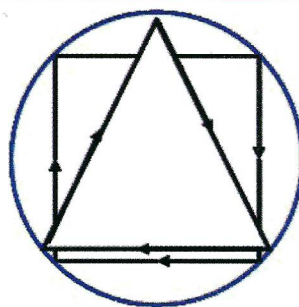
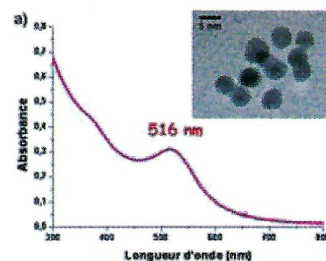


Figure 5 : Représentation schématique des trajectoires prédominantes associées aux électrons de valence pour expliquer la séquence des "nombres magiques".

Figure 6 : Photo d'une solution d'or colloïdale de Michael Faraday © Royal Institution of Great Britain. En insert, représentation schématique d'une nanoparticule colloïdale d'or.



Figure 7 : Résonance plasmon dans des nanoparticules d'or. Haut : spectre d'absorption d'une solution colloïdale de nanosphères d'or de 5 nm de diamètre. Le pic observé dans le spectre d'absorption correspond à la résonance plasmon.



En encart, image par microscopie électronique à transmission (MET) des nanocristaux.

Bas : représentation schématique de la résonance plasmon. Sous l'effet du champ électrique de l'excitation lumineuse, le nuage des électrons de valence oscille de manière collective par rapport au réseau d'ions Au^+ . La position spectrale de la résonance plasmon dépend du métal, de la taille et de la forme des nanoparticules.

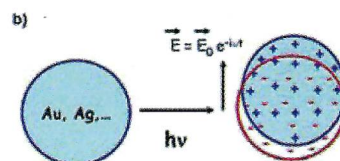


Figure 8 : Propriétés optiques de solutions colloïdales de nanocristaux sphériques de CdSe. **Haut :** spectre d'absorption, **bas :** spectre de fluorescence de nanocristaux de diamètres 2,8 nm (vert), 3,8 nm (jaune), 5 nm (rouge). En regard, photos de solutions colloïdales de ces nanocristaux sous éclairage visible et ultraviolet. On note dans les spectres le décalage du seuil d'absorption et du pic de fluorescence lié au confinement quantique. Cela se traduit par un changement de couleur des solutions de nanocristaux sous éclairage ultraviolet.

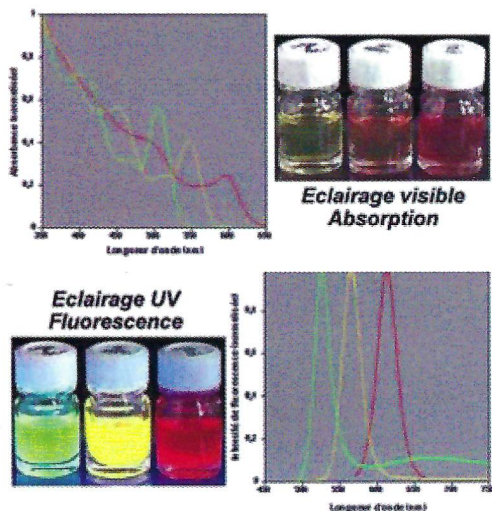


Figure 9 : Confinement quantique dans les nanocristaux de semiconducteurs. **Gauche :** évolution de la structure électronique entre le solide massif et des nanocristaux sphériques de tailles décroissantes. La largeur de bande interdite (ou gap) augmente lorsque le rayon r diminue du fait du confinement quantique. **Droite :** prédiction théorique de l'évolution de la largeur de bande interdite E_g pour des nanocristaux sphériques de différents matériaux.

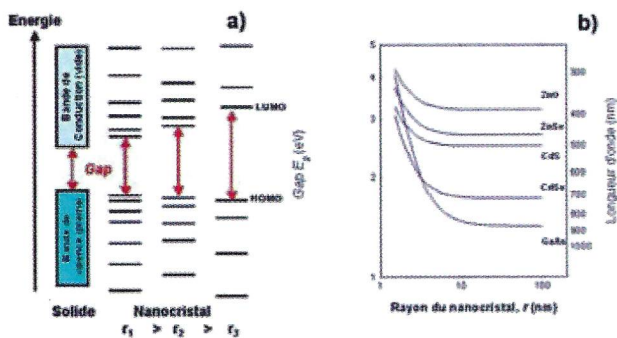


Figure 10 : Images par microscopie électronique à transmission de nanocristaux de CdSe en forme de sphères (a), bâtonnets (b) et tétrapodes (c).

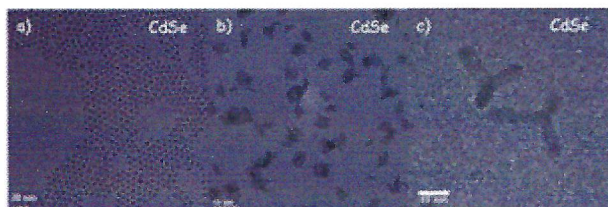


Figure 11 : Nanotubes de carbone. **a)** représentation schématique d'un nanotube de carbone monoparoï; **b):** image par microscopie électronique à transmission d'un nanotube de carbone multiparoï vu en coupe transversale ; **c)** image par microscopie électronique à balayage de faisceaux de nanotubes de carbone multiparoï. © M. Delaunay, DRFMC/CEA Grenoble.

