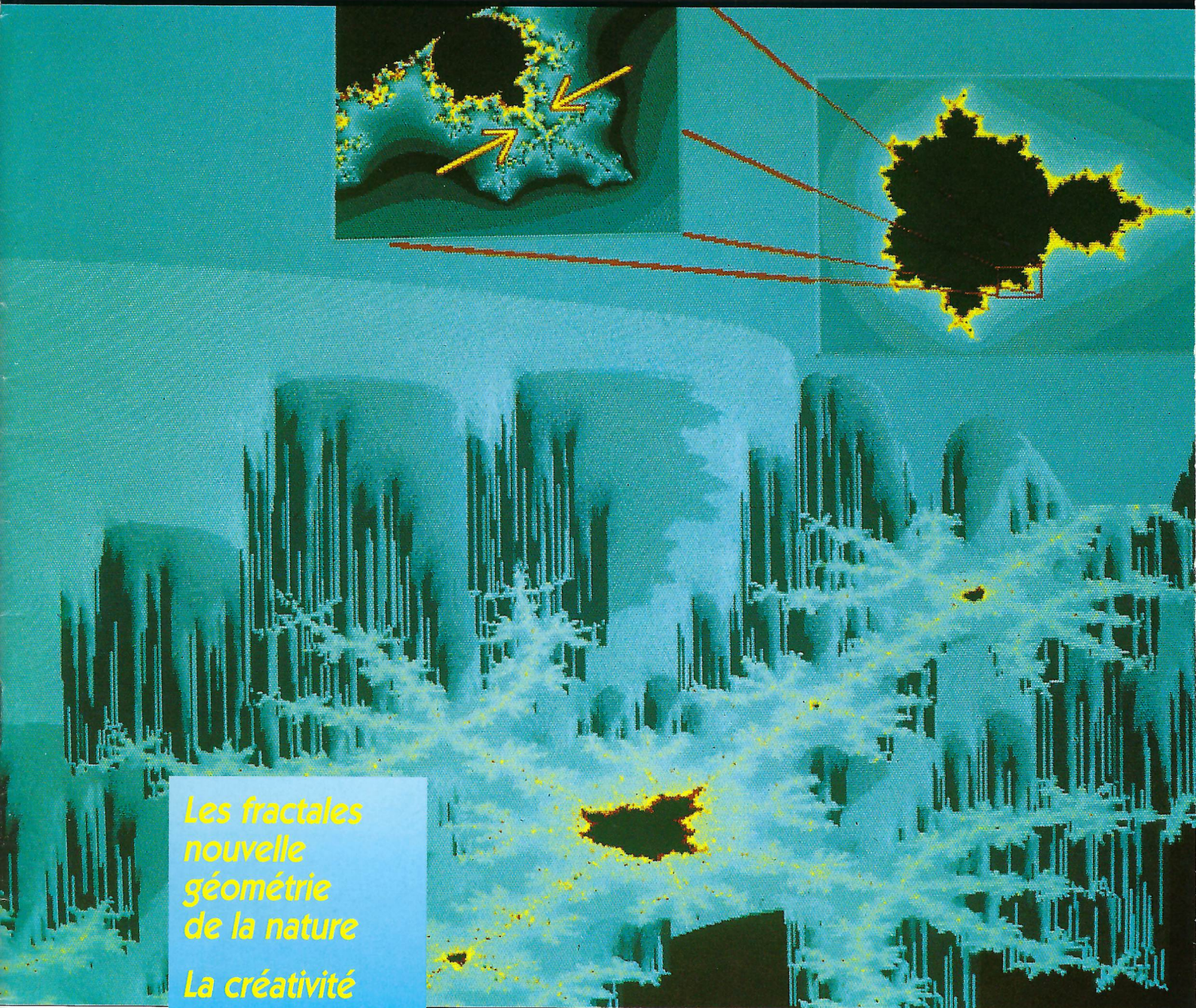


# AUVERGNE SCIENCES

## BULLETIN DE L'ADASTA

Mars 96

N° 37



*Les fractales  
nouvelle  
géométrie  
de la nature*

*La créativité*

*Découverte de  
la radioactivité*

- Les fractales  
nouvelle géométrie  
de la nature ..... p. 3  
*Ch. Ruhla*
- La créativité (suite) .. p. 11  
*J. Simon*
- Découverte  
de la radioactivité  
naturelle ..... p. 20  
*S. Gély*
- La vulgarisation  
scientifique ..... p. 25  
*R. Fustier*

### Informations

- régionales ..... p. 28
- Reliure haute couture
- Exposition : des plantes et  
des hommes
- Hommage à Pierre Nauton

L'ADASTA reçoit le soutien financier :

- du Conseil Régional d'Auvergne
- du Conseil Général du Puy-de-Dôme
- du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche.

### AUVERGNE-SCIENCES

Publication trimestrielle  
19, rue de Bien-Assis  
63100 CLERMONT-FERRAND  
Directeur de la Publication  
Roger VESSIERE  
Rédaction :  
Roland JOUANISSON  
N° ISSN 1166-5904

Photo de couverture :  
Ensemble fractal  
calculé par ordinateur



Dépôt légal MARS 1996  
N° Imprimeur 1971

*Savez-vous quelle est la longueur des côtes de France ? Inutile de consulter votre livre de géographie : le nombre que vous y trouverez ne signifie rien car la question n'a pas de sens : tout dépend de la longueur de l'instrument de mesure ! Nous avons affaire dans ce cas à un phénomène qui relève de la géométrie fractale, comme il en existe beaucoup d'autres dans la nature.*

*Le premier objectif fractal a, semble-t-il, été décrit par Jean PERRIN au début de ce siècle, mais il faudra attendre la parution, en 1975, de l'ouvrage "Les objets fractals" de Benoît MANDELBROT, mathématicien français, pour voir se développer l'univers fractal, notamment à partir d'images d'ordinateur.*

*Le Professeur Charles RUHLA nous expose dans ce numéro les bases de la géométrie fractale, sans faire appel à des calculs savants, mais en mettant clairement en valeur les idées essentielles.*

*Dans un précédent numéro (34, juin 1995), Jean SIMON a abordé le sujet longtemps tabou de la créativité. Aujourd'hui, l'auteur apporte de nouveaux éclairages et montre qu'au pays de DESCARTES, notamment, on a tendance à trop privilégier le raisonnement logique et l'abstraction, gérés par le "mode cortical gauche" du cerveau, et à négliger d'autres façons de penser pouvant conduire à la créativité. Jean SIMON nous apporte même la démonstration qu'à notre époque Léonard de VINCI ne serait pas bachelier !*

*La vulgarisation scientifique est un sujet qui entretient toujours les discussions, voire les polémiques. Roland FUSTIER apporte son point de vue éclairé et souhaiterait susciter les réactions des lecteurs...*

*1996 verra la célébration du centenaire de la découverte de la radioactivité, qui marque un tournant capital, non seulement dans la pensée scientifique, mais également dans l'évolution de la civilisation. Trois français illustres sont associés à ces découvertes : Henri BECQUEREL, Pierre et Marie CURIE. Suzanne GELY nous raconte au jour le jour les débuts de cette prodigieuse aventure.*

*D'autre part, nous publions un supplément consacré à la célébration du centenaire. Dans ce document, rédigé par une équipe de scientifiques de haut niveau, nos lecteurs trouveront un ensemble d'informations sur la radioactivité et ses multiples applications.*

R.J.

### Adhésions et Abonnements

Adhésions à titre individuel .....	150 F
Adhésions à titre collectif .....	500 F
Membre bienfaiteur .....	1 000 F

L'adhésion donne droit au service gratuit du bulletin et à des réductions sur les différents services rendus par l'Association (publications, stages, visites,...)  
Adressez le courrier à **ADASTA, 19, rue de Bien-Assis - 63100 Clermont-Ferrand**  
Tél. 73 92 12 24 - Fax 73 92 11 04

# Les fractales

## nouvelle géométrie de la nature

Parler des rapports entre la géométrie et les phénomènes naturels c'est d'abord réfléchir à la notion d'espace. C'est par nos cinq sens que nous entrons en relation avec le monde extérieur et nous commençons à ressentir l'existence de l'espace dès le berceau. Vers le troisième mois, le bébé qui agite les bras commence à toucher volontairement les jouets que l'on a disposés à sa portée et quelques mois plus tard, cet apprentissage spontané aboutit à un mécanisme très élaboré qui coordonne les mouvements du bras et des mains avec la vision binoculaire et permet la préhension des objets. Dès ce moment là, la notion de distance est acquise, mais elle est limitée à la longueur des bras. Ensuite, le bébé se met à marcher, son espace s'élargit aux murs de sa chambre, et la distance se mesure, de façon intuitive, au nombre de pas. Enfin, quelques années plus tard, l'espace de l'enfant s'est agrandi jusqu'aux limites de la cour de récréation et la mesure de la distance s'est quantifiée car un écolier sait compter le nombre de pas. Ainsi, à partir de la notion de distance, qui résulte de nos sensations, se sont élaborés deux nouveaux concepts :

- La longueur, qui est la mesure de la distance.
- L'espace, qui est l'ensemble des distances.

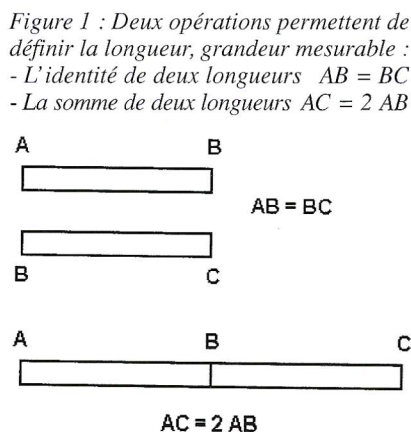
### LA MESURE DES DISTANCES ET LA GEOMETRIE D'EUCLIDE

La mesure des distances par le nombre de pas reste une méthode imprécise et subjective. Celui qui tente le retour aux sources en allant



**Ch. RUHLA**  
Professeur à l'Université  
Claude Bernard Lyon I

visiter la cour de l'école de son enfance est toujours surpris de la trouver si petite. C'est parce qu'il la mesure intuitivement à l'échelle de ses pas d'adulte et non plus à l'échelle de ses pas d'enfant. Le premier rôle du physicien est donc de définir la mesure des longueurs par une méthode qui soit à la fois précise et objective. Voici la suite des opérations qui définissent une longueur (figure 1) :



- Deux règles droites identiques  $AB$  et  $BC$  représentent la longueur conventionnelle d'un étalon arbitraire.

- En les alignant bout à bout, on obtient une longueur  $AC = 2 AB$ .
- Cette opération peut être poursuivie indéfiniment et permet de mesurer n'importe quelle distance.

Cette méthode, qui nous apparaît comme évidente, comporte en fait deux postulats implicites :

- La définition de la ligne droite, identifiée à la notion de rayon lumineux.
- La définition du corps solide, permettant de réaliser une règle rigide qui donne des résultats reproductibles quelle que soit son orientation par rapport à la verticale.

Dès que la notion de longueur est maîtrisée, tout est prêt pour construire des segments de droite, des carrés, des cubes.....et ce sont les grecs - en particulier EUCLIDE - qui ont le mieux développé cette géométrie euclidienne avec laquelle nous vivons toujours aujourd'hui. Elle nous fournit de très bons modèles pour la représentation des objets naturels : par exemple, la planète Saturne est très bien représentée par une sphère et ses anneaux par des cercles (figure 2).

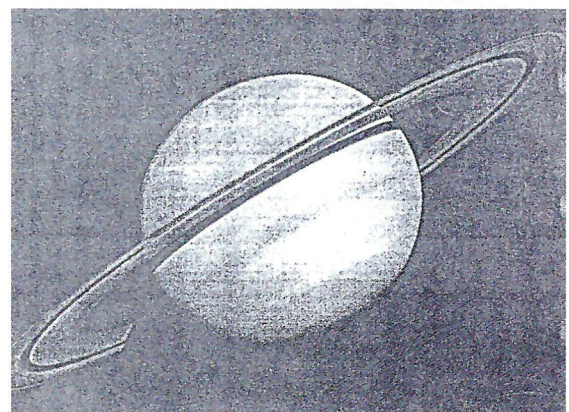


Figure 2 : La planète Saturne est très bien représentée par une sphère et ses anneaux par des cercles. C'est un bon exemple de modélisation par la géométrie euclidienne.

On peut caractériser les figures de la géométrie euclidienne classique par l'épreuve de la loupe («effet zoom»). Par exemple, si l'on observe un carré à la loupe, on constate qu'il a perdu son individualité propre car il est devenu méconnaissable ; suivant le grossissement, on ne voit plus qu'un angle droit, ou même qu'un segment de droite (figure 3). Cette épreuve est très importante car elle va nous conduire à la géométrie fractale.

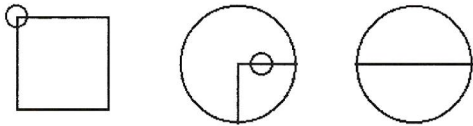


Figure 3 : Un carré que l'on regarde à la loupe n'est plus reconnaissable ; à faible grossissement, on observe un angle droit, et à fort grossissement, un segment de droite. Tous les objets euclidiens classiques perdent leur individualité propre lorsqu'on leur fait subir l'épreuve de la loupe.

4



Figure 4 : Ce dépôt électrolytique de cuivre à deux dimensions a été obtenu entre deux plaques de verre très rapprochées. Dans l'image supérieure on délimite un petit rectangle que l'on présente agrandi dans l'image inférieure. Le dépôt reste reconnaissable après avoir subi l'épreuve de la loupe ; on dit qu'il est autosimilaire.  
( FLEURY V. Laboratoire PMC, Ecole Polytechnique)

## D'EUCLIDE A MANDELBROT

Il existe des objets naturels pour lesquels la géométrie d'EUCLIDE ne nous fournit pas une représentation suffisante, bien qu'ils ne soient pas en contradiction avec elle. En voici un exemple (figure 4) :

- Un dépôt électrolytique de cuivre présente des arborescences très spectaculaires et très caractéristiques.

- Quand on découpe une fenêtre dans cet objet et que l'on agrandit fortement l'image de la région correspondante, on retrouve les mêmes arborescences très spectaculaires et très caractéristiques.

Cet objet conserve donc son individualité propre quand on lui fait subir l'épreuve de la loupe et les mathématiciens désignent cette propriété sous le nom d'autosimilarité ou encore d'invariance d'échelle. Cette propriété très simple est aussi très fondamentale, car elle caractérise les structures fractales et nous sommes maintenant capables de les définir :

«Une structure est fractale si elle nous apparaît identique à elle-même quelle que soit l'échelle à laquelle on l'observe».

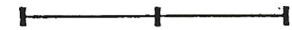
A partir des années 60, le mathématicien français Benoît MANDELBROT a développé la théorie des objets autosimilaires, montrant que ces objets avaient une dimension fractionnaire ; il les a baptisés fractals\* et ce nom possède un grand pouvoir de fascination car il évoque irrésistiblement des figures géométriques particulièrement esthétiques. Ceci nous amène tout naturellement à définir la dimension, d'abord en géométrie euclidienne classique, puis ensuite en géométrie fractale.

## LA NOTION DE DIMENSION

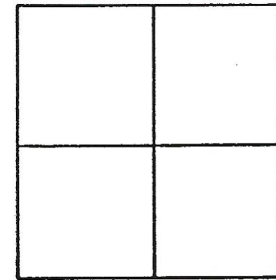
Depuis l'école primaire nous pratiquons sans trop bien le savoir la

\* Benoît MANDELBROT a choisi le mot fractal au masculin pour qu'il ait la même orthographe en français et en anglais, mais l'usage évolue vers le féminin parce que l'on pense plutôt à la structure qu'à l'objet.

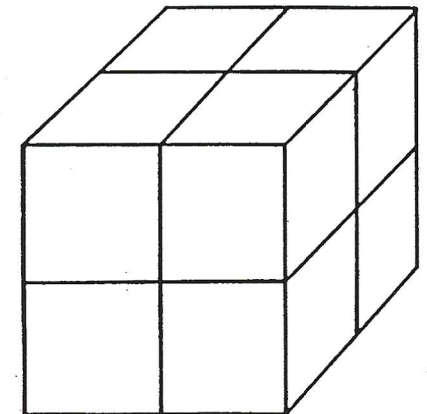
notion de dimension car on nous apprend que les longueurs se mesurent en mètre, les surfaces en mètre carré, et les volumes en mètre cube. Un peu plus tard, on nous dit que cela correspond à des dimensions 1, 2, et 3 ; mais on peut souhaiter définir le concept de dimension d'une manière un peu plus opérationnelle et nous allons le faire sur trois exemples (figure 5) :



Nombre de morceaux :  $m = 2$   
Rapport de similitude :  $s = 2$   
Dimension :  $d = 1$



Nombre de morceaux :  $m = 4$   
Rapport de similitude :  $s = 2$   
Dimension :  $d = 2$



Nombre de morceaux :  $m = 8$   
Rapport de similitude :  $s = 2$   
Dimension :  $d = 3$

Figure 5 : La dimension des objets euclidiens classiques est  $d = 1$  pour un segment de droite,  $d = 2$  pour un carré et  $d = 3$  pour un cube. D'une façon générale  $d$  est donné par la relation  $d = \ln(m) / \ln(s)$

- Divisons un segment de droite en deux segments égaux.

Le nombre de morceaux est  $m = 2$   
Le rapport de similitude est  $s = 2$   
La dimension est  $d = 1$   
 $m, s, \text{ et } d$  vérifient la relation  $m = (s)^d$

- Divisons un carré en quatre carrés égaux.

Le nombre de morceaux est  $m = 4$

Le rapport de similitude est  $s = 2$

La dimension est  $d = 2$

$m, s,$  et  $d$  vérifient la relation  $m = (s)^d$

- Divisons un cube en huit cubes égaux.

Le nombre de morceaux est  $m = 8$

Le rapport de similitude est  $s = 2$

La dimension est  $d = 3$

$m, s,$  et  $d$  vérifient la relation  $m = (s)^d$

La relation  $m = (s)^d$  a un caractère général qui permet de définir la dimension par la relation  $d = \ln(m) / \ln(s)$ . Cette dimension entière  $d$  est appelée dimension topologique par les mathématiciens.

## CANTOR, SIERPINSKI ET Menger

Maintenant que nous disposons d'une méthode de calcul de  $d$  nous allons nous demander s'il existe des objets pour lesquels la valeur de  $d$  n'est pas entière, mais fractionnaire. Le problème n'est pas nouveau puisque dès le début du siècle les mathématiciens avaient imaginé des objets difficiles à classer dans le moule euclidien habituel au point qu'ils étaient qualifiés de pathologiques. Le grand mérite de MANDELBROT est d'avoir montré que ces objets n'avaient rien de pathologique, mais, bien au contraire, qu'ils s'intégraient dans un grand ensemble d'objets autosimilaires dont la dimension  $D$  est fractionnaire.

L'exemple le plus simple de structure fractale est l'ensemble de CANTOR, connu depuis le début du siècle, et dont la règle de construction est très simple (figure 6) :

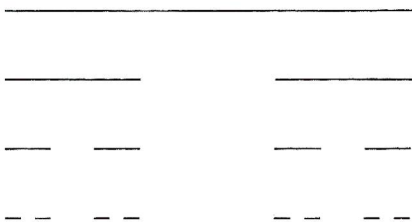


Figure 6 : L'ensemble de CANTOR est une structure fractale de dimension  $d = 0,6309.....$

- Partir d'un segment de droite de longueur  $a$ .

- Couper ce segment en trois morceaux égaux.

- Retirer le segment central.

- Recommencer cette opération sur les deux morceaux qui restent .....

Cette opération peut se poursuivre indéfiniment et elle génère un objet mathématique qui a deux propriétés géométriques caractéristiques :

- L'ensemble de CANTOR est auto-similaire. En effet, on passe toujours par la même opération d'un niveau donné au niveau immédiatement inférieur.

- L'ensemble de CANTOR a une dimension fractionnaire. En effet, si l'on applique la formule définissant la dimension, on a  $D = \ln(m) / \ln(s) = \ln(2) / \ln(3) = 0,6309...$

Cette dimension fractionnaire  $D$  est appelée dimension fractale par les mathématiciens. La dimension fractale est notée  $D$  car elle est toujours supérieure à la dimension topologique  $d$ .\*

L'ensemble de CANTOR a une structure fractale.

En s'inspirant de la méthode de construction de l'ensemble de CANTOR on peut construire d'autres structures fractales intéressantes :

- Le tapis de SIERPINSKI, qui nous apparaît comme une dentelle de dimension fractale  $D = \ln(8) / \ln(3) = 1,8928.....$  (figure 7).

- L'éponge de Menger, qui ne contient plus de matière, mais seulement des trous. Elle nous apparaît comme un gruyère ultraléger et sa dimension fractale est  $D = \ln(20) / \ln(3) = 2,7268.....$  (figure 8).

\* Lorsque l'on divise indéfiniment les segments de droite on obtient une infinité de points alignés appelée «poussière de CANTOR» ; la dimension topologique de ces points est  $d = 0$ . En revanche, la dimension fractale est  $D = 0,6309.....$  et l'on a  $D > d$ .

Cette exemple permet de mieux comprendre la définition précise des structures fractales donnée par les mathématiciens :

«Structure géométrique dont la dimension de HAUSDORFF-BESICOVITCH est supérieure à la dimension topologique» (voir GOUYET, cité en bibliographie).

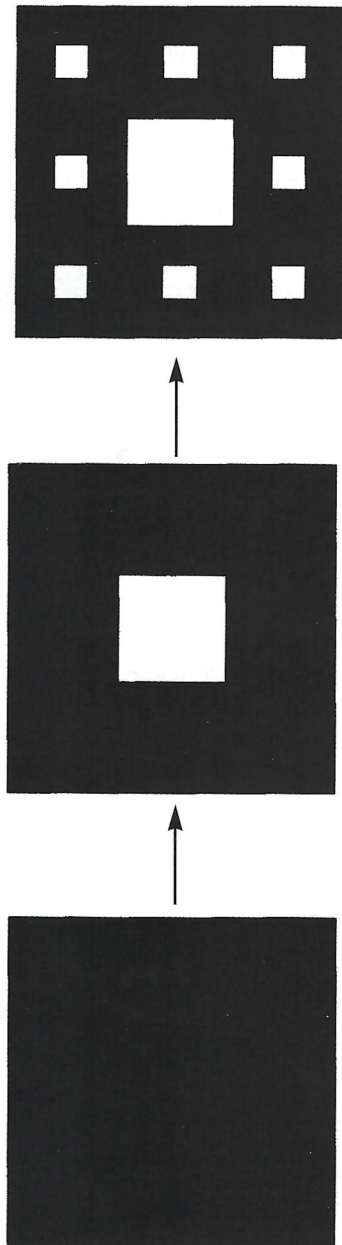


Figure 7 : Le tapis de SIERPINSKI est une structure fractale de dimension  $d = 1,8928.....$

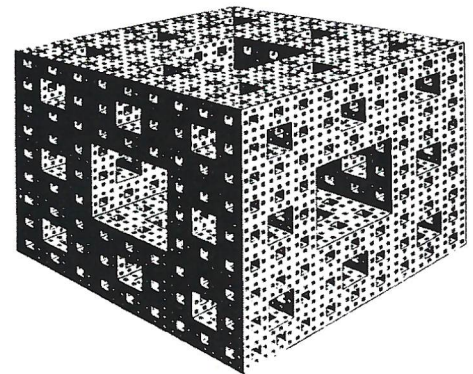


Figure 8 : L'éponge de Menger est une structure fractale de dimension  $d = 2,7268.....$

Enfin, l'imagination des mathématiciens étant sans limites, on connaît maintenant l'ensemble de MANDELBROT, qui résulte d'une loi itérative particulièrement simple  $Z_{n+1} = (Z_n)^2 + C$ , et qui est d'une richesse infinie (figure 9).\*

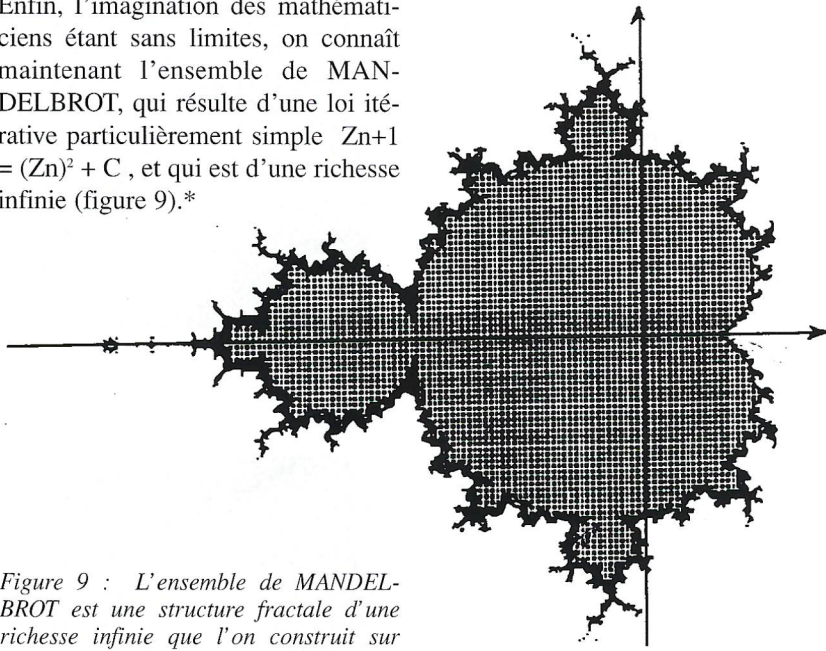


Figure 9 : L'ensemble de MANDELBROT est une structure fractale d'une richesse infinie que l'on construit sur ordinateur à partir d'une loi d'itération très simple  $Z_{n+1} = Z_n^2 + C$ .

Tous ces nouveaux objets mathématiques s'intègrent parfaitement dans le cadre de la géométrie fractale mais nous allons maintenant chercher des objets physiques entrant dans le même moule. Comme il s'agit cette fois d'objets réels, nous devons limiter nos exigences et rechercher une autosimilarité qui ne sera plus rigoureuse mais seulement statistique. Par ailleurs, cette autosimilarité ne s'étendra pas jusqu'à l'infini, comme en mathématiques, mais sera réduite à quelques ordres de grandeur (deux au minimum).\*\*

\* L'ensemble de MANDELBROT est l'ensemble des points du plan complexe d'affixe  $C$  tels que la variable complexe  $Z_{n+1} = Z_n^2 + C$ , d'origine  $Z_0 = 0$ , converge quand  $n$  entier tend vers l'infini.

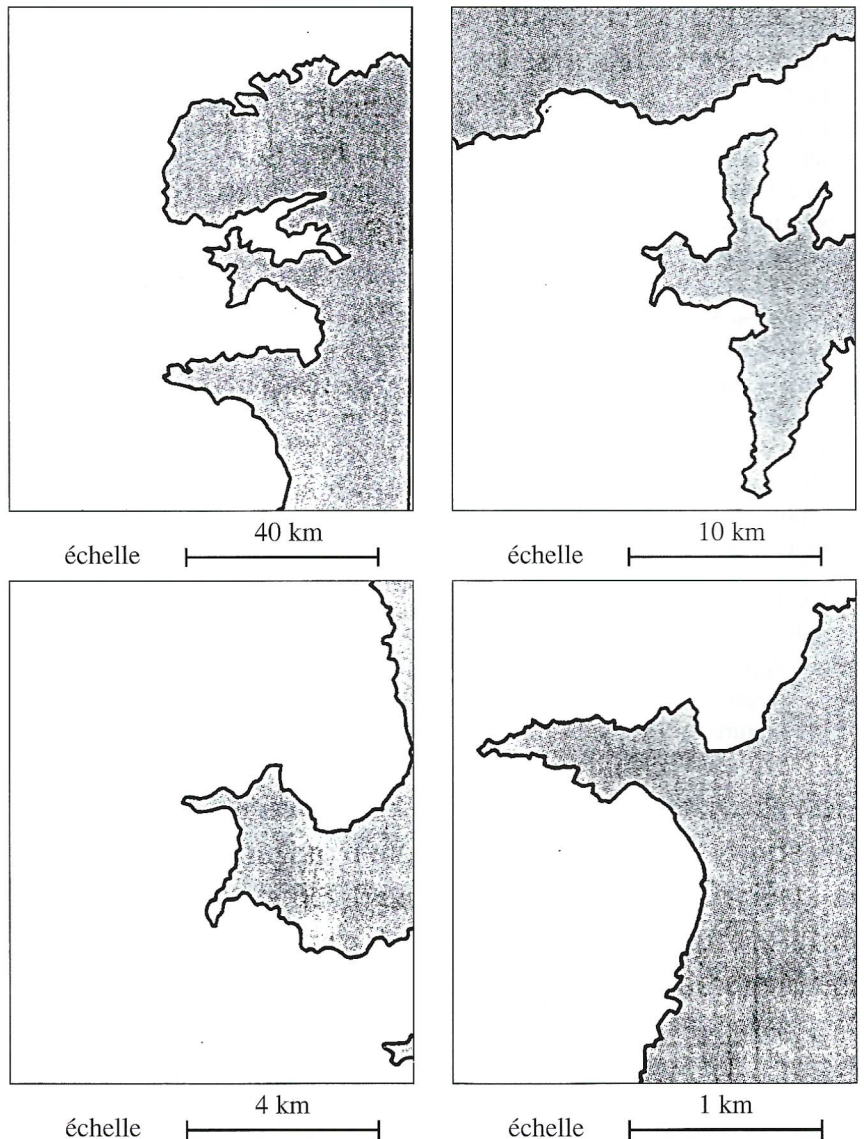
\*\* Pour de nombreux objets réels, on vérifie que la masse  $M$ , contenue dans une sphère de rayon  $R$  centrée sur l'objet, est proportionnelle à  $R^D$ . Ce résultat expérimental définit la dimension fractale de masse  $D$ . On peut vérifier sur la courbe de KOCH, affectée d'une densité linéique, que la valeur de  $D$  ainsi obtenue est bien la même que celle donnée par la relation  $D = \ln(m) / \ln(s)$ . (voir GOUYET, cité en bibliographie).

## LA COTE DE BRETAGNE

Voici un exemple d'utilisation de la géométrie fractale pour simuler un objet naturel :

Essayons d'imaginer les impressions d'un parachutiste largué à très haute altitude au dessus de la Bretagne et qui descend lentement vers le sol ; il suffit pour cela de regarder une suite de cartes géographiques d'échelle croissante. Toutes les cartes observées présentent toutes le même aspect : celui d'une côte très découpée avec des pointes et des creux (figure 10). Nous appellerons cela

Figure 10 : Les vues successives de la côte ouest de la Bretagne telles que observerait un parachutiste largué à très haute altitude au dessus de la presqu'île de Crozon. Toutes ces vues présentent le même type de contour très découpé ; c'est un bon exemple d'autosimilarité statistique.



une autosimilarité statistique qui, elle aussi, caractérise une structure fractale. La dimension fractale  $D$ , mesurable sur les cartes, est de l'ordre de 1,25.\*

Il est intéressant de chercher à se représenter la côte de Bretagne par un modèle géométrique simple et nous allons utiliser pour cela la courbe de KOCH dont voici la règle de construction (figure 11) :

- Tracer un segment de longueur  $a$
- Couper ce segment en trois morceaux égaux de longueur  $a/3$
- Remplacer le fragment central par deux morceaux de longueur  $a/3$
- On obtient une ligne brisée de longueur  $4a/3$
- On peut poursuivre ce processus indéfiniment ...

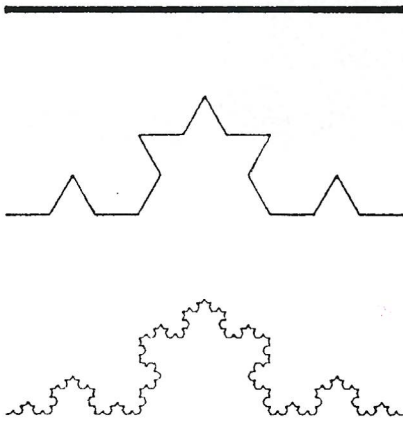


Figure 11 : La courbe de KOCH donne une bonne simulation d'une côte très découpée ; sa dimension fractale est  $d = 1,2618.....$

La courbe de KOCH a trois propriétés importantes :

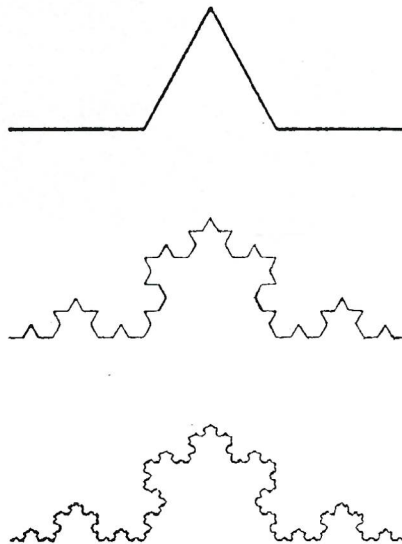
- Elle est autosimilaire
- Sa dimension fractale est  $D = \frac{\ln(4)}{\ln(3)} = 1,2618.....$
- Sa longueur est infinie \*\*

\* La mesure sur une carte de géographie avec une règle de longueur  $\varepsilon$  montre que la longueur de la côte est proportionnelle à  $\varepsilon^p$  avec  $p = 0,25$ . On en déduit la dimension fractale  $D$  par la relation  $D = (1 + p) = 1,25$ . (voir GOUYET, cité en bibliographie).