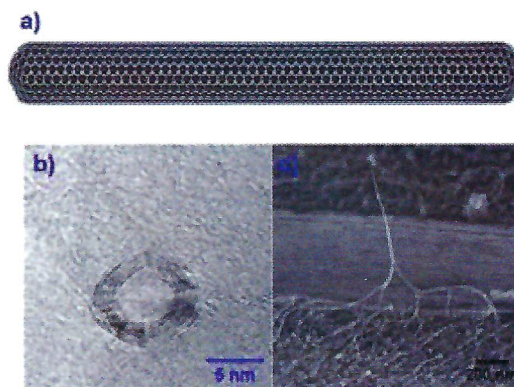


Figure 12 : Vitrail dont les parties teintées en rouge sont faites de verre contenant des nanoparticules d'or. Ce vitrail a été réalisé pour l'exposition « Nanotechnologies, infiniment petit maxi défis » présentée au Centre de Culture Scientifique, Technique et Industrielle (CCSTI, Grenoble, www.ccsti-grenoble.org); oeuvre originale de Valérie Fortis, tous droits réservés.



Figure 13 : Plat en faïence à décor de petit feu polychrome, manufacture de la Veuve Perrin, Marseille, XVIII^e siècle. Les teintes rouge et rose des pétales de fleurs ont été obtenues grâce au pourpre de Cassius. © Musée des Beaux-Arts, Vienne, Isère.



Figure 14 : Plat hispano-mauresque à décor de lustre métallique, Valence, Espagne, fin XV^e- début XVI^e siècle. © Musée des Beaux-Arts, Vienne, Isère.



Figure 15 : Images (en fausses couleurs) par microscopie de fluorescence de cellules neuronales d'embryon de souris marquées avec des nanocristaux de semiconducteurs fluorescents de CdSe. L'ADN nucléaire est marqué par un fluorophore organique (en bleu). © A. Dupuis, D. Grünwald, DSV-DRDC/CEA Grenoble.

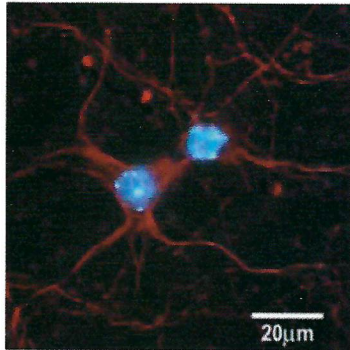


Figure 16 : Schéma de principe d'un microscope optique en champ proche avec une sonde active à base de nanocristaux. Le positionnement de la nanosource de lumière à une distance z de quelques nm de l'échantillon permet d'obtenir des images avec une résolution limitée par la taille de la source de lumière et non pas par la limite de diffraction de Rayleigh. Avec un nanocristal unique en bout de la pointe, la résolution est théoriquement égale au diamètre du nanocristal, soit quelques nanomètres.

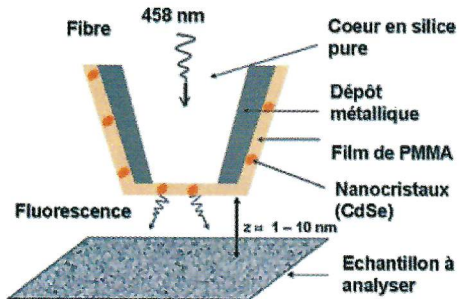
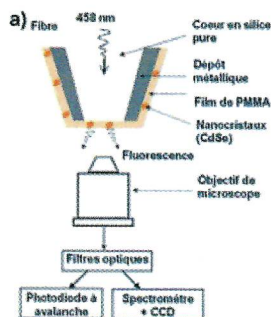


Figure 17 : Caractérisation de la sonde active.

Ci-contre: Schéma de principe de la sonde active et du montage optique utilisé pour la caractériser. Ce dernier permet une analyse temporelle (via la photodiode à avalanche) et spectrale (spectromètre + CCD) de la sonde active.



Ci-contre : Analyse temporelle d'une sonde active avec des nanocristaux de CdSe. On observe une succession d'états "On" (émissifs) et "Off" (éteints), caractéristiques de la présence d'un très faible nombre d'objets en bout de pointe. © S. Huant et coll., Laboratoire de Spectrométrie Physique, Université Joseph Fourier, Grenoble.

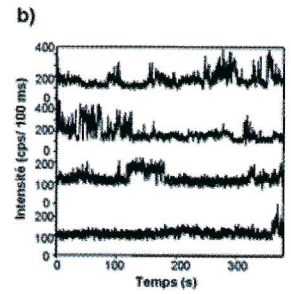


Figure 18 : Représentation schématique de l'utilisation de nanotubes de carbone comme émetteurs d'électrons pour une utilisation dans des écrans plats. Les nanotubes sont placés dans une structure en triode. La polarisation de la grille permet l'émission d'électrons par effet de champ à l'extrémité des nanotubes. L'impact de ces électrons sur l'anode recouverte d'un luminophore donne lieu à une émission de lumière. Sur le schéma, un seul nanotube est représenté pour simplifier. Dans la pratique, un pixel est constitué de plusieurs amas de nanotubes.

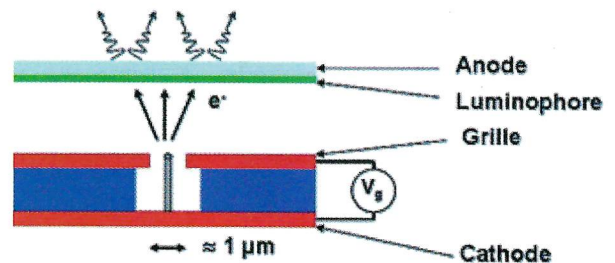
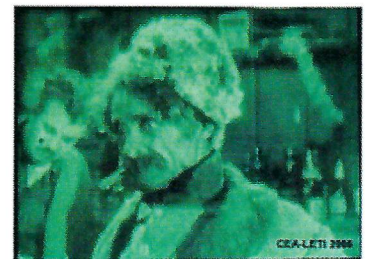


Figure 19 : Ecran vidéo monochrome à émission de champ à base de nanotubes de carbone comme émetteurs d'électrons. L'écran a une diagonale de 6 pouces et une résolution de 320 x 240 pixels.



Haut : Photo du haut montre une image obtenue avec cet écran.
Bas : Image de microscopie électronique à balayage montrant une partie de la cathode. Les nanotubes de carbones sont disposés en plots de $5 \times 10 \mu\text{m}^2$ localisés

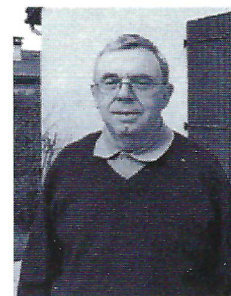


entre les grilles de commandes. Les plots sont répartis en tranchées d'environ $12 \mu\text{m}$ de large et $280 \mu\text{m}$ de long. La taille totale d'un pixel est de $350 \mu\text{m}$. © Réalisation CEA LETI 2005.

La vulgarisation scientifique : très utile mais difficile

Par Roland FUSTIER

Chargé de mission et ancien Président académique de l'Union des Professeurs de Physique et Chimie (UdPPC)



Le 6 décembre 2006 Roland Fustier avait bien voulu nous faire l'honneur de donner à l'ADASTA une conférence consacrée au partage de la culture scientifique et technique, cette conférence était dédiée à Elyane Yacine, Présidente de l'UdPPC, décédée en janvier 2006. Voici l'article que Roland Fustier a rédigé suite à sa conférence.

Selon le dictionnaire Robert la vulgarisation est définie comme le fait d'adapter un ensemble de connaissances scientifiques ou techniques de manière à les rendre accessibles à un lecteur non spécialisé ou de reformuler un discours portant sur un objet de science afin d'être compris du plus grand nombre.

Elle repose pour partie sur la confiance car le bénéficiaire n'a pas a priori l'aptitude optimale pour juger les informations dispensées. Elle ne pourra pour autant s'exonérer de la hiérarchie du savoir et des compétences promues par le système éducatif traditionnel mais visera à donner une autonomie citoyenne quel que soit le niveau de connaissance du lecteur ou de l'auditeur visé.

Certains scientifiques se refusent à l'obligation de vulgarisation prétextant que la science n'est pas expliquée mais tout au plus mise en scène, que l'on peut bluffer les gens et présenter un produit simili, fondé parfois de fausses connaissances. D'autres pensent que l'on contribue à bâtir le mythe de la scienticité. Enfin on reproche aux vulgarisateurs de créer une caste d'essayistes peu soucieux de transmission qui se font plaisir en allant de colloque en colloque sans efficacité pour d'autres qu'eux mêmes.

● ● ● ● ● ETAT DES LIEUX

1. La section S des lycées conserve un pouvoir d'attraction du fait de sa réputation de filière sélective, mais seulement 7 à 8 % des élèves d'une classe d'âge poursuivent des études scientifiques au-delà du baccalauréat. Notre société qui baigne continuellement dans les produits de la science et de la technologie semble vouée à l'efficacité, à la rentabilité immédiate des connaissances. La culture désintéressée serait-elle un luxe ? Toute formation devient monnayable et l'on observe une accumulation des connaissances et de savoir-faire bénéfiques à la réussite aux examens et concours, mais sans recul par rapport à ce que l'on fait et en négligeant souvent les synthèses produites par la réflexion critique et comparative. Identifier l'enseignement scientifique comme outil de sélection installe un barrage psychologique entre la majorité des individus et celle-ci. Le reflux d'intérêt pour la science vient aussi de ce qu'on lui a trop demandé. Nous savons désormais que les études même scientifiques ne garantissent pas obligatoirement une réussite sociale.

2. L'explosion des connaissances induit une spécialisation de plus en plus poussée avec le risque d'isolement de certains chercheurs très pointus dans leur domaine, mais ignorants dans des domaines pourtant essentiels. Cette situation est maintenant perçue par certains laboratoires de recherche qui s'exercent à former des équipes multidisciplinaires. (1)

- La généralisation de l'enseignement secondaire n'a pas empêché une majorité de citoyens de considérer que « la science » est trop compliquée

et quasi inaccessible. Une frange de la population transforme une frustration inconsciente en détachement dédaigneux (on laisse cela aux experts), ou même affiche une incompétence glorieuse. Peu de personnes pourtant osent se dire incultes en lettres, sciences humaines ou musique.

- Jusqu'au début du 20^{ème} siècle l'image positive de la science s'intégrait dans une idéologie de progrès sensée apporter aux hommes des connaissances pouvant les libérer d'anciennes croyances et leur donner le bonheur. Des doutes d'ordre éthique sont apparus à partir de la première guerre mondiale puis par la suite Hiroshima, les catastrophes de Bophal et de Tchernobyl. Les déchets nucléaires, les pollutions chimiques ont mis en évidence des aspects négatifs des progrès scientifiques.

- Récemment certaines minorités sont allées jusqu'au rejet de la parole du professeur ou du discours scientifique car en contradiction avec leur propre « vérité », affichage de croyances développées en dehors du cadre scolaire.

- Le débat médiatique ne permet pas toujours l'exposé des choix fondamentaux. Par exemple le défenseur du nucléaire souvent professoral et parfois même dogmatique est opposé à un contradicteur ultra écologique non susceptible d'accepter la contradiction d'une argumentation rationnelle. La dérive vers un discours idéologique privilégie l'émotion, l'acte de foi est fréquent. La science dont la force première est la rationalité se trouve déplacée dans un contexte de subjectivité individuelle où il y a confusion entre la liberté d'expression et « le tout est égal ». Il faut se garder de confondre le consensus rationnel et la conver-

gence d'opinions, le savoir partagé et l'information. Une enquête publiée en janvier 2002 indiquait que les Français faisaient toutefois davantage confiance aux scientifiques qu'aux médias et aux politiques. Les mêmes trouvaient cependant que les enseignants et les chercheurs ne jouaient pas suffisamment leur rôle en matière de vulgarisation (2).

● ● ● ● ● QUELS SONT LES OBJECTIFS ET QUE PEUT-ON FAIRE ?