\*\* Les ouvrages de géographie donnent souvent la longueur d'une côte. Cette valeur n'est significative que si l'on précise la longueur de la règle servant à faire la mesure. Plus cette règle est courte, et plus la côte est longue ; si la règle est infiniment petite, la longueur de la côte est infinie.

Elle simule bien une côte très découpée et même, sa ressemblance avec la côte de Bretagne est frappante. Il serait possible d'avoir une simulation encore meilleure en modélisant cette côte avec une structure fractale statistique. Dans le même ordre d'idée on peut construire sur ordinateur des images de montagnes fictives qui sont d'un réalisme remarquable par la méthode suivante (figure 12) :

- Partir d'un plan
- Tracer une droite  $\Delta_1$  de position et de direction aléatoires
- Dégager une marche le long de  $\Delta_1$



- Recommencer cette opération avec une autre droite  $\Delta_2$  ...

Au bout d'un certain nombre d'itérations on obtient une surface très tourmentée, parfaitement adaptée à la simulation d'un relief montagneux. De plus, la dimension fractale caractérise la texture du relief : plus elle est élevée, plus la montagne est déchiquetée. Enfin, cette méthode de simulation est maintenant une composante incontournable de la technique des images de synthèse en trois dimen-

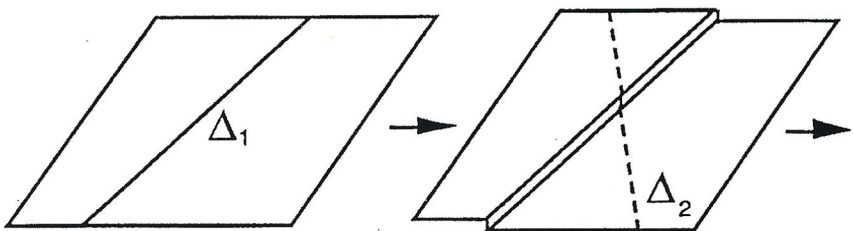


Figure 12 : Méthode itérative permettant d'obtenir une surface auto-affine irrégulière qui est une bonne simulation d'un relief naturel. On construit ainsi sur ordinateur des montagnes fictives qui paraissent aussi vraies que les vraies.

sions (imagerie 3D) ; elle est très utilisée par le cinéma et la télévision, chaque fois que l'on veut créer des effets spéciaux, et elle représente aujourd'hui la plus importante application pratique de la géométrie fractale.

## LE PARADOXE D'OLBERS

Voici maintenant un exemple où la géométrie fractale apparaît comme un guide pour la recherche :

Dès 1823 l'astronome allemand OLBERS s'était posé le problème de comprendre pourquoi le fond du ciel était noir pendant les nuits sans lune. A cette époque, on connaissait bien les étoiles, mais on ignorait encore l'existence des galaxies. On imaginait donc l'Univers comme un espace infini où les étoiles seraient réparties aléatoirement, mais avec une densité moyenne uniforme. Avec un tel modèle d'Univers, on peut montrer facilement que le fond du ciel devrait être très lumineux et qu'il nous paraîtrait blanc en pleine nuit (figure 13). Comme il n'en est rien, il convient donc de rechercher un autre modèle d'Univers en révisant au moins une des deux hypothèses d'OLBERS, l'espace infini et la densité uniforme. FOURNIER D'ALBE a proposé en 1907 un modèle d'Univers hiérarchisé de dimension fractale

$D = \frac{\ln(5)}{\ln(5)} = 1$  pour lequel le fond du ciel apparaîtrait noir (figure 14). Ce modèle est trop régulier pour être vraiment réaliste mais il apporte déjà l'idée intéressante en rejetant le concept de densité uniforme. On a démontré depuis qu'il suffit que l'Univers ait une structure fractale de dimension fractale inférieure à 2 pour que le fond du ciel soit noir et les

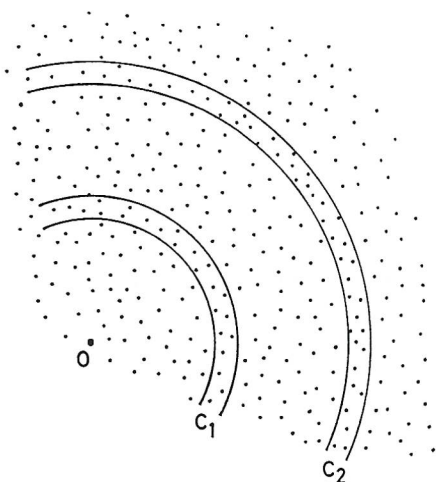


Figure 13 : Si l'on imagine que l'Univers est formé d'une infinité d'étoiles uniformément réparties il est intéressant de calculer l'intensité lumineuse reçue par l'observateur O. La couche sphérique de rayon R2 envoie en O la même quantité de lumière que la couche de rayon R1, et comme le nombre de ces couches est infini, l'observateur O devrait percevoir une intensité lumineuse considérable qui lui donnerait l'impression que le fond du ciel est blanc. C' est le paradoxe d'OLBERS.

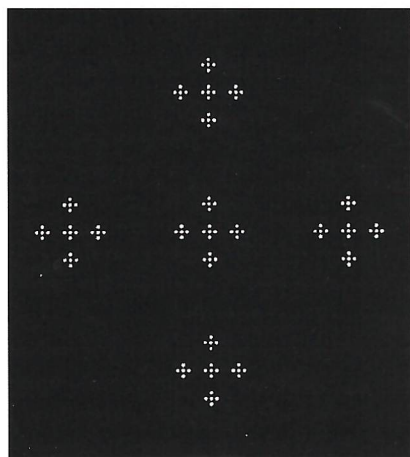


Figure 14 : Le modèle d'Univers de FOURNIER D'ALBE est un peu trop simple pour être vraiment réaliste, mais il a néanmoins le mérite de montrer que l'on peut imaginer des répartitions stellaires non uniformes pour lesquelles le fond du ciel apparaîtrait noir.

théoriciens travaillent dans cette voie. On attribue aujourd'hui à l'Univers deux propriétés fondamentales :

- L'Univers visible est fini : dans le cadre de la théorie de l'expansion de l'Univers les galaxies les plus lointaines qui nous restent accessibles sont celles dont la vitesse de fuite approche celle de la lumière.
- Les galaxies ne sont pas réparties uniformément dans l'espace mais sont groupées en amas (figure 15) :

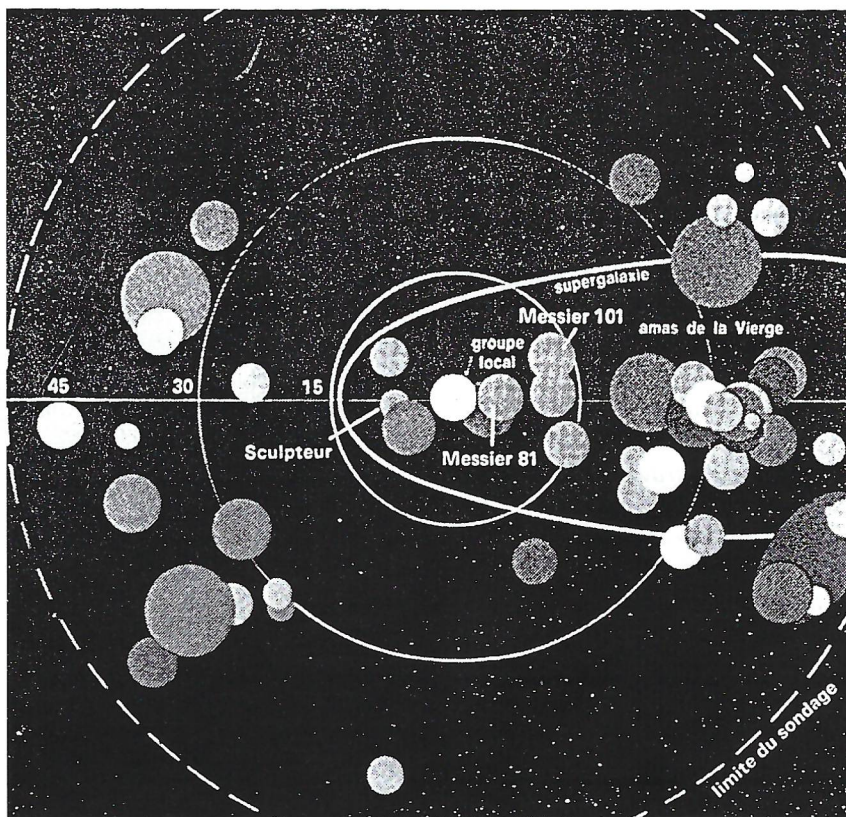


Figure 15 : Ce schéma représente nos connaissances actuelles sur la structure à grande échelle de notre Univers. On remarquera que la répartition des amas de galaxies n'est pas uniforme, mais hiérarchisée, et cela suggère l'existence d'une structure fractale qu'il reste à découvrir.

- a) Le groupe local, qui comprend une vingtaine de galaxies, dont la nôtre, et dont la taille est de 1 Mpc. \*
- b) L'amas de la Vierge, qui comprend quelques milliers de galaxies, et dont la taille est de 10 Mpc.
- c) Le superamas local dont la taille est de 20 Mpc.

Il n'est pas possible d'en dire plus pour le moment, mais la mise en évidence de ces amas de dimension croissante s'emboîtant les uns dans les autres suggère l'existence d'une structure fractale hiérarchisée que l'on pourrait confirmer en déterminant sa dimension. Pour cela il faudrait multiplier les mesures des très grandes distances qui sont des mesures longues et difficiles. La réponse ne pourra donc pas venir très vite mais les astrophysiciens y attachent beaucoup de prix car, si cette structure fractale pouvait être prou-

\* 1 Mpc = 1 Mégaparsec =  $3,26 \cdot 10^6$  année-lumière =  $3,06 \cdot 10^{19}$  kilomètre

vée, cela voudrait dire qu'il suffirait de connaître une petite partie de l'Univers pour le connaître tout entier, et cette idée est philosophiquement très intéressante.

## LES ARBORESCENCES

Voici enfin un exemple où la géométrie fractale permet la modélisation complète d'un phénomène physique : Les arborescences que présentent les figures de croissance cristalline, les dépôts électrolytiques, ou les étincelles électriques, sont des structures fractales naturelles particulièrement esthétiques. Leur dimension fractale a été mesurée et, de plus, on a bien compris maintenant le mécanisme qui les a fait apparaître : c'est le mécanisme DLA (Diffusion Limited Aggregation). En voici les éléments essentiels (figure 16) :

- Dans une géométrie plane et de révolution, la cristallisation va se faire à partir d'un germe central.
- Les sites accessibles par les atomes voisins sont schématisés par un quadrillage. Le côté du carré élémentaire définit une unité de longueur conventionnelle.



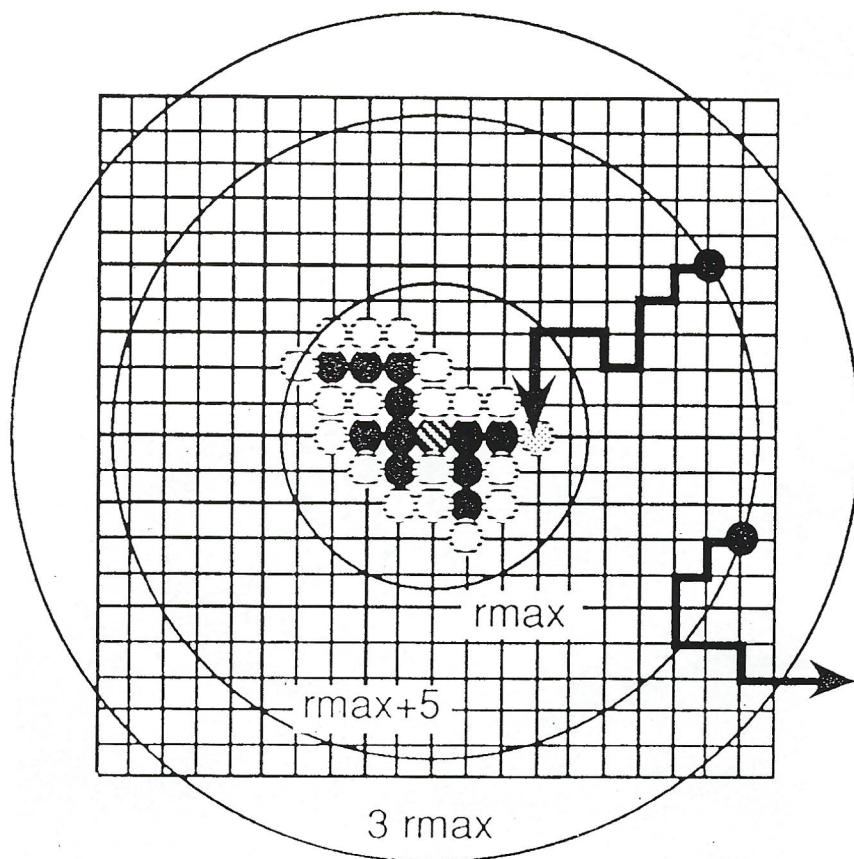


Figure 16 : Le mécanisme d'agrégation limitée par diffusion (en anglais DLA), tel qu'il est calculé sur ordinateur. Il conduit à la formation d'agrégats arborescents de dimension fractale  $D = 1,71$ .

- Les atomes éloignés vont venir s'agréger progressivement sur le germe et leur approche se fait par une trajectoire désordonnée qui résulte de l'agitation moléculaire (mouvement brownien).

- On simule ce mouvement sur ordinateur en prélevant aléatoirement les atomes sur un cercle de rayon  $R = 5$ , puis on leur impose un mouvement désordonné en les faisant sauter aléatoirement d'un carré à l'autre.

- Si, au cours de ce cheminement très tourmenté, l'atome dépasse le rayon  $R = 8$ , il est considéré comme définitivement perdu pour l'agrégation.

- Si, au contraire, l'atome reste en deçà de  $R = 8$ , il finira toujours par atteindre le germe, auquel il restera fixé.

- Ce processus favorise la formation de « bras » qui captent plus facilement les atomes en mouvement désordonné, et c'est ainsi que l'on explique l'apparition d'arborescences très développées.

Le calcul théorique donne une dimension fractale  $D = 1,71$  pour les structures arborescentes produites par le mécanisme DLA, et les mesures expérimentales donnent un résultat très proche de cette valeur (figure 17).

### L'AVENIR DES FRACTALES

Même en se limitant à la physique, il faudrait encore beaucoup de place pour présenter les applications de la géométrie fractale et nous contenterons de les citer : le chaos, la soudure des métaux, la structure du béton, la porosité des roches pétrolifères... mais il est temps d'aborder les conclusions.