- L'objectif premier serait de cultiver un **humanisme scientifique** en réduisant les hiatus entre sciences et culture d'une part et sciences et démocratie d'autre part.

- La physique est l'exemple le plus prégnant car elle est une représentation mentale de ce que l'on observe et ressemble tout à fait à un discours toujours plus pointu sur le monde.

Il ne s'agira pas seulement de conduire des récepteurs ignorants à un savoir scientifique, mais d'habituer les regards vers une vision du monde imprégnée de science, préalable démocratique à une vision poétique ou artistique des phénomènes.

Ne pas empiler toujours plus de connaissances, mais comprendre comment se construit la science, y compris avec ses erreurs et tâtonnements ainsi que le fonctionnement de la communauté scientifique. Pas besoin de long discours sur la ou les méthodes scientifiques mais une présentation de celle-ci chaque fois que l'on aborde un problème, en montrant par exemple la relation entre l'expérimentation et la mise en place de modèles. Ne pas hésiter à montrer et faire réaliser des expériences aux prétentions limitées quand elles **apprennent à penser**.

- Les sciences expérimentales avant de les résoudre commencent par poser les problèmes. Les positivistes et rationalistes (un peu intégristes) ont pendant longtemps présenté les sciences de la nature comme des branches moins précises que les mathématiques donc un peu suspectes. Lorsqu'on est pressé, les arguments péremptaires passent mieux et pourtant il faut apprendre à quantifier les incertitudes, à montrer les limites de nos connaissances... Et même accepter quelquefois de dire « je ne sais pas » !

- L'histoire des sciences est intéressante mais doit être exposée sans

militantisme forcené consistant à glorifier les grands « hommes ». Pour montrer comment avance la connaissance, sans omettre les relations entre la science qui cherche à **comprendre** et la technologie qui **invente**, avec le pointage des retombées économiques, sociales des découvertes lorsqu'elles changent la vie.

- La vulgarisation contribue donc indirectement à justifier les fonds attribués à la recherche fondamentale et appliquée...

- *Il ne peut pas exister de partage de la science sans la rencontre :*

• *des chercheurs qui produisent les connaissances*

• *des médiateurs (enseignants et journalistes spécialisés) qui essaient de comprendre pour faire partager les connaissances au plus grand nombre*

• *du public qui doit avoir envie de s'approprier les informations*

Mais la question la plus difficile est de savoir comment attirer le « non public », citoyens indifférents ou submergés par les multiples moyens d'information.

Il convient de militer pour la prise en charge d'une partie de la vulgarisation par les enseignants du primaire, du secondaire et du supérieur ce qui oblige à adapter leur formation (3). Il faut définir un socle de connaissances minimal qui rende la communication possible et donne envie d'aller plus loin. La mission du professeur est de communiquer des savoir-faire avec passion pour susciter quelques vocations scientifiques chez les jeunes dont il a la charge. Mais il doit aussi accroître aux yeux de tous la crédibilité des sciences en donnant une image de son activité et de sa personne qui entraîne une adhésion minimale. Il doit pour y parvenir s'affranchir **du tout** technique et mâtiné ses interventions de connotations littéraires voire artistiques.

- Il reste à bousculer les clivages disciplinaires, à réintroduire davantage de science dans les classes littéraires ou économiques... Sans diminuer la place des lettres dans les classes scientifiques. *En physique nous pourrions partir de quelques mots clés : matière, lumière, son, énergie univers, intelligence artificielle.*

- *Pourquoi l'astronomie, qui n'est pas enseignée garde-t-elle une bonne image ? Peut-être parce qu'elle s'interroge sur les origines de l'univers, de la terre et de la vie et décrit un ordre du monde dont le rêve et l'imaginaire*

peuvent faire leur miel. Elle ne nécessite pas des connaissances préalables très pointues en terme de vulgarisation, propose de belles images. Elle n'est pas sujet à débat. Elle bénéficie aussi de la prise de parole de personnalités de grand charisme.

● ● ● ● ● QUELQUES PROPOSITIONS POUR VULGARISER

La vulgarisation est un mode de transmission qui s'apprend.

- C'est par la pratique que l'on peut s'améliorer (4)

- Le vulgarisateur est un militant de la « science pour tous » et quand il exagère du « tous pour la science »

- Elle doit s'adapter à l'air du temps ! Et au public surinformé donc démuné de fils conducteurs

- Ne pas chercher à instruire (c'est le travail de l'école) mais plutôt à donner le goût de comprendre et d'augmenter son savoir

- Partager une aventure avec son public d'un instant et s'il le faut se faire conteur d'une histoire

- Ne pas jouer au savant ni au professeur

- Ne pas procéder avec le grand public comme avec ses pairs

- Limiter les termes techniques ou le jargon de sa spécialité

- Eviter les détails non essentiels et n'utiliser que les schémas qui donnent des informations pertinentes (les images touchent plus les scientifiques que les littéraires)

- Toute généralité doit être accompagnée d'un exemple

- S'aider de l'analogie qui permet d'expliquer un élément inconnu à partir d'un autre plus habituel

- La métaphore permet de communiquer en faisant comprendre ou saisir des phénomènes hors de la portée de nos sens ou trop abstrait. Elle joue un rôle clé pour diffuser les idées nouvelles difficiles, et donne du style et de la couleur (5)

- Le sens de la formule aide à résumer une pensée ou à reformuler pour conclure chaque point de façon élégante.

Les nouvelles technologies multimédia offrent maintenant des possibilités de diffuser des contenus scientifiques de façon vivante et interactive. PowerPoint bien maîtrisé permet de visionner texte, schémas, photos, vidéo, enregistrement sonore pour appuyer le propos.

Les expériences nécessitent une mise en scène pour apporter un certain plaisir à l'auditoire. On peut jouer avec un phénomène inattendu

ou une expérience contre-intuitive pour titiller la curiosité et susciter une attitude d'investigation ou d'exploration au-delà du quotidien (6).

On doit jouer avec le public peu initié et ne pas trop attendre d'étonnement surtout de la part des jeunes. Il est loin le temps où on démontait le réveil, où on construisait un petit moteur électrique ou un poste radio...Maintenant le téléphone portable prend des photos, reçoit la télévision et envoie des S.M.S. ! On peut donc acquérir une technique et un savoir-faire avec très peu d'instruction et sans être obligé de comprendre. La vulgarisation scientifique est paradoxalement un peu victime des progrès technologiques galopants.

Consulter ses pairs avant une intervention est bien insuffisant car cela limite souvent de ne discuter que des contenus. Reste donc à tester son projet auprès de personnes peu au fait du sujet.

La pensée scientifique n'est pas suffisante pour éclairer les affaires humaines mais tout à fait nécessaire pour contribuer à les appréhender.

La science doit être non seulement une mécanique de l'intelligence mais aussi un esthétisme de l'intelligence pour être reconnue dans sa dimension culturelle.

1. L'idée fait son chemin aux deux extrémités de l'enseignement : à la demande de l'Académie des Sciences va être mis en place en sixième un enseignement scientifique global et intégré. Les champs disciplinaires n'apparaîtront progressivement qu'un peu plus tard.

Dans les écoles doctorales de l'Université Blaise Pascal, des thèmes de recherche interdisciplinaires coexistent avec la spécialisation très pointue.

2. Les vulgarisateurs les plus assidus et les plus performants sont pour la plupart des théoriciens car ils ont une vision plus large et plus approfondie de leur discipline et un esprit de synthèse qui facilite le dialogue. Ils ont le génie de la simplification, cherchent les mots pour le dire, trouvent les images qui facilitent la compréhension et les métaphores éclairantes.

3. Les enseignants sont souvent plus critiques que les chercheurs par rapport à la vulgarisation ! Un sentiment de frustration ou d'incomplétude?

4. Pourquoi certains vulgarisateurs

brillants (*Hubert Reeves, Albert Ducrocq, Joel de Rosnay, Hervé This...*) réussissent-ils parfois où le système éducatif a échoué ?

5. On a souvent à faire à des choses qu'on ne peut ni voir, ni toucher, ni sentir. Il ne faut que notre imagination pour les définir.

6. Les cabinets du 18^{ème} siècle savaient très bien le faire.

L'ANIMATION SCIENTIFIQUE EN AUVERGNE

Les actions de vulgarisation classiques sont déjà bien présentes, les actions télévisuelles plus rares.

- Conférences
 - Expositions
 - Visites de laboratoires et d'entreprises
 - Publications d'articles dans la presse régionale et bulletins d'information de collectivités territoriales
 - Animations en direction des jeunes dans le cadre scolaire ou associatif
 - Emissions radio (France Bleu, Radio campus) ou télévision (plus rare)
- De nombreuses structures et associations contribuent à ces activités :

L'Université

La S.F.P (Société Française de Physique) rejointe par la S.F.C.

Mercredis de la physique devenus mercredis des sciences physiques puis mercredis des sciences

La B.C.I.U (Bibliothèque Communautaire Inter Universitaire) antennes des Cézeaux

Les écoles doctorales

L'École supérieure de chimie (olympiades de la chimie)

L'Éducation nationale

Ateliers de cultures scientifiques, le dix-15, l'École des sciences (Chateaufort les bains)

Les structures fédératives

Fête de la Science et Expo-science

La Maison de l'Innovation

Expositions thématiques, conférences, bar des sciences

Animations jeunes

Les Jeunes pousses de l'ADASTA et Les Petits Débrouillards

Les sociétés savantes ou plus disciplinaires

Autres que celles déjà citées : UdPPC (Union des Professeurs de Physique et Chimie), A.P.B.G. (professeurs de SVT), A.P.M.E.P (professeurs de mathématiques), AAAA (Association des Astronomes Amateurs d'Auvergne), l'U.R.I.S. Auvergne (ingénieurs), S.F.E.N. (Société Française d'Énergie Nucléaire),

ET BIEN SÛR L'ADASTA

Carrefour de la radio

Emissions : *radio France Bleu et Radio Campus*

Les Musées : *Lecoq, Vulcania, Michelin*

Théâtre et Sciences

Manifestations exceptionnelles :
Année mondiale de la Physique en 2005 (Liste non exhaustive)

Tout cela attire l'attention de personnes déjà un peu intéressées, voire même initiées.

Des manifestations telles que la Fête de la Science, les Bars des sciences, les pages magazines de quotidiens ou hebdomadaires, les bibliothèques communautaires ou centrales de prêts, la radio doivent proposer des actions plus interactives où le savant ne déverse pas toutes ses connaissances mais répond aux questions qui intéressent et préoccupent. Théâtre et Sciences en écrivant et jouant sur la science proposent aussi une entrée intéressante.

Ils doivent évoquer des sujets ouverts (exemples : monde réel et monde perçu, visible et invisible, la réalité ou l'illusion, les mathématiques dans la nature, qu'est-ce qui fait courir les physiciens ?) ou des sujets faisant débat (à manipuler avec précaution). Dans ce cadre pas de conférencier mais des personnes ressources très interactives avec un temps de parole conséquent donné à la salle.

PERSPECTIVES ET SOUHAITS :

Tout en encourageant la diversité pour s'adapter aux divers publics, il faudra aller vers une vulgarisation plus globale (au sens où les différents champs disciplinaires devront entrer dans un tout en établissant des liens) et plus intégrée (au sens de coordonnée). En pratique tous ceux qui oeuvrent dans le partage de la science doivent plus souvent se rencontrer pour mutualiser leurs expériences, faire passer l'information, proposer des animations communes plus visibles et plus médiatiques tout en gardant leur spécificité et leur richesse.