Une nouvelle branche des mathématiques est née. Elle est l'oeuvre d'un mathématicien original, travaillant en dehors du grand courant du Bourbakisme, qui était alors le grand thème à la mode. Benoît MANDELBROT a su parfaitement allier le raisonnement mathématique avec l'utilisation de l'ordinateur et s'il est vrai qu'il a été le premier, beaucoup depuis l'ont suivi :

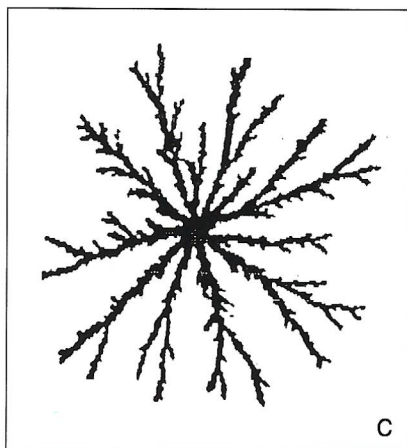
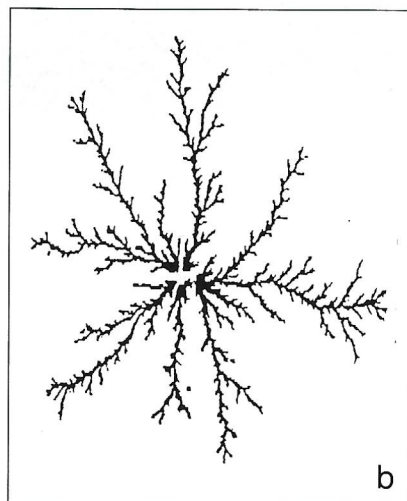
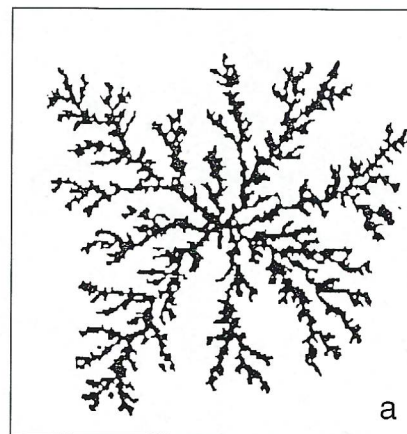


Figure 17 : Structures arborescentes formées par un mécanisme DLA :

a) Dépôt électrolytique de zinc métallique dans une couche mince d'électrolyte ; la dimension fractale est  $D = 1,63$ . (MATSUSHITA et al. 1984)

b) Un liquide peu visqueux, l'eau, est injecté au centre d'une cellule radiale contenant une solution très visqueuse de scléroglycane. Les lignes d'injection forment une structure fractale de dimension  $D = 1,7 + 0,05$ . (DACCORD et al. 1985)

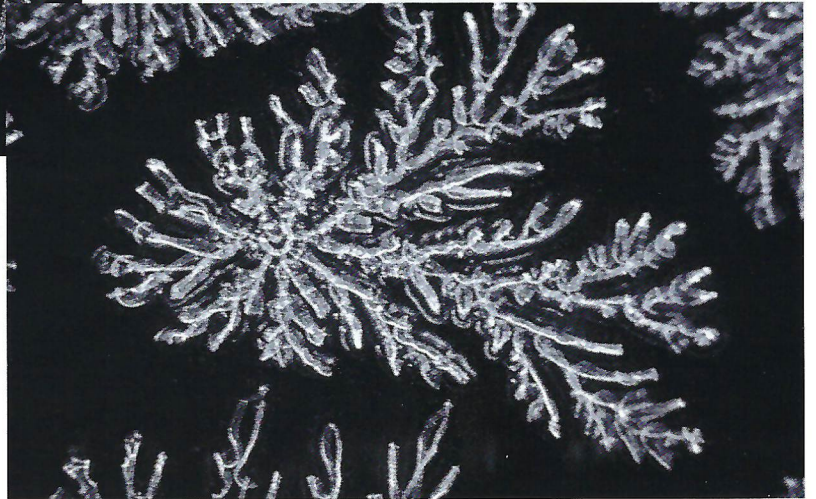
c) Résultat d'une agrégation limitée par diffusion simulée sur ordinateur. La dimension fractale est  $D = 1,71$ .



Croissances fractales de la famille dite D.L.A. (Diffusion Limited Aggregation), observées entre deux lentilles collées d'un vieil objectif photographique.  
La dimension fractale est voisine de 1,7.  
Indications fournies par Jean FORNAZERO, Université Claude Bernard à Lyon).

Photo R. JOUANISSON

▼ Détail



- Les mathématiciens, qui découvrent de nouvelles structures fractales et explorent leurs propriétés.

- Les physiciens, les chimistes, les biologistes, les géologues et les géographes, qui disposent maintenant, avec la géométrie fractale, d'un outil mathématique supplémentaire pour modéliser les nombreuses structures ordonnées présentées par la Nature.

- Les artistes enfin, qui ne pouvaient manquer d'être séduits par la beauté de certaines structures fractales, et qui ont pris plaisir à explorer les multiples arabesques de l'ensemble de MANDELBROT tout en les enrichissant de très belles couleurs.

Charles RUHLA  
Institut de physique nucléaire  
de Lyon  
43 boulevard du 11 novembre  
69622 Villeurbanne Cedex

Nous remercions les Editions Masson qui nous ont aimablement autorisés à reproduire les figures n° 4, 8, 9, 12, 15 et 16 extraites de l'ouvrage de J.-F. Gouyet : "Physique et structures fractales".

## BIBLIOGRAPHIE

- DACCORD G., NITMAN J. & STANLEY H.E.  
«Fractal viscous fingers...»  
Dans «On growth and form»  
(pages 203 à 210)  
Editions Stanley H.E. & Ostrowsky  
N., Martinus Nijhoff Dordrecht 1986

- GOUYET J.F.  
«Physique et structures fractales»  
Editions Masson Paris 1992  
(2<sup>e</sup> tirage corrigé 1996)

- HAYLI A.  
«Histoire de l'Univers»  
Editions Hachette Paris 1980

- MANDELBROT B.  
«Les objets fractals : forme, hasard et dimension»  
Editions Flammarion Paris 1984

- MANDELBROT B.  
«Comment j'ai découvert les fractals»  
La Recherche 175, 420 (mars 1986)

- MATSUSHITA M., SANO M., HAYAKAWA Y., HONJO H. & SAWADA Y.  
«Fractals structures of zinc metal.....»  
Physical Review Letters 53, 286, 1984

- RUHLA Ch.  
«La physique du hasard»  
Editions Hachette-CNRS Paris 1989

- SIVARDIERE J.  
«La symétrie en mathématiques, physique et chimie»  
Editions Presses Universitaires Grenoble 1995

- STEWART I.  
«Les chroniques de Rose Polymath : les fractals»  
Editions Belin Paris 1982

# La créativité (suite)\*

## Ou comment maîtriser l'art et la manière de trouver les meilleures idées de solutions à nos problèmes

Par Jean SIMON



**Jean SIMON,**  
Ingénieur Arts et Métiers,  
en retraite.

*A effectué toute sa carrière chez Michelin. D'abord comme chercheur en élaboration de matériaux, puis comme concepteur-développeur de produits, enfin comme formateur en connaissances sur les pneus et les véhicules, ainsi que sur l'efficacité personnelle et collective. C'est cette pratique qui l'a conduit sur les traces de la créativité.*

**A DEFAUT DE MIEUX, UN MODELE SEMI-EMPIRIQUE DE NOTRE CERVEAU**

N. HERRMANN a mis au point son modèle des dominances cérébrales à 4 quadrants, il y a une douzaine d'années. Il était responsable de formation en management chez General Electric, mais il était également sculpteur et peintre professionnel. Ce n'est pas un modèle physique rigoureux, mais un outil semi-empirique. La synthèse de mes lectures m'avait conduit, à cette époque, à un modèle personnel assez semblable. Modèle que je qualifiais de « portrait-robot » : mélange de certitudes, d'impressions, d'hypothèses plus ou moins osées, et d'erreurs.

**La distinction physique entre H.G.-H.D. est assez nette,** surtout au niveau C.G.-C.D. : le corps calleux, constitué de 200 à 300 millions de fibres, relie les 2 côtés. Des liaisons

Je rappelle, en guise de résumé de ce dernier, les titres de chapitres :

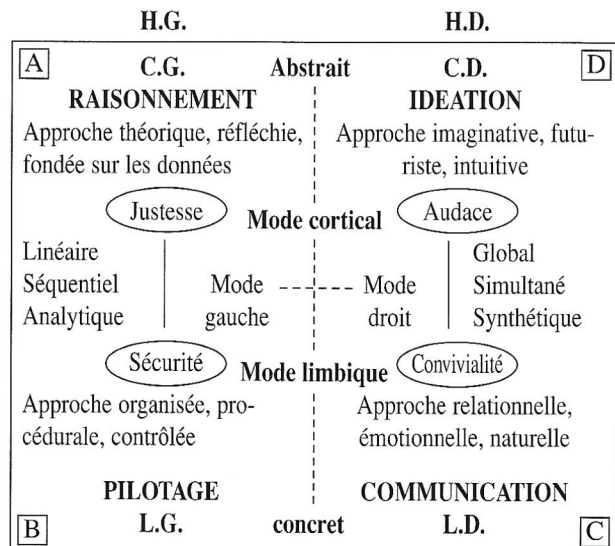
- un sujet longtemps tabou, une reconnaissance officielle récente
- se former en créativité : un investissement rentable
- usages différents de nos cerveaux, pourtant semblables
- l'illumination créative : une réaction de synthèse mystérieuse
- une condition nécessaire : quitter l'autoroute de notre pensée
- une méthode pour toutes les intelligences : 5 outils en série (le brainstorming, la synectique, la bionique, les matrices de découvertes, l'arbre des voies technologiques).

**J'apporte ici d'autres éclairages sur la créativité, plutôt théoriques et plutôt personnels.** Et de plus, comme ils ne relèvent pas toujours de la rigueur scientifique, ils n'engagent que moi. Mon objectif est de continuer de permettre au lecteur de découvrir et de consolider son propre périmètre de créativité. Et de l'inciter, pourquoi pas, à se former pour pratiquer... en famille, par exemple.

**Je vais m'efforcer de dégager des caractéristiques de la personnalité qui favorisent la créativité.** Mais que celles et ceux qui ne posséderaient pas ces caractéristiques se rassurent : l'éventail des outils est large et libre. Et qu'ils n'oublient pas l'effet d'entraînement dans les groupes hétérogènes !

*Cet article fait suite à celui du n° 34, de juin 95, d'Auvergne-Sciences*

- H.G.** = hémisphère gauche  
= C.G. + L.G.
- H.D.** = hémisphère droit  
= C.D. + L.D.
- C.G.** = cortical gauche
- L.G.** = limbique gauche
- L.D.** = limbique droit
- C.D.** = cortical droit



L.G.-L.D. existent également au niveau du système limbique (et associé), en particulier au niveau des thalamus et des hippocampes.

**Mais les distinctions physiques entre «mode cortical» et «mode limbique» restent floues tant à droite qu'à gauche.** Le mode cortical est localisé plutôt dans le néo-néo cortex (nouvelle nouvelle écorce), et plus particulièrement dans la zone préfrontale. Quant au mode limbique, pas de détails, on peut considérer que tout le reste du cerveau peut être mis à contribution. Ainsi que le corps de l'individu, qui prolonge son cerveau, ne serait-ce qu'au niveau de ses «antennes» réceptrices et émettrices !

**Le cerveau est un super système de systèmes complexes,** et il est donc bien prétentieux de vouloir le modéliser avec un nombre très limité de mots caractéristiques. Mais au niveau utilisation «grand public», comme cela a été mon cas pour la formation d'adultes, c'est un modèle de ce type qui convient bien. Et non une représentation plus juste, c'est à dire trop compliquée. Ce modèle à 4 quadrants, même s'il est grossièrement faux, naïf, caricatural, hyperréducteur, «farfelu, arbitraire, absurde, illégal...» (cf. «Les Sorciers Démolisseurs», forum de Sciences et Vie, 1989), a été pour moi et pour mes élèves un puissant tableau de bord, et stimulant, et inspirateur.

Je prends toujours le soin de tracer les cloisons des 4 quadrants en pointillés, pour bien montrer que «les cases sont communicantes». Il faut aussi noter que cette sorte de carte fonctionnelle du cerveau peut être différente chez 5% environ des gens : en particulier, les aires spécialisées du langage ne sont pas situées à gauche, mais à droite. Une activité mentale donnée sollicite en général, de manière synchrone, plusieurs zones. Et l'une d'entre elles est parfois dominante pour la tâche considérée.

**Je vais maintenant passer en revue les 4 quadrants,** dans l'ordre croissant de mes préférences actuelles.

**Mode cortical gauche** - Analyse et construction linéaire abstraites  
Raisonnement logique, fortement influencé en Occident par Socrate, Platon, Aristote, Descartes... et par l'informatique. Domaine des langues alphanumériques, et de leurs systèmes formels avec leurs symboles abstraits, leurs vocabulaires, leurs grammaires, leurs axiomes, leurs règles d'inférences, leurs théorèmes, etc...

Pensée «descendante», convergente, déductive, «froide» (en principe découplée des émotions primaires).

**C'est le mode dominant de nos programmes scolaires.** C'est le mode dominant, par nécessité, des spécialistes, des experts. C'est le domaine des applications des mathématiques, des calculs numériques. **Mais attention à la créaticidité !** Notre cerveau est admirable pour inventer, mais sublime pour critiquer ! Notre C.G. est tellement sûr de lui qu'il n'accepte pas les déviations et ce qu'il croit être des erreurs. **Mais il peut se faire piéger dans sa logique,** surtout si le champ de conscience est étroit.

**D'où l'histoire des 2 grenouilles** qui étaient tombées, chacune, dans un pot à moitié rempli de lait. La 1ère, à C.G. dominant, a vite compris que les lois de la physique ne lui permettaient pas de sortir du pot. Elle connaissait, entre autres, pour ses calculs, le nombre de Reynolds du lait de vache cru à 20°C. Elle s'est donc laissée mourir. La 2ème, à C.G. de niveau 3 dans l'échelle d'Herrmann, a essayé désespérément de s'accrocher à la paroi lisse. Elle s'est débattue, débattue... jusqu'à ce que le lait se transforme en beurre ! Après un repos bien mérité, elle a sauté hors du pot, en prenant appui sur la motte de beurre, qui flottait sur le petit lait. A ce jour, elle est encore vivante !

Le mode C.G. excelle dans la **préparation** de la résolution d'un problème. Un outil puissant, mais assez lourd : **l'Analyse de la valeur** (voir par exemple le livre [42] de G. Delafollie). On commence par faire une Analyse Fonctionnelle du Besoin, qui conduit à l'écriture d'un

Cahier des Charges Fonctionnel. Ensuite, on passe à l'Analyse Fonctionnelle de la Solution Existante. Puis on compare les résultats actuels avec le cahier des charges : les écarts nous montrent où sont les vrais problèmes. Enfin, on recherche la Meilleure Solution, et c'est là que les Techniques de Créativité sont les bienvenues !

**L'Analyse de la Valeur** a été inventée et mise au point en 1947 par D. MILES, directeur des achats chez General Electric. La méthode a été utilisée par l'armée américaine à partir de 1954, qui l'a rendue obligatoire, sous l'impulsion de Mac Namara dans les années 60. Et c'est au Japon qu'elle s'est le plus développée et ce, dès les années 50. Cet outil collectif permettait, en effet, de compenser la faiblesse (relative) des Japonais en analyse abstraite. En France, la méthode est un peu utilisée dans les grandes entreprises. C'est une méthode heuristique (de eurêka). Enfin il a été vu que ce mode C.G. convenait bien pour la Bionique, pour les Matrices de Découvertes et pour le démarrage des Arbres des Voies Technologiques. Au sujet des matrices de découvertes, il faut signaler l'apport important du Professeur A. MOLES, à partir de 1952. (Voir [53]).

**Mode limbique droit** - Synthèse et construction globale concrètes

Communications naturelles non verbales avec son corps, avec les autres et avec l'environnement. Emotions primaires. Normalement l'H.D. gère la moitié gauche de notre corps, et l'H.G. la moitié droite. **Mais c'est l'H.D. le super intendant, le dominant pour notre corps.** Par exemple l'anosognosie désigne l'incapacité d'un patient à se percevoir comme malade, lorsqu'une aire cérébrale droite bien particulière est défaillante. Même s'il est complètement paralysé du côté gauche !

Domaine du visio spatial, des images concrètes et familières, des formes, des mouvements, des expressions artistiques, de la musique... de la reconnaissance des visages.

C'est le mode le plus ancien dans l'évolution de l'Homme. Les informations sensorielles «brutes» arrivent par là, et sont éventuellement distribuées dans les autres sites pour traitements spécialisés.

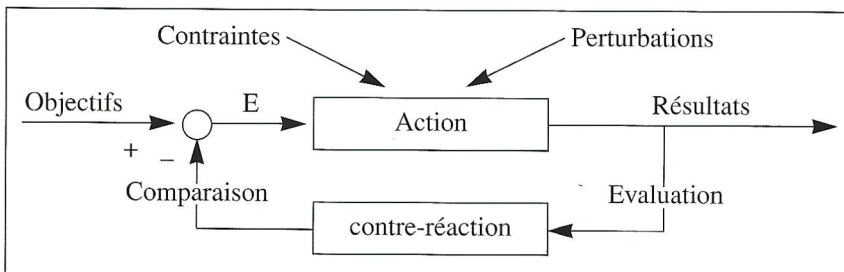
Ce mode est sollicité dans la phase dite d'**incubation** (ou de rumination). Malheureusement, cette phase peut être fatale pour les personnes confrontées à de graves problèmes.

Il est également utilisé au tout début de ma méthode à 5 outils, c'est à dire au début du brainstorming. Les participants (ou le chercheur solitaire) se «purgent» des premières idées globales communes, connues, toutes faites. **Et parfois de très bonnes idées arrivent très vite.** C'est le moment de «vider ses tripes» et de «faire parler son coeur». Chapeau rouge de de BONO. A ce sujet, ce dernier signale que sa méthode des 6 chapeaux a permis de réduire de 75 % le temps des réunions chez IBM !

**Mode limbique gauche** - Analyse et construction linéaire concrètes  
Pilotage, au sens cybernétique, me semble être un mot clé très fort de ce mode.

Il est (en principe) tenu compte de l'aspect rationnel du voisin intime C.G., et de l'aspect émotionnel et affectif de l'autre voisin intime L.D.

**Il est surtout tenu compte des règles personnelles de conduite, et des règles socioculturelles.**



Tout cela induit l'organisation, les procédures, les méthodes, la déontologie, le contrôle, la prudence, la sécurité, l'ordre, la discipline, le «bons sens», la loi, les recommandations, la robustesse, la stabilité, la qualité, l'éthique...

C'est le mode obligatoire des gestionnaires, des administrateurs. **Il est hautement souhaitable qu'il soit utilisé à la fin du processus créatif.** Dans ma méthode, il intervient pour trouver les idées détaillées concrètes de l'Arbre des Voies Technologiques, pour mettre de l'ordre dans toutes les idées trouvées, pour trier et pour choisir suivant des critères de valeurs. Il intervient aussi, ensuite, pour organiser les essais de validations, et pour organiser et réaliser la solution retenue.

La méthode séquentielle à 5 outils que je propose pour les débutants relève elle-même de ce mode, et doit normalement rassurer les dominants L.G. pour s'aventurer sur les traces de la créativité.

Le célèbre neurologue A. DAMASIO raconte dans son livre récent [41] **l'histoire tragique de P. GAGE.** Ce jeune homme, très estimé, était chef d'équipe dans les travaux de construction de voies ferrées dans le Vermont. Et en 1848, il a été victime d'un cruel accident. Une fausse manoeuvre a enflammé la poudre qu'il tassait au fond d'un trou. La détonation a propulsé sa barre à mine pointue de 6 kg à 30 m du trou, après avoir traversé sa tête depuis sa joue gauche jusqu'au dessus du crâne. Et miraculeusement GAGE a survécu 13 ans. Une barre de fer de 3 cm de diamètre et de plus de 1 m de long avait traversé son H.G. ! Il avait conservé toutes ses facultés physiques, et **presque** toutes ses facultés mentales.

Après l'accident, il n'a plus pris en compte les conventions sociales, a ignoré la morale au sens large du terme et pris des décisions qui ne servaient pas au mieux ses intérêts ! **Il était devenu incapable de gérer sa vie et sa survie, de programmer ses**

**actions dans l'avenir et de prendre les bonnes décisions.** Il a fait plusieurs métiers, sans s'y tenir, et il a terminé dans la déchéance. **Son mode L.G. était en grande partie détruit de manière irréparable !** Dans une réunion utilisant la méthode des «six chapeaux pour penser», GAGE aurait été incapable de participer en «chapeau bleu».

Voici donc, où se situe, approximativement le centre de **validation** de nos idées... et aussi, de pilotage de notre main droite.

**Mode cortical droit** - Synthèse et construction globale abstraites.

Idéation, mais aussi analogie, approximations, arts abstraits, changement, conception, conceptualisation, créativité, exploration, généralisation, globalisation, imagination, induction, métaphore, modélisation, schématisation, stratégie, symbolisation...

Pensée «ascendante», divergente, inductive.

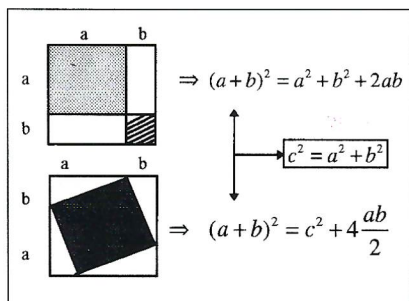
C'est le parent pauvre de notre éducation, de notre culture. Et pourtant, ce mode ne produit pas que du «flou artistique» ! **Il constitue très probablement le creuset de l'élaboration de l'illumination de la créativité** (la «lueur fulgurante» de P. VALERY et le «flash inventif» d'A. MOLES).

Ce mode est souvent marginalisé, en Occident, par nos pensées cartésiennes (C.G.) et tayloriennes (L.G.). Nous avons beaucoup de métiers d'analystes, mais très peu de «synthétistes». **Comment fait donc notre cerveau pour faire émerger des idées globales, plus ou moins intuitives, de son «bouillon de culture», de sa «soupe d'images mentales» ?** On ne sait pas. Et notre C.G. voudrait bien savoir !

N'en déplaise à notre H.G., **sachons provoquer les mouvements browniens de nos images mentales.** D'où le brainstorming (tempête de cerveaux, remue-méninges), la synecque et la bionique, pour ce mode

mental peu connu et atypique. La dominance de ce mode est-elle localisée effectivement dans notre néo-néo cortex droit ? Peut-être. A. DAMASIO indique dans son livre [41] que les lésions bilatérales des lobes frontaux, ainsi que la leucotomie préfrontale (incisions chirurgicales), entraînent, entre autres, une perte d'originalité et de créativité chez les patients. Découvertes rationnelles (C.G.) et intuitions fulgurantes (C.D.) peuvent être originales... La méthode proposée doit favoriser les deux, et non les mettre en concurrence.

**Nos H.G. et nos H.D. doivent se respecter et s'aider, et non se neutraliser.** «Si une partie du cerveau cherche une solution à un problème pendant que l'autre veut montrer qu'elle est inadaptée, le résultat ressemblera à une lampe de poche dont la moitié des piles sont montées à l'envers». L. de BRABANDERE - Paradoxe de la créativité, article de [36].



**J'aime beaucoup cette démonstration, sans parole, du théorème de Pythagore.** Elle fait intervenir, en collaboration, notre C.G. et notre C.D. Elle aurait été trouvée par un moine Hindou au sixième siècle. Mais le théorème aurait été trouvé, lui, par les Babyloniens, un millénaire avant Pythagore.

Tout ce que vous venez de lire, dans ce chapitre, n'est qu'approximations provisoires et révisables.

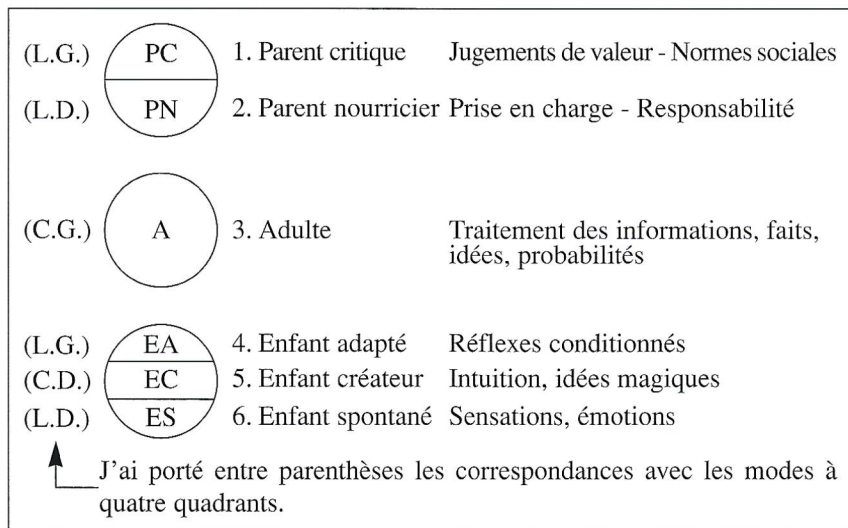
**PROTEGEONS "L'ENFANT CREATEUR" DU "PARENT CRITIQUE"**

L'Analyse Transactionnelle (l'A.T.), considérée comme une philosophie de la personnalité, a été inventée aux

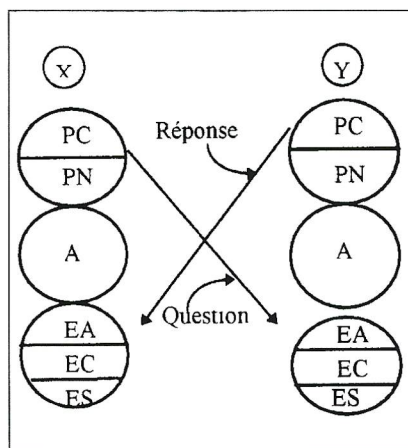
Etats-Unis, vers 1958, par le docteur E. BERNE. Voir, par exemple, le livre [51] de V. LENHARDT.

**horizontales sont recommandées.** Autrement dit, il est préférable de communiquer avec les mêmes modes

**Voici une représentation de l'analyse fonctionnelle du «MOI».**



Chacun des états du MOI comporte un aspect positif et un aspect négatif.



**Une transaction est une unité d'échange bilatéral** entre deux états du MOI de personnes différentes X et Y. C'est l'unité de rapport social.

X peut émettre de  $6 \times 6 = 36$  manières différentes. Et Y peut répondre de 36 manières différentes, lui aussi.

Ainsi, la simple unité de rapport social peut se présenter de  $36 \times 36 = 1\ 296$  façons différentes, sans tenir compte des aspects positifs et négatifs... qui ne sont pas forcément les mêmes pour X et pour Y ! Sans précaution de la part de X et de Y, que de risques de mauvaises transactions !

**Les transactions parallèles et complémentaires, et non cachées, et**

cérébraux, et avec les mêmes approches comportementales. Bravo pour les «six chapeaux pour penser» de de BONO ! J'ai lu au Canada, de cet auteur, mais en anglais «Six paires de chaussures pour agir».

**CARACTERE ACTIF, SOUPLE, LARGE ET ALLOCENTRIQUE = CREATIVITE FACILITEE**

R. LE SENNE, [52], a réactivé la **caractérologie**, qui sommeillait depuis la pensée hellénique (DEMOCRITE, HIPPOCRATE, GALIEN). Il a exploité, en particulier, les 2 523 réponses à une enquête comportant 90 questions, et formulée au début du siècle. Cette enquête, pilotée par le psychologue G. HEYMANS et par le psychiatre E. WIERSMA, relative aux caractéristiques des caractères des personnes sondées, a été menée sur le terrain par des médecins hollandais et allemands.

**Propriétés constitutives fondamentales.**

Il s'agit de l'émotivité, de l'activité et du retentissement.

**L'émotivité est l'aptitude à être ébranlé par des événements dont l'importance est minime.** Elle

Mars 1996

# Le centenaire de la découverte de la radioactivité

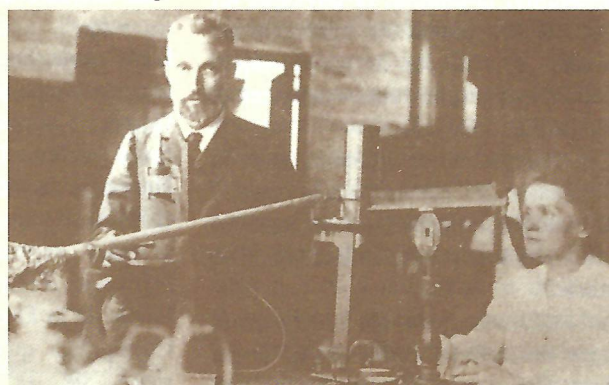
Le centenaire de la découverte de la radioactivité sera célébré avec un certain éclat dans toute la France. Un Haut Comité National chargé de coordonner l'ensemble des manifestations s'est mis en place. La célébration de ce centenaire se déroulera en fait sur trois ans, de 1996 à 1998. Pendant cette période seront organisées, à l'initiative des comités locaux, des conférences et animations diverses, notamment dans les établissements scolaires.

Le comité régional "Auvergne" s'est mis en place le 1er février. Il est coprésidé par le Doyen MEYNIEL et le Professeur MONTRET, (le professeur Louis AVAN étant président d'honneur) et animé par Alain FALVARD du laboratoire de physique corpusculaire de l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand. Plusieurs commissions se sont mises au travail et se penchent notamment sur les actions à mener dans les lycées, dans les médias et auprès du grand public.

En ce qui concerne les lycées plusieurs documents et matériels seront fournis par le Haut Comité National.

L'ADASTA s'est naturellement mise à la disposition du comité local pour apporter son aide à cette manifestation, sous diverses formes. C'est ainsi que nous publions ci-dessous un supplément spécial destiné à montrer le rôle joué par la radioactivité, tant sur le plan scientifique

Pierre et Marie Curie dans le hangar de la rue Lhomond - Découverte du polonium - 1898.



que dans le domaine des applications. La partie scientifique de ce document a été réalisée par Messieurs :

R. BIMBOT (CNRS - IN<sub>2</sub>P<sub>3</sub>)  
G. COHEN-TANNOUJJI (CEA-DSM)  
T. DAMERVAL (CEA-DSV)  
E. KLEIN (CEA-DSM)  
P. RADVANYI (CNRS-IN<sub>2</sub>P<sub>3</sub>)

Nous les remercions vivement de nous avoir autorisés à reproduire leur texte.

## Introduction

Les rayons X ont été découverts par ROENTGEN en novembre 1895 (quelques semaines avant que les frères LUMIERE projettent leur premier film), la radioactivité par Henri BECQUEREL trois mois plus tard, en mars 1896, l'électron par J.J. THOMSON en Angleterre en 1897 et le radium par Pierre et Marie CURIE en 1898. Cette série de découvertes dans laquelle trois des principaux acteurs sont français a profondément influencé l'histoire de la physique mais aussi celle du monde.

La découverte de la radioactivité marque un tournant capital dans

Des tirés à part de ce document peuvent être obtenus auprès de l'ADASTA (prière de joindre 20 francs pour frais d'envoi).

Pour tout renseignement, s'adresser à  
A. FALVARD - LPC  
UFR Sciences  
63177 AUBIÈRE Cedex  
Tél. 73 40 72 92

l'évolution, non seulement de la pensée scientifique, mais de la civilisation. La matière, que l'on croyait jusque-là immuable, peut se désintégrer ; elle apparaît périssable, changeante. Dans ce processus, les atomes se manifestent un à un. Le temps semblait indéfini et infini, il devient brusquement mesurable, il se déroule dans un sens unique. Il n'y a pas que les hommes qui naissent et prennent de l'âge, l'univers aussi est soumis à la loi du temps qui passe. La décroissance de la radioactivité est une hor-

loge quasi universelle, il devient ainsi possible de mesurer l'âge de l'univers, celui du système solaire, de l'apparition de la vie sur la Terre, on peut dater aussi bien une œuvre d'art qu'un squelette ou l'eau des calottes glaciaires, etc. L'atome, tel qu'il surgit de la découverte de la radioactivité, n'est pas seulement une source quasi inépuisable d'énergie, c'est aussi l'origine d'une remise en question de la vision traditionnelle du monde, de la matière et du temps.

Cette découverte capitale a donné à la plupart des sciences un élan qui, après un siècle, ne s'est pas ralenti. La médecine, la chimie, la physique en ont été les premières bénéficiaires, bientôt suivies par la géophysique, l'astrophysique, les autres sciences et l'industrie.

Les traceurs radioactifs sont, avec la diffraction des rayons X, à la base de la biologie moléculaire et de la révolution biologique du milieu du XXe siècle.

La radiobiologie a élucidé la cinétique des cellules et des tissus. On ne peut plus imaginer aujourd'hui une médecine sans imagerie médicale.

La radioactivité a fait progresser la radiothérapie avec le radium puis avec les isotopes radioactifs artificiels (cobalt, iridium). Ceux-ci ont également joué un grand rôle dans le développement de l'exploration fonctionnelle.

Enfin, l'énergie nucléaire est capable de faire face à tous les besoins du globe pendant plusieurs centaines d'années grâce au minerai d'uranium et, en France, elle produit déjà plus de 75 % de l'énergie électrique.