LES CONFÉRENCES 2007

Ci-dessous le programme des conférences de l'année 2007 à jour au 15 février :

Janvier, le 17 – Monsieur Nicolas DUMOULIN Président de l'association LINUXARVERNE et Monsieur Jean-Marie FAVREAU membre de cette même association : « **Les logiciels libres** »

Février, le 7 – Monsieur Paul AVAN Laboratoire de Biophysique sensorielle, Faculté de médecine et Université d'Auvergne : « **La physique de l'oreille et la chasse aux molécules** »

Mars, le 21 – Monsieur Vincent BARRA Professeur des Universités, ISIMA, Université Blaise Pascal. Membre de l'ADASTA : « **Un petit aperçu du Soleil. Atmosphère, activité et influence** »

Avril, le 18 – Monsieur Antoine MOREAU Maître de Conférences à l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand : « **Du mouvement perpétuel au défi énergétique** »

Mai, le 22 – Monsieur JF SOUSSANA de l'INRA à Theix, responsable de l'unité Agronomie, et spécialiste des prairies de montagne.

Monsieur Soussana nous donnera titre et résumé dès que possible.

Juin, le 6 – Monsieur Jean-Pierre MIGNOT ex-professeur de Biologie à l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, professeur associé, à vie, au Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris : « **La cellule : le plus vieux et le plus génial des inventeurs** » couplé avec « **A propos du Limousin mystérieux** »

Octobre, le 17 – Monsieur Pierre CHARBONNIER Professeur émérite de l'Université Blaise Pascal (mention Histoire et Moyen Age), Directeur (et auteur) de la collection « Les Anciennes Mesures Locales d'après les Tables de Conversion », publications de l'Université Blaise Pascal : « **Toises, Muids, Pots et les Autres : les mesures en France avant 1789** »

Novembre – (date sera confirmée) Monsieur Paul AVAN, Laboratoire de Biophysique sensorielle, Faculté de médecine et Université d'Auvergne avec Monsieur Daniel DAUGERON : « **L'Auvergne, la microgravité et l'espace** »

Décembre, le 12 – Monsieur Dominique DESCOTTES Professeur à l'Université Blaise Pascal (Clermont-2), Directeur du Centre International Blaise Pascal et du Centre d'Etudes sur les Réformes, l'Humanisme et l'Age Classique : « **Un physicien, Pascal** »

ASSEMBLEE GENERALE

Celle-ci a eu lieu le 31 janvier 2007. Le compte-rendu peut être obtenu auprès du Secrétariat de l'ADASTA (téléphone 04 73 92 12 24 ou email adasta@wanadoo.fr)

ERRATA

Monsieur Michel Massaux, auteur de l'article « Le laser mégajoule » paru dans notre numéro 64 de « Auvergne-Sciences » a souhaité que nous publions un errata pour diverses coquilles d'impression ou explications complémentaires qu'il souhaite apporter. Nos lecteurs auront sans doute déjà rectifié d'eux-mêmes :

Page

- 11 - § Avant-propos, ligne 6 lire (...et Arcachon). et colonne de droite 27^e ligne : lire « 6×10^8 »
- 12 - figure 2 au dessus du schéma lire «... la convergence sur la cible 5 » et colonne de gauche, ligne 21 lire : Livermore, près de San-Francisco
- 13 - colonne de gauche 27^e ligne : lire « le temps τ pendant lequel θ et N sont maintenus suffisamment grands par apport d'énergie extérieure » ; 30^e ligne : lire 10^{20} s.m⁻³ et figure 4 ligne b) lire irradiation
- 14 - ligne 31 lire « ...photons X »
- 15 - colonne de droite, ligne 1 lire : ...en 2 quadruplets et ligne 23 supprimer : (voir encadré A, ci-dessous)
- 16 - figure 5 dans la légende il faut lire « ...une lame de phase, KPP » ; colonne de gauche, ligne 6 lire optique adaptative ; colonne de gauche ligne 30 : remplacer PO⁴H²K par PO₄H₂K et colonne de droite, § A ligne 8 lire «Emplie de mélange... »
- 17 - Colonne de droite, 8^e ligne lire : La figure 7 montre... et colonne de gauche 46^e ligne lire 18 K ainsi qu'à la 60^e ligne
- 18 - lignes 12 et 59 lire « ... tout à fait »

Certains acronymes (pages 17 et 18) ne comportaient pas leur signification développée :

- « PALA » = Plateforme d'Application des Lasers en Aquitaine
- « PYLA » a été choisi pour rappeler la proximité des dunes de la côte landaise.
- « CELIA » = Centre d'Étude des Lasers Intenses et de leurs Applications.

L'unité mixte de recherche INSERM 484

Article aimablement remis par le Professeur Jean MAUBLANT

Suite à la visite du laboratoire des molécules marquées effectuée par l'ADASTA en janvier 2007



L'unité 484 de l'INSERM (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale) est mixte par une convention passée avec le Centre de Lutte contre le Cancer Jean Perrin et l'Université d'Auvergne. Son intitulé est « Etude du métabolisme des molécules marquées ». Elle a été créée en 1998 dans la continuité de l'unité 71 fondée en 1973 par le Doyen Gaston MEYNIEL. Son directeur actuel est le Dr. Jean-Claude MADELMONT, un chimiste de formation. Au cours des cinq dernières années, les thèmes de recherche se sont étendus et le nombre de personnes impliquées dans l'unité a augmenté et s'est diversifié. Il est actuellement de plus de 60, qui se répartissent en plusieurs catégories dont les principales sont : chercheurs INSERM (ingénieurs de recherche, chargés de recherche, directeurs de recherche), enseignants-chercheurs médecins et pharmaciens (professeurs, maîtres de conférences), techniciens, personnels administratifs, étudiants (inscrits en master, doctorants, post-doctorants). Les grands thèmes sont au nombre de trois, qui ont en commun la lutte contre le cancer : recherche de nouveaux radiotraceurs pour la cancérologie, recherche de nouvelles molécules pour la chimiothérapie anticancéreuse, étude de la géno-

mique et de ses interactions avec la nutrition dans le cancer. Les travaux vont de la conception, la synthèse, le radiomarquage, les études biologiques sur cultures de cellules et sur l'animal, l'analyse du métabolisme et des effets des molécules, jusqu'aux essais cliniques chez l'homme.