La célébration du centenaire de cette découverte offre l'occasion de diffuser largement une information complète et objective sur la nature physique de la radioactivité, sur les circonstances de sa découverte, et sur l'ensemble de ses applications.

Ce sujet présente un intérêt qui déborde le cadre strict de la connaissance scientifique et technique, tout d'abord parce que cette découverte a fortement marqué notre temps, mais aussi parce qu'elle représente une démarche exemplaire, typique de la démarche

de la recherche dans son ensemble, qui débouche sur un savoir nouveau et sur des applications qui deviennent la propriété de l'humanité et peuvent être mises à son service.

Les manifestations prévues devraient inciter les citoyens ou futurs citoyens à s'intéresser à la recherche passée et actuelle, à ses découvertes, et à mieux connaître l'usage qui peut en être fait. Elles devraient également fournir à chacun d'entre eux des éléments de culture scientifique et technique lui permettant de porter un jugement personnel sur les problèmes de société posés par les applications des découvertes scientifiques.

L'ensemble des actions prévues pour le centenaire a été recensé par le Haut Comité National : trois manifestations solennelles (à l'Académie Nationale de Médecine, à la Sorbonne et à l'Académie des Sciences), quatre grandes expositions (au Muséum National d'Histoire Naturelle) au Palais de la Découverte et à l'Institut Curie ainsi qu'une exposition itinérante de la Société Française d'Energie Nucléaire), quinze colloques scientifiques dans différentes villes de France, des conférences dans de nombreux collèges et lycées, des actions diverses dans les universités, et des évocations dans les lieux historiques.

### LA DECOUVERTE DE LA RADIOACTIVITE ET SES CONSEQUENCES

Jusqu'en 1895, l'hypothèse des atomes avait permis d'expliquer, d'une manière consistante et satisfaisante, les phénomènes physiques et chimiques au niveau macroscopique : il s'agissait encore des propriétés globales de la matière.

La découverte successive des rayons X, de la radioactivité et des électrons allait permettre de passer au niveau microscopique, c'est-à-dire d'étudier les atomes un à un et d'explorer leur structure. Cette mutation profonde allait d'abord être expérimentale.

A la fin de l'année 1895, à Würzburg en Allemagne, Wilhelm ROENTGEN

découvre les rayons X. Il envoie des copies de ses premiers clichés à plusieurs savants d'Europe. Henri POINCARÉ les montre à ses confrères lors d'une séance de l'Académie des sciences le 20 janvier 1896. Il émet l'hypothèse que l'émission des rayons X et la luminescence du verre du tube dont ils sont issus sont des phénomènes associés.

Henri BECQUEREL, spécialiste de la luminescence, qui assiste à cette séance, va s'efforcer de vérifier cette hypothèse ; il expose pour ce faire, au soleil, un sel phosphorescent d'uranium, préparé autrefois avec son père Edmond. Au cours de ces expériences effectuées dans son laboratoire du Muséum, il découvre, le 1<sup>er</sup> mars 1896, que le sel d'uranium émet spontanément un rayonnement pénétrant, qui impressionne les plaques photographiques, même en l'absence d'excitation par la lumière solaire.

Il constate par la suite que ce rayonnement est capable d'électriser (on dira par la suite "ioniser") l'air et que son intensité ne diminue pas au cours des mois suivants. Il montre que cette faculté d'émettre des rayons est une propriété intrinsèque de l'élément uranium ; il les appelle rayons uraniques.



Frédéric et Irène Joliot-Curie, en 1934, l'année de la découverte de la radioactivité artificielle, dans leur laboratoire et l'Institut du Radium

Au début de 1898, Marie CURIE commence dans un hangar de l'Ecole de Physique et Chimie un travail de thèse de doctorat sur les rayons de BECQUEREL. A l'aide d'une



chambre d'ionisation reliée à un électromètre et à un quartz piézo-électrique, elle examine systématiquement un grand nombre de composés chimiques et de minéraux, et découvre que les minéraux d'uranium, telle la pechblende, émettent plus de rayonnements que l'uranium lui-même.

Elle déduit de ce fait remarquable que ces substances contiennent, en très petite quantité, un élément beaucoup plus actif que l'uranium. C'est alors que Pierre CURIE joint ses efforts à ceux de sa femme pour parvenir à isoler l'élément radioactif inconnu et à en déterminer les propriétés. A cette occasion, Marie CURIE invente le mot radioactivité.

Pour réaliser cette séparation, ils ont recours aux méthodes traditionnelles de la chimie, mais parviennent à suivre et à concentrer le corps recherché à l'aide de son rayonnement dans les réactions chimiques successives. En juillet 1898, ils découvrent ainsi le polonium et, en décembre de la même année, le radium. A masse égale, le radium émet 1,4 million de fois plus de rayonnement que l'uranium ; c'était, à l'époque, le plus actif des radioéléments que l'on pouvait tout juste voir et peser.

Certains des rayonnements émis étaient très facilement absorbés : on les appellera rayons  $\alpha$  ; d'autres, plus pénétrants, étaient facilement déviés par un champ magnétique : on les baptisera rayons  $\beta$ . Un peu plus tard, P. VILLARD montra qu'il y avait également des rayonnements très pénétrants, non déviables, analogues aux rayons X, qui furent dénommés rayons  $\gamma$ . H. BECQUEREL et d'autres physiciens montrèrent que les rayons  $\beta$  étaient des électrons, particules qui avaient été identifiées en 1897, en Grande-Bretagne, par J.J. THOMSON. E. RUTHERFORD montra par la suite que les rayons  $\alpha$  étaient des atomes d'hélium épluchés de leurs électrons.

Ces rayonnements furent très rapidement utilisés en médecine et devinrent un outil extraordinaire pour l'exploration de la structure des atomes.

Henri BECQUEREL et Pierre et Marie CURIE reçurent conjointement

le prix Nobel de physique de 1903 pour leurs découvertes.

Mais d'où provenait donc l'énergie de ces rayons, en apparence inépuisable ? La réponse vint de Montréal où Ernest RUTHERFORD et Frédéric Soddy montrèrent expérimentalement, en 1902, que la radioactivité est une transmutation spontanée d'un élément chimique en un autre avec émission de rayonnement. Ces transmutations ont lieu plus ou moins rapidement, selon un temps caractéristique, que l'on appelle la période du radioélément.

Il fallait encore démontrer que le radium était bien un élément chimique comme un autre, l'isoler en quantité pondérable et déterminer son poids atomique. C'est ce que fit, à partir de plusieurs tonnes de matière première, Marie CURIE, qui se vit attribuer en 1911, à la suite de ce travail exténuant, un deuxième prix Nobel, de chimie cette fois...

### Implications

Les découvertes de Henri BECQUEREL et de Pierre et Marie CURIE eurent un très grand retentissement et des conséquences considérables par les connaissances nouvelles et les domaines nouveaux auxquels elles ont permis d'accéder et par les multiples applications qui en ont découlé.

Elles montrèrent que l'atome n'est ni immuable, ni insécable. Elles apportèrent, avec les particules alpha émises, un puissant moyen d'investigation de la structure de la matière et tout d'abord de l'atome. La science de la radioactivité fut le précurseur de la physique nucléaire et de la physique des particules. Trois interactions fondamentales, les interactions électromagnétique, nucléaire faible et nucléaire forte, sont à l'œuvre dans les phénomènes de radioactivité. Il faudra attendre la découverte du noyau par RUTHERFORD en 1911, les travaux de FERMI (1934) et ceux de YUKAWA (1935) pour que les deux dernières soient mises en évidence. Il faudra attendre 1983 et la découverte des bosons intermédiaires pour que la théorie expliquant le mécanisme de la radioactivité  $\beta$  reçoive une brillante confirmation expérimentale.

A la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, la physique, qui semblait avoir atteint le même degré de rigueur que les mathématiques, est entrée en crise. Il est apparu que les lois de la physique classique étaient inadaptées à la description du monde microscopique, et que des remises en cause fondamentales étaient nécessaires. Une durée de cent ans permet de prendre la mesure de la révolution conceptuelle qui est alors intervenue. La théorie de la relativité (restreinte puis générale) et la mécanique quantique allaient fournir le cadre capable d'englober l'ensemble des phénomènes physiques, sans la moindre contradiction avec les observations expérimentales. Ces deux théories allaient se développer de concert et, pour une part, au rythme d'un foisonnement de découvertes dont la radioactivité constitue l'un des premiers jalons. A la base de ces théories apparaissent les nouvelles conceptions du temps, de l'espace et de la masse, qui ne sont plus absolues, ainsi que la reconnaissance de l'impossibilité d'observer une particule microscopique sans lui communiquer un tant soit peu d'énergie. Il devient nécessaire de s'interroger sur l'imbrication du subjectif et de l'objectif dans le mouvement de la connaissance scientifique.

### PHYSIQUE NUCLEAIRE ET PHYSIQUE DES PARTICULES

La succession de découvertes qui ont marqué la fin du XIX<sup>e</sup> siècle (rayons X, radioactivité, électron) ont amené E. RUTHERFORD à mettre en évidence, en 1911, l'existence d'un noyau, chargé positivement au centre de l'atome. Cette découverte a conduit N. BOHR au premier modèle de l'atome (un noyau entouré d'électrons dans une configuration semblable à celle d'un minuscule système solaire). Elle a permis de jeter les bases du développement de la physique "atomique" (physique de l'atome) et de la physique "nucléaire" (physique du noyau) qui conduira dans les années 30 à la physique des particules. Ces disciplines se sont développées en intégrant les lois nouvelles de la mécanique relativiste (A. EINSTEIN)

qui régit le mouvement des corps très rapides, et de la mécanique quantique ou ondulatoire (M. PLANCK, L. de BROGLIE, W. HEISENBERG...) qui régit le mouvement des très petits objets.

### Evolution de la physique nucléaire et de la physique des particules

En ce qui concerne le développement de la physique nucléaire et de la physique des particules, on peut distinguer trois périodes :

- La première période, qui s'étend de 1896 à 1939, correspond à la découverte des phénomènes fondamentaux. Les derniers d'entre eux ont été en 1932, le neutron (J. CHADWICK, Manchester), qui a permis d'accéder à la représentation actuelle du noyau, comme un ensemble de protons et de neutrons, en 1934, la radioactivité artificielle (F. et I. JOLIOT-CURIE, Paris) qui a ouvert la voie à la synthèse des isotopes radioactifs dont les applications seront si précieuses, et enfin, en 1939, qui conduira aux applications énergétiques et militaires de l'atome (c'est-à-dire du noyau).

- La seconde période s'étend de l'immédiat après-guerre à la fin des années 60. Avec le développement des grands centres de recherche, elle a vu la construction d'accélérateurs de protons et d'électrons de plus en plus performants.

En physique nucléaire, ces nouveaux moyens ont permis d'étudier intensivement la structure nucléaire par collisions entre ces projectiles et toutes sortes de noyaux-cibles. Ces études ont principalement mis en jeu les techniques de spectroscopie nucléaires, représentant le noyau comme constitué de particules réagissant de façon indépendante (modèle des couches), ou collective (modèle collectif dérivé du modèle de la goutte liquide).

La physique des particules, discipline ayant émergé dans les années 30 de la physique nucléaire et de l'étude des rayonnements cosmiques, et dont l'objet est d'accéder à l'organisation la plus élémentaire de la matière (particules + forces) a pris

également son essor durant cette période. Les grands accélérateurs ont permis de découvrir un grand nombre de "particules nouvelles" ou "résonances" dont un classement rationnel a pu être effectué en 1964, par M. GELL-MANN et G. ZWEIG, grâce à l'hypothèse des quarks, sous-structures des protons et des neutrons, dont la première confirmation expérimentale sera obtenue à Stanford (USA) en 1969. En parallèle, les physiciens des particules travaillent sur le phénomène des forces, en essayant notamment de dégager les propriétés fondamentales des deux forces nucléaires (qui entrent en jeu dans la radioactivité), l'interaction forte et l'interaction faible.

- Enfin la troisième période, qui va des années 70 à nos jours, correspond à l'explosion technologique résultant des progrès de l'électronique et de l'informatique. Elle a vu s'instaurer de profonds changements, tant en physique nucléaire que dans la connaissance des particules élémentaires et des interactions fondamentales.

Les études de physique des particules ont confirmé, à la fin des années 60 et au début des années 70, que le proton et le neutron n'étaient pas des particules élémentaires, mais étaient constitués de quarks. Des expériences, sans cesse plus importantes, mettant en jeu des détecteurs de plus en plus performants, tels ceux de G. CHARPAK, ont permis de préciser les caractéristiques de ces constituants élémentaires et des forces qui les unissent, et d'élaborer le modèle standard de la physique des particules en vigueur aujourd'hui. Selon ce modèle, l'alphabet de la matière se résume à 12 particules, liées par quatre interactions fondamentales. Ces 12 particules "élémentaires" sont six quarks dont le dernier (le quark top) a été mis en évidence en 1995, et 6 leptons (3 leptons chargés semblables à l'électron et 3 neutrinos). Au sein d'un proton, les quarks sont liés par trois par l'interaction forte, qui se manifeste par l'échange de gluons, et aucune méthode actuelle ne permet de les séparer (confinement des quarks).

En physique nucléaire, la nature éminemment complexe du noyau, ensemble de 2 à 250 particules elles-mêmes composites, s'est imposée peu à peu. Les progrès des moyens techniques ont permis d'adapter les expériences et la théorie à cette complexité. En particulier, la montée en énergie des projectiles légers (protons) et l'utilisation de plus en plus courante de projectiles lourds ont modifié totalement l'approche expérimentale. L'importance des effets collectifs a conduit à considérer le noyau comme un échantillon de "matière nucléaire", une matière douée de propriétés très particulières que l'on cherche à déterminer de façon précise (thermodynamique de la matière nucléaire).

### Aujourd'hui

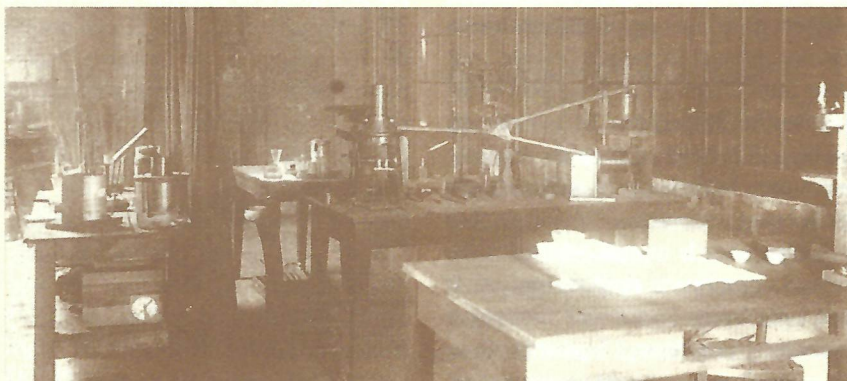
Seule une particule prévue par le modèle standard reste à découvrir. C'est le boson de HIGGS, nécessaire pour comprendre le mécanisme par lequel les particules acquièrent une masse. Sa création expérimentale requiert vraisemblablement une énergie jamais obtenue sur terre. C'est principalement en vue de mettre en évidence cette particule qu'un collisionneur aux caractéristiques inédites, le LHC (Large Hadron Collider) va être construit au CERN à Genève.

En utilisant comme projectiles des noyaux lourds de très haute énergie (ultra-relativistes), on cherche à produire un nouvel état de la matière nucléaire dans lequel les quarks et les gluons sont "déconfinés" et constituent un "plasma" (mélange quark-gluon) analogue à celui que l'on obtient en portant un gaz à haute température (mélange ions-électrons).

Le proton et le neutron sont constitués de trois quarks, particules actuellement considérées comme élémentaires, liés par des échanges de gluons. De tels ensembles de quarks, baptisés "hadrons", sont donc les édifices les plus simples existant dans la nature. L'étude des hadrons, soit libres, soit au sein des noyaux qu'ils constituent, est devenue, sous le nom de "physique hadronique", une branche commune à la physique nucléaire et à la physique des particules.

Pour étudier la matière nucléaire, on utilise des collisions de toutes sortes afin de porter les noyaux dans des états extrêmes, très éloignés de ceux des noyaux stables, et on étudie le devenir de ces objets éphémères. Il résulte notamment de ces études que la matière nucléaire pourrait très bien être le siège de changements d'états comparables à ceux qui existent pour la matière ordinaire (transition liquide-gaz, par exemple).

La synthèse de nouveaux noyaux a constitué un thème permanent de recherche consacré par l'introduction, à la fin des années 60, du terme "noyaux exotiques" qui désigne les noyaux très éloignés de la stabilité. Deux mille noyaux ont ainsi été synthétisés par l'homme depuis le premier isotope artificiel, en 1934. Pour renforcer l'arsenal des projectiles disponibles pour la physique nucléaire, on utilise désormais des faisceaux exotiques constitués de tels isotopes radioactifs. Un nouvel accélérateur de ce type de faisceaux (SPIRAL) est en construction à Caen.



L'intérieur du hangar de la découverte du polonium et du radium à l'Ecole de Physique et Chimie, vers 1900. On distingue l'installation de mesure comportant une chambre d'ionisation, un électromètre à quadrants et un quartz piézo-électrique.

### Astrophysique nucléaire et astroparticules

La connaissance des nombreux édifices nucléaires que constituent les noyaux exotiques a beaucoup apporté à la physique nucléaire, mais également à l'astrophysique car ces isotopes sont souvent des intermédiaires indispensables dans les chaînes de réactions nucléaires conduisant à la synthèse de tous les éléments existant dans l'univers (nucléosynthèse). De plus, les théories astrophysiques actuelles sur la genèse de l'Univers

supposent que la matière s'est structurée progressivement à partir d'un "gaz" primitif de quarks et de leptons, en donnant naissance à des entités de plus en plus complexes (hadrons, puis noyaux). Ces théories, qui doivent expliquer les propriétés actuelles des galaxies, étoiles, et planètes, dépendent fortement de celles des particules et des noyaux, ce qui conduit à un rapprochement entre la physique de l'infiniment grand et celle de l'infiniment petit.

## APPLICATIONS ENERGETIQUES

### Energie nucléaire

#### Fission

L'énergie nucléaire est localisée dans les noyaux des atomes. Ces noyaux, cent mille fois plus petits que les atomes eux-mêmes, sont constitués de protons et de neutrons, très fortement liés entre eux. De même que la liaison des atomes en molécules est la source de l'énergie chimique, la liaison au sein des noyaux, des protons et

donnant naissance à deux noyaux de masses plus faibles. Lors de ce processus, deux ou trois nouveaux neutrons sont émis et de l'énergie est libérée. Ces neutrons peuvent à leur tour briser d'autres noyaux d'uranium 235, qui donneront naissance à d'autres neutrons qui briseront d'autres noyaux qui... Cette multiplication alimente une réaction en chaîne, capable de provoquer la fission d'un nombre considérable de noyaux. L'énergie libérée est énorme. Elle est utilisée pour produire de la vapeur d'eau et entraîner une turbine et un alternateur. Dans les centrales nucléaires, la réaction en chaîne est contrôlée, c'est-à-dire stabilisée à un niveau donné.

Dans les bombes atomiques à fission, dite "bombe A", on vise au contraire à l'amplifier. La fission de tous les noyaux d'un kilogramme d'uranium produit autant d'énergie que la combustion de 2 500 tonnes de charbon.

La sécurité du fonctionnement des centrales nucléaires est un problème très important qui fait l'objet de beaucoup de précautions. C'est le domaine de la sûreté nucléaire. D'autre part, l'industrie nucléaire génère des déchets radioactifs. Des procédures de retraitement et de conditionnement de ces déchets ont été mises au point. Elles permettent de les trier en fonction notamment de leur période radioactive, afin de les stocker dans des lieux adaptés. Des recherches visant à éliminer les déchets à vie longue en les transformant en isotopes à vie plus courte se développent actuellement.

#### Fusion

Un autre processus nucléaire est envisagé pour produire de l'énergie. C'est la fusion nucléaire. Deux noyaux atomiques légers peuvent, en se fondant l'un dans l'autre, former un noyau plus lourd. Lorsqu'une telle réaction se produit, la masse du noyau final est moindre que la somme des masses des deux noyaux initiaux. En vertu de l'équivalence masse-énergie représentée par la célèbre équation d'Einstein  $E=mc^2$ , un tel "déficit de masse" se traduit par une libération d'énergie, encore plus élevée que celle que peut donner une réaction de fission. Les réactions de fusion ont lieu entre des noyaux chargés positivement. Elles

ne se produisent que si la répulsion électrostatique entre ces noyaux est vaincue, ce qui suppose que le milieu soit porté à une température très élevée. Voilà pourquoi l'on dit de la fusion qu'elle est une réaction "thermonucléaire". De telles réactions thermonucléaires sont à l'œuvre dans le soleil et dans les étoiles. Ce sont elles qui donnent son extraordinaire puissance à la bombe à l'hydrogène (bombe H).

Alors que la fission des noyaux lourds d'uranium est entrée dans le domaine industriel, la fusion contrôlée, beaucoup plus difficile à obtenir, n'est pas encore maîtrisée. Les espoirs de production d'énergie reposent actuellement sur la réaction de fusion entre le deutérium et le tritium, deux isotopes de l'hydrogène. Cette réaction aboutit à la formation d'un noyau d'hélium et à la libération d'un neutron. L'énergie qu'elle engendre est emportée sous forme d'énergie cinétique par les produits de la réaction. Pour produire de l'énergie par la fusion, il faut maintenir le mélange de deutérium et de tritium à une température de l'ordre de cent millions de degrés.

Dans ces conditions, les électrons ne sont plus liés aux noyaux, et la matière est sous forme d'un gaz d'ions et d'électrons libres, appelé plasma. Pour former ce plasma et le conserver à une température aussi élevée, il faut lui fournir de l'énergie. Si l'on veut parvenir à une production nette d'énergie, celle qui est dégagée par les réactions de fusion au sein du plasma doit être supérieure à celle qui est nécessaire pour obtenir et entretenir les conditions thermonucléaires où elles peuvent avoir lieu.

## LA DATATION

Les éléments radioactifs sont de véritables chronomètres permettant, d'une certaine façon, de remonter le temps. Des méthodes de datation sont aujourd'hui fondées sur la décroissance progressive de la radioactivité contenue dans les vestiges que l'on souhaite dater.

Grâce au carbone 14, on peut remonter jusqu'à des dizaines de milliers d'années dans le passé. Le carbone entrant dans la composition de la



*Ex-Voto, provenant de la Source des Roches à Chamalières (Puy-de-Dôme), daté par la méthode du carbone 14.*

molécule constitutive du gaz carbonique, présent dans l'atmosphère, est très répandu dans notre environnement. Ce carbone est constitué principalement de carbone 12, qui est stable, et d'une très faible proportion de carbone 14 qui est radioactif avec une période de 5 730 ans. Les divers échanges (respiration, photosynthèse, alimentation) qui se produisent entre l'atmosphère et le monde "vivant" ont pour effet d'équilibrer le rapport entre la quantité de carbone 14 et celle du carbone 12. Mais, dès qu'un organisme meurt, le carbone 14 qu'il contient n'est plus renouvelé puisque les échanges avec le monde extérieur cessent. Sa proportion se met alors peu à peu à diminuer. La mesure du rapport carbone 14/carbone 12 permet donc de connaître la date de la mort d'un organisme bien après que celle-ci ait eu lieu. Moins il reste de carbone 14 dans un échantillon à dater, et plus sa mort est ancienne. Le produit de désintégration ultime de l'uranium 238 (période de 4,47 milliards d'années) est le plomb 206 stable. Il est donc possible de déterminer l'âge des roches anciennes par la mesure du rapport plomb 206/uranium 238 à condition de connaître la quantité de plomb à l'origine. Plus il y a de plomb, plus la roche est vieille. D'autres couples d'isotopes, tels le rubidium 87 - strontium 87, ont été utilisés à cette même fin. L'âge de la Terre a été ainsi estimé à 4,55 milliards d'années.

## APPLICATIONS A LA BIOLOGIE, LA MEDECINE ET L'AGRONOMIE

Aucun domaine de la biologie, de la médecine, de l'agriculture, n'aurait atteint le niveau de connaissance et de maîtrise qu'on leur connaît aujourd'hui, sans l'utilisation de la radioactivité.

### Recherches biologiques

Le développement de la biologie au cours du XXe siècle a très largement reposé sur l'exploitation de deux grands types de propriétés du noyau atomique et des rayonnements : d'une part, le fait que les différents isotopes d'un atome possèdent la même structure électronique, et par conséquent les mêmes propriétés chimiques et donc biologiques. En revanche, les atomes radioactifs peuvent être détectés, localisés et même dosés à distance. L'invention du cyclotron et la découverte de la radioactivité artificielle ont permis l'accès au marquage de nombreuses molécules organiques par le tritium, le carbone 14, le soufre 35, le phosphore 32, etc.) Cette notion de marquage et de traceurs isotopiques est essentielle. Elle a donné un essor considérable à l'étude des grandes fonctions du vivant, de la cellule à l'organisme entier et est à la base de l'imagerie médicale moderne. D'autre part, le fait que les rayonnements (rayons X, faisceaux de neutrons) possèdent de faibles longueurs d'onde, de l'ordre du dixième de nanomètre. Cette propriété permet l'étude d'objets de taille très réduite : alors que les plus petits objets visibles en microscopie optique (lumière visible) sont les cellules et que ceux observables en microscopie électronique sont les constituants cellulaires assemblés, la diffraction des rayons X ou la diffusion neutronique permet d'analyser les formes des molécules. Ces analyses d'ultrastructures moléculaires sont aujourd'hui la base de la biologie structurale, qui a connu un développement très important au cours des dernières années.

### L'ADN, support de l'hérédité, et le code génétique

En 1943, AVERY montrait, en utili-

sant des bactéries et le marquage isotopique, que l'ADN (acide désoxyribonucléique) était le support de l'hérédité. En utilisant des bactéries qu'ils cultivèrent pendant plusieurs générations dans un milieu contenant un sel d'ammonium marqué par de l'azote 15, MESELSON et STAHL purent suivre le devenir de la molécule d'ADN à chaque division cellulaire. Ils démontrèrent ainsi en 1952 que cette longue molécule, portée par les chromosomes, était reproduite à l'identique à chaque division cellulaire. Le patrimoine génétique contenu dans l'oeuf qui a donné naissance à chacun de nous se retrouve ainsi présent dans les quelque 9 milliards de cellules qui forment l'organisme adulte.

En 1953, c'est la diffraction des rayons X qui permit à WATSON et CRICK (prix Nobel quelques années plus tard) d'élucider la structure extrêmement complexe de la molécule d'ADN : une double hélice formée de deux longues chaînes enroulées en rubans. Les vingt années suivantes vont permettre, toujours grâce au marquage isotopique, de découvrir les grands mécanismes de fonctionnement du vivant : détermination du code génétique, caractérisation des réactions chimiques assurant le fonctionnement cellulaire, compréhension des mécanismes énergétiques du vivant (photosynthèse, respiration, fermentation...). Dans les années 1970, cette extraordinaire moisson de découvertes a conduit à l'avènement de la biologie moléculaire et du génie génétique.

### *Hormones et médiateurs du système nerveux*

Des messagers chimiques, les hormones (comme l'insuline), et les médiateurs du système nerveux, coordonnent l'activité des milliards de cellules qui nous composent. Toutes ces substances sont présentes à de très faibles concentrations et agissent, comme une clé sur une serrure, sur des récepteurs qui leur sont spécifiques. Seule la radioactivité artificielle a donné la possibilité de suivre ces molécules depuis leur lieu de production jusqu'à celui de leur action, d'isoler les récepteurs et d'étudier la

transmission du message à l'intérieur des cellules.

Dès 1944, Frédéric JOLIOT, Robert COURRIER, Alain HOREAU et Pierre SUE réalisaient au Collège de France la première synthèse d'une hormone marquée par un radioélément artificiel, la thyroxine (produite par la glande thyroïde) marquée par de l'iode 131.

Ces recherches se sont multipliées, en France comme à l'étranger, au cours des années 1960 et 1970, et ont permis de découvrir les principales classes de neuromédiateurs et d'hormones. C'est ainsi, par exemple, que certaines toxines de venin de serpent marquées au tritium, ont permis d'étudier les récepteurs de l'acétylcholine, l'un des principaux médiateurs du système nerveux. La mise en évidence, dans certaines régions du cerveau, de sites liant spécifiquement la morphine radiomarquée, a conduit à la découverte d'une nouvelle classe de neuromédiateurs, les enképhalines.

### **Médecine : diagnostic, exploration clinique et thérapie**

#### *Les dosages immunologiques*

En 1977, S. BERGSON et R. YALOW recevaient le prix Nobel de physiologie et médecine pour une technique qu'ils avaient mise au point en 1966 : le dosage d'une hormone, l'insuline, à l'aide d'anticorps radiomarqués. Les anticorps sont des molécules très spécifiques produites par tout organisme animal en réponse à l'introduction d'une molécule étrangère donnée qu'ils sont capables de reconnaître parmi des milliers d'autres. Cette caractéristique fut mise à profit pour doser des molécules biologiques à l'aide de radioéléments artificiels couplés à l'anticorps. Par leur sensibilité extrême, les dosages radioimmunologiques ont permis de doser des molécules aussi importantes que des hormones (par ex. insuline dans le diabète, tests de grossesse...), des médicaments, des agents pathogènes (bactéries, virus) dans des prélèvements de liquides biologiques (sang, urine...). Aujourd'hui, des méthodes de marquage utilisant la fluorescence ou des

enzymes ont remplacé la radioactivité dans la plupart des laboratoires d'analyse médicale mais le marquage radioactif reste souvent utilisé pour mettre au point les tests de diagnostic avant leur commercialisation.

### *La radiographie et le scanner à rayons X*

La radiographie médicale, qui utilise les rayons X, est la méthode d'imagerie médicale la plus répandue (recherche de fractures osseuses, par exemple, ou mammographie pour le dépistage du cancer du sein).

Des images plus précises sont obtenues grâce au scanner à rayons X, qui permet d'obtenir des coupes des organes de certaines parties du corps (crâne par exemple) et est utilisée pour la localisation fine de lésions. Radiographie et scanner X fournissent des informations sur la forme des organes et sur la présence d'anomalies morphologiquement détectables, mais ne donnent que peu d'informations sur les fonctions. Ces dernières ne sont accessibles que grâce à l'imagerie médicale fonctionnelle.

### *Médecine nucléaire et imagerie médicale fonctionnelle*

Ces techniques sont basées sur le marquage isotopique : un radioélément ou une molécule marquée sont introduits dans l'organisme et un système de caméras (gamma caméra) couplées à des ordinateurs, détectent hors du corps le rayonnement  $\gamma$  émis (scintigraphie). Il est ainsi possible de suivre la progression de la radioactivité dans la circulation, de visualiser un organe et d'en étudier le fonctionnement, selon la répartition du traceur et l'évolution de sa concentration. Tous les isotopes radioactifs ne sont pas utilisables chez l'homme. Ils doivent émettre un rayonnement  $\gamma$  suffisant mais décroître rapidement pour ne pas délivrer une dose trop élevée (iode 123, technétium 99, thalium 201...).

Des émetteurs de positons sont également utilisés. Le positon est l'antiparticule de l'électron. Dès qu'un positon rencontre un électron, tous deux se désintègrent instantanément en deux photons  $\gamma$ . Ces photons sont détectés

par une couronne de capteurs (caméra à positons). Les données obtenues permettent de reconstituer l'image de l'organe en fonctionnement (tomographie par émission de positons). Compte-tenu de la courte période radioactive des émetteurs de positons intéressants pour les études médicales (de 2 à 20 minutes), il est nécessaire de les fabriquer dans un cyclotron sur les lieux même de l'examen. Les radioéléments les plus fréquemment utilisés sont le carbone 11, l'azote 13 et l'oxygène 15.

Dès 1939, J et E. LAWRENCE démontrèrent l'intérêt de l'iode radioactif dans l'exploration de la glande thyroïde. La thyroïde, qui synthétise des hormones iodées, capte de façon très élective les molécules d'iode présentes dans le sang ou apportées sous forme d'iodure par l'alimentation. Il est ainsi possible, après administration de faibles doses d'iode 123, d'obtenir une scintigraphie de la thyroïde reflétant la distribution de la radioactivité au sein de l'organe. Les anomalies se traduisent soit par des modifications du volume de la glande (goitre), soit par la présence de nodules.