La recherche de nouveaux radiotraceurs vise à inventer, tester puis valider de nouvelles molécules radioactives qui, administrées chez un patient, se concentrent de façon spécifique dans une tumeur. L'émission radioactive issue d'un radioélément artificiel (REA) est utilisée soit dans un but d'imagerie (les REA sont alors des émetteurs de photon gamma comme le technétium-99m et l'iode-123, ou des émetteurs de positon comme le fluor-18), soit dans un but de traitement (avec des émetteurs de rayons bêta-moins comme l'iode-131). Le nombre de vecteurs capables de cibler spécifiquement un cancer reste aujourd'hui très restreint et tout nouveau venu est promis à un bel avenir. L'unité 484 développe depuis près de 15 ans un vecteur extrêmement prometteur capable de cibler un cancer de la peau, le mélanome : il s'agit de la benzamide marquée à l'iode ou iodo-benzamide. Plus récemment a été mis en évidence le tropisme spécifique d'un groupement chimique particulier pour le cartilage. Ces deux voies se développent désormais en parallèle, l'objectif étant de caractériser des composés capables de visualiser le mélanome pour l'un, le cartilage pour l'autre, mais aussi et surtout de grands espoirs sont placés dans la possibilité de traiter le mélanome et ses métastases, ainsi que les

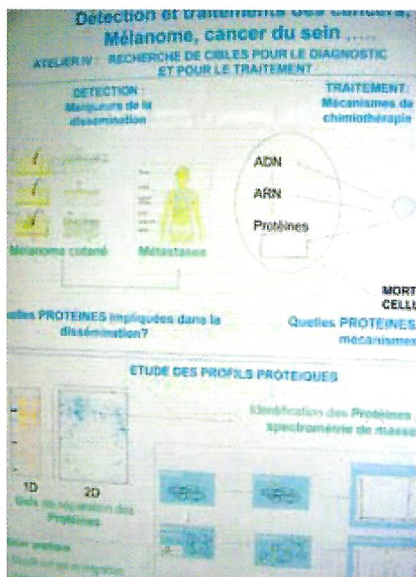
tumeurs du cartilage. Le traitement des métastases du mélanome est actuellement un domaine où les thérapies classiques sont généralement tenues en échec. A côté de cette voie déjà novatrice, les chercheurs de l'unité testent également une approche très originale qui consiste à utiliser la benzamide pour vectoriser vers le mélanome non seulement un REA mais, de façon simultanée, une molécule de chimiothérapie. La validité de ce nouveau concept, baptisé radiochimiothérapie vectorisée, a été démontrée récemment sur des cellules tumorales en cultures. Une partie de ces travaux est menée en partenariat avec des équipes australiennes, pays de prédilection du mélanome.

Grâce à une collaboration avec de nombreux chimistes (Faculté des Sciences, Ecole de Chimie, Faculté de Pharmacie, équipe canadienne), de nouvelles molécules présentant des caractéristiques très intéressantes pour le traitement du cancer ont été synthétisées. Les travaux de validation se poursuivent. Ils sont menés en parallèle avec des études biologiques fondamentales qui visent à démontrer les mécanismes d'action de ces médicaments et à tenter de découvrir de nouvelles cibles moléculaires. Un thème très novateur a été initié dans l'unité ; il s'agit de l'effet bystander de la chimiothérapie. Il a



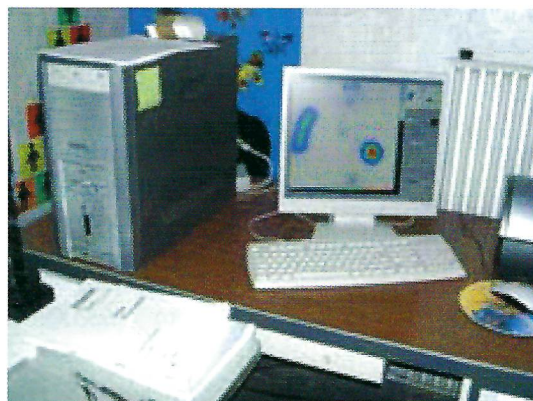
en effet été observé que lorsque du sérum, prélevé chez un animal traité avec succès d'un cancer par une chimiothérapie, est injecté à un autre animal non traité mais également porteur d'un cancer, ce cancer guérit également. La ou les molécules responsables de cette transmission d'un effet bénéfique du traitement restent méconnues mais font l'objet de recherches dans l'unité, notamment dans le cadre d'une collaboration avec l'Ecole Polytechnique.

L'étude de la génomique et de ses interactions avec la nutrition porte essentiellement sur le cancer du



sein. Cette thématique est dirigée dans l'unité par le Pr. Yves-Jean Bignon, qui a développé à Clermont-Ferrand les consultations d'oncogénétique et est un spécialiste des mutations dites BRCA qui sont responsables d'une fraction significative des cancers du sein. Si le rôle des facteurs de risque génétiques dans l'apparition des cancers est aujourd'hui prouvé, leur relation avec les facteurs nutritionnels reste beaucoup plus floue. Cette équipe est impliquée dans plusieurs études locales, nationales et internationales qui étudient ces relations. Par ailleurs les techniques de génétique permettent d'analyser finement les tumeurs et de proposer des traitements mieux adaptés ; ce nouveau domaine dit de l'oncothéranostique est également développé au sein de la même équipe.

Les trois équipes composant l'unité sont réparties dans plusieurs laboratoires dont la surface totale avoisine les 3000 m² ; plus de la moitié de cette surface est située dans un bâtiment indépendant, propriété de l'INSERM et voisin du Centre Jean Perrin. Les équipements de l'unité 484 sont très complets ; ils permettent la synthèse chimique et radiochimique, l'analyse génomique,



protéomique (HPLC, électrophorèse bidimensionnelle, spectrométrie de masse) et métabolomique (spectroscopie RMN), les études pharmacologiques en cultures de cellules et chez l'animal (bêta imageur), l'imagerie chez le petit animal (tomoscintigraphie, TEP animal). Les relations étroites entretenues avec les équipes de cancérologie et de médecine nucléaire du Centre Jean Perrin facilitent l'initiation d'essais cliniques. Les unités INSERM sont désormais créées pour une durée maximale de huit ans. L'unité 484 va ainsi disparaître à la fin de l'année 2007. Une demande de création d'une nouvelle unité reprenant la grande majorité des thèmes de l'unité 484 et dirigée par le Pr. Jean Maublant a été déposée ; la réponse sera connue à l'automne 2007.

Renseignements : 04 73 15 08 00

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 Mars 2007 - N° ISSN - 1166-5904

Des nouvelles des "Jeunes Pousses"

par Pierrette TOURREIX

Nous avons pu diversifier les activités des « Jeunes Pousses » grâce aux subventions aimablement accordées par nos sponsors qui nous ont permis

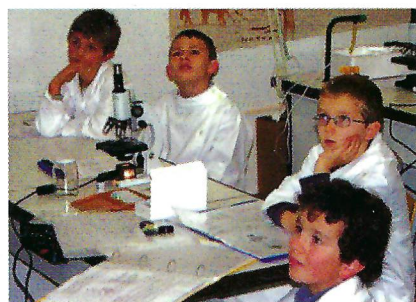


Observation à la loupe binoculaire

d'acquérir un matériel nouveau et performant : microscopes et loupes binoculaires.

Les enfants, au cours de deux séances ont déjà pu faire

diverses observations (végétaux, cristaux, artaisons, mites, pelotes de déjection et divers insectes) et ainsi se rendre mieux compte de la complexité et de la diversité d'innombrables organismes et particules qui constituent notre proche environnement et que l'on ne voit qu'imparfaitement à l'oeil nu.



Attention soutenue à l'écoute des explications pour l'utilisation du microscope

Le groupe des « Jeunes Pousses » avait en février et mars 2006 eu la possibilité de se rendre au CUST (devenu entre-temps « Polytech' (Clermont-Ferrand) ». Les enfants y avaient réalisé sous la conduite des élèves ingénieurs et de leurs encadrants une pièce en forme d'enclume. Le 7 mars 2007 le groupe sera à nouveau reçu pour continuer cette gratifiante séance en s'initiant à la fonderie et en réalisant une pièce forgée. Ceci est une grande chance pour nos jeunes qui

vont rencontrer des chercheurs et des ingénieurs de l'Université Blaise Pascal et approcher ainsi des techniques plus complexes.

Dans le cadre de la session en cours nous avons emmené le groupe des Jeunes Pousses jusqu'au sommet du Puy de Dôme pour réaliser à nouveau l'expérience de Blaise Pascal sur la pression atmosphérique avec mesure à plusieurs altitudes.

A cette occasion 3 élèves de 1^{ère} S du Lycée de Chamalières et leur professeur de physique se sont joints au groupe.

Ces élèves ont également bénéficié d'un entretien avec M. Paul-Louis Hennequin professeur retraité de l'Université Blaise Pascal et membre de l'ADASTA ; ils nous ont envoyé un petit résumé que nous reproduisons ci-après :

« Le sujet des TPE (Travaux Personnels Encadrés) cette année pour les 1^{ère} S est « savants et sciences hier et aujourd'hui ». Nous avons pour y répondre voulu présenter la vie scientifique de Blaise Pascal. Un peu perdus devant la quantité de documents qui s'offraient à nous, nous avons eu la chance de pouvoir rééditer l'expérience qu'il a fait faire par son beau-frère M Perrier il y a 350 ans sur la pression atmosphérique. C'est grâce à l'ADASTA, contactée par l'intermédiaire de notre professeur de physique Mme Casimir, que nous avons pu la réaliser dans des conditions quasi idoines. C'est le mercure (qui nous est interdit en d'autres circonstances) qui a en effet grimpé dans le tube. En la présence de scientifiques qualifiés, il nous a alors été aisé de comprendre ce qui est devenu l'expérience de notre TPE. Nous remercions l'ADASTA qui fait vivre la science car il est apprécié pour des petits lycéens comme nous d'avoir l'aide de scientifiques et de bénévoles aussi aimables.

Julie Chassagne, Pierre Durand, Rémi Boyer, élèves de 1^{ère} S au lycée de Chamalières »



Nous en profitons pour donner un bref rappel de cette expérience de Pascal qu'a bien voulu nous transmettre M. Jean Chandezon, vice-président de l'ADASTA :

« Le baromètre venait d'être découvert par Torricelli. Pascal songea à l'appliquer à la mesure des altitudes, et sur ses indications, son beau frère Florin Perrier conseiller à la cour des aides de Clermont, fit au Puy de Dôme le 19 septembre 1647, une expérience décisive.

Accompagné de quelques savants de Clermont, M. Perrier partit à cinq heures du matin pour le Puy de Dôme, après avoir constaté la hauteur barométrique dans le jardin du couvent des Minimes, situé près de la place de Jaude. Arrivé au sommet du puy, il remarqua que le mercure avait baissé de trois pouces 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 : 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. (Relation de l'expérience de Pascal issue du "guide du promeneur à pied" de A. Boule et Th. Michelin, 1899) ».