La scintigraphie osseuse est réalisée après injection de sels de phosphate marqués au <sup>99</sup>Tc (technétium). Comme le calcium, ses sels se fixent dans l'os, en particulier lorsque celui-ci est en voie de remaniement. Toute zone pathologique se traduira donc par une hyperactivité locale. La scintigraphie osseuse permet ainsi de détecter, de façon plus précoce et plus précise que la radiologie, les lésions infectieuses ou tumorales. C'est en particulier un examen important pour le dépistage d'éventuelles métastases osseuses pour des cancers comme ceux du sein ou de la prostate.

L'une des applications majeures de la médecine nucléaire concerne les informations qu'elle apporte sur le fonctionnement et le métabolisme du coeur, sans nécessiter d'intervention traumatique.

L'angioscintigraphie cavitaire par exemple, consiste à administrer au patient du technétium 99m (période de six heures), émetteur de rayons  $\gamma$ . Le technétium se fixe sur les globules

rouges et permet de suivre les flux sanguins et de mesurer la quantité de sang éjecté à chaque contraction cardiaque.

La tomographie par émission de positons permet l'étude fonctionnelle du cerveau : la consommation de glucose et le débit sanguin cérébral sont les données les plus fréquemment mesurées. Elles permettent de détecter les zones actives du cerveau pour mieux comprendre les bases de son fonctionnement : localisation des aires du cortex cérébral impliquées dans l'écoute, le langage, le calcul, la mémoire, le mouvement... L'évaluation et la compréhension des mécanismes d'action des médicaments employés dans le traitement de certaines affections neurologiques sont également possibles.

Dans tous les cas, les doses délivrées pour examens médicaux sont très faibles (voir l'encadré).

En radiologie par exemple, la dose moyenne délivrée aux gonades est de 0,04 mSv pour une radiographie du thorax, de 1,5 mSv pour une radiographie du bassin et de 6 mSv pour le rein. En médecine nucléaire, une scintigraphie thyroïdienne correspond à une dose moyenne de 2mSv et une scintigraphie osseuse à 4mSv.

#### Effets du rayonnement et radioprotection

Qu'ils proviennent du cosmos, de la radioactivité, ou d'appareils à rayons X, les rayonnements peuvent avoir une action sur l'organisme. Les effets engendrés dépendent de la dose reçue (voir ci-dessous), et il convient de ne pas exposer les personnes à des doses trop élevées. C'est le domaine de la radioprotection. Des normes internationales ont été établies et font l'objet de révisions périodiques.

#### Radiothérapie

Le principe de la radiothérapie est d'appliquer des doses élevées et concentrées sur un organe ou une partie d'organe présentant une tumeur, afin de détruire les cellules cancéreuses. L'irradiation ne doit pas endommager les tissus voisins et est par conséquent focalisée sur la tumeur.

*L'énergie cédée à la matière par un rayonnement ionisant s'exprime en gray (Gy). Un gray est égal à une énergie absorbée de 1 joule/kg. Selon le type de rayonnement, les effets produits dans la matière vivante sont différents. Pour en tenir compte, un facteur de pondération WR, lié à la nature du rayonnement, est introduit dans le calcul de la "dose équivalente". Cette dernière est exprimée en sievert (Sv) : dose équivalente (en Sv) = dose absorbée (en Gy) x WR. La valeur de WR est égale à 1 pour les rayonnements X, gamma et bêta. Elle varie entre 5 et 20 pour les neutrons, selon leur énergie, et est de 20 pour les rayonnements alpha. A titre indicatif, la dose équivalente liée aux expositions d'origine naturelle (rayonnements cosmiques, matériaux terrestres) est évaluée à 2,40 mSv par an et par habitant en France.*

*Elle varie toutefois selon la localisation géographique. L'irradiation naturelle représente environ 61% de la dose reçue annuellement, la radioactivité naturelle contenue dans les molécules du corps humain 6%, les examens médicaux 30% et les activités industrielles (centrales nucléaires et sources radioactives utilisées dans l'industrie) 2% et les retombées des essais nucléaires aériens réalisés jusqu'au début des années soixante 1%.*

*Echelle médicale simplifiée donnant des effets précoces en cas d'irradiation corporelle totale instantanée :*

*300 mSv : aucun signe clinique  
1000 mSv : nausées, vomissements, asthénie, chute des lymphocytes*

*7000 mSv : manifestations digestives, diarrhées, hémorragies*

*15 000 mSv : état de choc, manifestations neurologiques et cardio-vasculaires*

*30 000 mSv : dose supralétale*

#### La téléradiothérapie

La téléradiothérapie utilise des rayonnements pénétrants produits par une

source plus ou moins éloignée du patient. Un premier type d'appareil utilise le rayonnement  $\gamma$  des sources de cobalt 60, d'une énergie moyenne de 1,25 MeV.

La source est enfermée dans une tête d'irradiation qui délimite un faisceau réglable par un diaphragme. D'autres appareils utilisent des accélérateurs de protons ou d'électrons dont l'énergie peut varier entre 5 et 25 MeV.

La téléradiothérapie peut être utilisée seule pour certaines tumeurs (certains cancers de la peau par exemple) mais elle est le plus souvent employée en association avec la chirurgie ou d'autres traitements.

### La curiethérapie

La curiethérapie utilise des sources radioactives appliquées directement au contact des cellules cancéreuses. Les aiguilles de radium, initialement utilisées, ont été remplacées par l'iridium 192 et le césium 137, plus maniables et moins dangereuses.

L'iridium se présente sous forme de fils en platine iridié, d'un diamètre inférieur à 0,5 mm. Il est introduit dans une aiguille ou un capillaire en plastique, qui ont été au préalable mis en place au contact de la tumeur.

Le césium se présente, quant à lui, sous forme de grains de quelques millimètres de diamètre en céramique. Ces grains sont introduits dans des gaines métalliques placées à proximité de la tumeur.

## BIOLOGIE VEGETALE ET AGRONOMIE

### Biologie végétale

Comme en physiologie et en médecine, la méthode des indicateurs nucléaires a considérablement fait progresser les connaissances en biologie végétale. Le carbone 14 a permis d'élucider en quelques années les principaux mécanismes responsables de la capture photosynthétique du dioxyde de carbone. Le phosphore 32 a été utilisé pour évaluer la fraction des ions phosphate du sol effectivement disponibles pour la plante, et l'on sait aujourd'hui que l'agriculteur a intérêt à limiter l'apport d'engrais aux quantités strictement nécessaires à la récolte.

### Agronomie

En agronomie, les techniques nucléaires ont fourni des outils importants pour l'exploitation rationnelle des ressources en eau du sol : basé sur le ralentissement préférentiel des neutrons rapides par les atomes d'hydrogène de l'eau, l'humidimètre, ou sonde à neutrons, mesure avec précision l'humidité d'un sol.

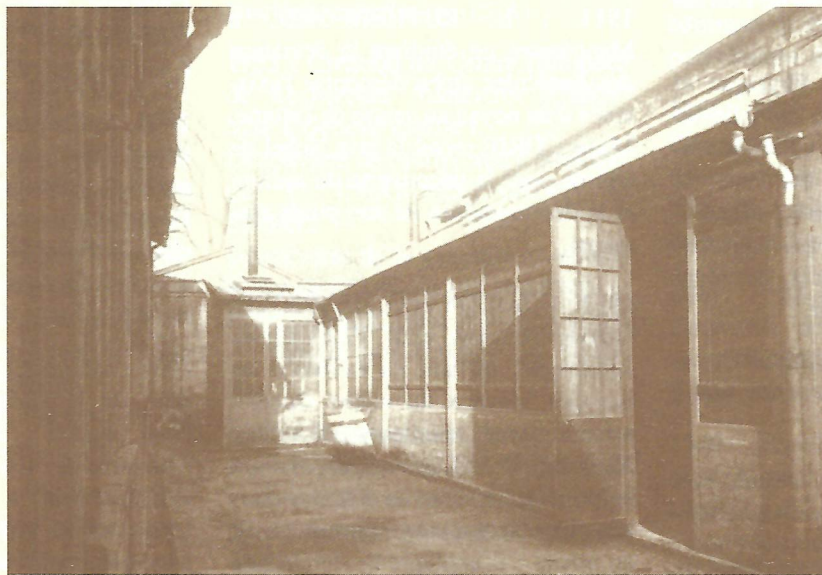
Les rayonnements gamma et leurs actions à fortes doses sur les organismes vivants ont été utilisés très tôt pour provoquer des mutations afin d'augmenter la variabilité d'espèces

végétales cultivées et faciliter les processus de sélection variétale. C'est ainsi, par exemple, que l'INRA obtint la variété de riz Delta adaptée à la Camargue.

La radiostérilisation d'insectes parasites a permis l'éradication du "screw-worm", parasite du bétail en Floride et au Texas dans les années 70 et, récemment, de la lucilie bouchère en Egypte et en Libye. Cette méthode de lutte consiste à lâcher dans la population naturelle d'insectes une forte proportion de mâles rendus stériles par irradiation, ce qui diminue fortement, jusqu'à quasi-disparition, la descendance des femelles. Cela permet de lutter à grande échelle contre le développement d'un insecte nuisible sans utiliser de produits toxiques.

L'ionisation des denrées alimentaires est un traitement qui permet d'assainir les aliments et d'en accroître la durée de conservation :

- inhibition de la germination : pommes de terre, oignons, échalotes...
- ralentissement de la maturation des fruits (fraise, tomate)
- destruction des micro-organismes et des insectes : légumes et fruits secs, salmonelles des volailles, pasteurisation des épices, stérilisation de la nourriture animale...



Le hangar de la découverte du polonium et du radium, vu de la cour de l'Ecole de Physique et Chimie, vers 1900.

# Annexe

## CHRONOLOGIE

La radioactivité n'a pas été inventée par l'homme. C'est un phénomène naturel qui existe depuis l'origine de l'univers et qui imprègne notre environnement quotidien.

En découvrant, il y a un siècle, ce phénomène jusque là insoupçonné, Henri BECQUEREL, puis Pierre et Marie CURIE ont fait franchir à l'esprit humain une étape décisive pour la compréhension du monde et ont ouvert la voie à la science moderne.

**1896** : A la suite de la découverte des rayons X par W. ROENTGEN en Allemagne, Henri BECQUEREL, au Muséum National d'Histoire Naturelle, à Paris, recherche si la fluorescence de certains corps est accompagnée par l'émission de rayons X. Il découvre ainsi, le 1er mars, que le sulfate double d'uranyle et de potassium émet un rayonnement pénétrant capable de noircir une plaque photographique. Il établit que ce rayonnement est émis par l'élément uranium.

**1897** : En Grande-Bretagne, J.J. THOMSON identifie l'électron en mesurant sa masse et sa charge. Il montre, parallèlement aux résultats obtenus par P. ZEEMAN et H.A. LORENTZ (Pays-Bas), que les électrons sont des constituants de tous les atomes.

**1898** : A l'Ecole de Physique et Chimie Industrielles de la ville de Paris, Pierre et Marie CURIE découvrent deux nouveaux éléments, le polonium, puis le radium, particulièrement "actifs" en ce qui concerne l'émission de rayonnement. Ils créent le terme de "radioactivité".

**1899** : E. RUTHERFORD, à Cambridge, identifie les rayons alpha et bêta.

**1900** : Paul VILLARD, à Paris, met en évidence le rayonnement gamma.

**1901** : A la suite d'une expérience de Pierre CURIE sur son propre bras, premières tentatives thérapeutiques

pour le traitement d'affections cutanées par les rayons du radium.

**1901/1904** : Jean PERRIN, et indépendamment H. NAGAOKA, imaginent que les atomes sont des systèmes solaires en miniature.

**1902/1903** : E. RUTHERFORD et F. SODDY, à Montréal, découvrent la loi des transformations radioactives : la radioactivité (a ou b) est la transmutation spontanée d'un élément en un autre par émission de rayonnement.

**1903** : Henri BECQUEREL ainsi que Pierre et Marie CURIE reçoivent le prix Nobel de physique pour la découverte de la radioactivité.

**1906** : Mort de Pierre CURIE (1859-1906).

**1906/1907** : Le théoricien allemand A. EINSTEIN établit l'équivalence masse-énergie ( $E=mc^2$ ). Cette équivalence expliquera notamment l'origine de l'énergie mise en jeu dans la radioactivité dans la fission.

**1908** : Mort d'Henri BECQUEREL (1852-1908).

**1909** : E. RUTHERFORD identifie la particule  $\alpha$  comme étant un noyau d'hélium.

**1911** : E. RUTHERFORD, à Manchester, en étudiant la déviation des particules alpha démontre l'existence d'un noyau au centre de l'atome. Marie CURIE reçoit le prix Nobel de chimie pour la découverte du radium et la détermination de son poids atomique.

**1913** : F. SODDY et G. HEVESY, en Grande-Bretagne, et K. FAJANS, en Allemagne, mettent en évidence les isotopes (noyaux du même élément ayant des poids atomiques différents). Niels BOHR, à Copenhague, élabore le premier modèle de l'atome dans lequel les électrons se meuvent autour du noyau ; il explique la stabilité de l'atome et prédit l'énergie des raies spectrales émises.

H.G.J. MOSELEY, assistant de E. RUTHERFORD, montre expérimentalement que le numéro atomique de la classification de MENDELEIEV correspond au nombre d'électrons de l'atome.

**1914** : Marie CURIE équipe des véhicules d'appareils de radiologie à rayons X qu'elle envoie au front. Ces "petites Curie" permettront aux médecins de première ligne d'effectuer plus d'un million de radiosopies sur des soldats blessés.

A l'initiative de l'Université de Paris et de l'Institut Pasteur, création de l'Institut du Radium (actuellement partie de l'Institut Curie) associant recherche en physique et en chimie et applications biologiques et médicales au traitement du cancer, sous la direction de Marie CURIE et de Claudius REGAUD.

**1921** : Création de la Fondation Curie, premier centre anticancéreux, grâce à une donation du Baron Henri de ROTHSCHILD.

**1928** : Invention, en Allemagne, du compteur GEIGER-MULLER, pour rayonnements radioactifs.

Explication de la radioactivité alpha par G. GAMOW. La particule  $\alpha$  est émise par un mécanisme relevant de la mécanique quantique appelé effet tunnel.

Création de la Commission Internationale de Protection Radiologique (C.I.P.R.).

**1930** : Construction, à Berkeley (Etats-Unis), par E. LAWRENCE, du premier cyclotron à protons.

Hypothèse de neutrino par le théoricien allemand W. PAULI, pour expliquer la forme des spectres de radioactivité  $\beta$ .

**1931** : Découverte du deutérium (isotope de l'hydrogène contenu dans l'eau lourde) à l'Université de Columbia de New-York.

Construction, à Princeton (Etats-Unis), par R. VAN DE GRAAF, d'un générateur qui sera à la base des futurs accélérateurs électrostatiques de particules.



**1932** : Premier accélérateur de protons anglais (Manchester).

Découverte du neutron, à Manchester (Grande-Bretagne), par J. CHADWICK. Le noyau de l'atome prend sa représentation actuelle : assemblage de protons et de neutrons.

**1933** : Découverte du positon par C. ANDERSON.

Théorie de la radioactivité  $\beta$  par E. FERMI (Rome).

**1934** : Découverte de la radioactivité artificielle, à Paris, par Frédéric JOLIOT et Irène CURIE.

En bombardant une feuille d'aluminium avec des particules alpha, ils obtiennent du phosphore radioactif. Mort de Marie CURIE.

Elaboration, par le japonais H. YUKAWA, de la théorie des forces nucléaires mettant en jeu des mésons  $\pi$ , particule inconnue dont cette théorie prédit l'existence.

Synthèse de radioéléments, à Rome, par E. FERMI, en bombardant des éléments connus avec des neutrons.

**1935/1936** : Le prix Nobel de chimie est décerné à Frédéric et Irène JOLIOT-CURIE pour la synthèse de nouveaux éléments radioactifs à l'Institut du Radium.

Inauguration de la première section de l'hôpital à la Fondation Curie.

**1939** : Découverte de la fission de l'atome (c'est-à-dire du noyau), à Berlin, par O. HAHN et F. STRASSMANN.

Construction du premier cyclotron européen, au Collège de France (Paris), par F. JOLIOT.

Mise en évidence, par H. VON HALBAN, F. JOLIOT et L. KOWALSKI, au Collège de France (Paris), de la libération de neutrons dans la réaction de fission. Prédiction de la possibilité d'une réaction en chaîne, donc d'applications énergétiques.

J. et E. LAWRENCE démontrent l'intérêt de l'iode radioactif pour l'exploration de la glande thyroïde.

Création du Centre National de la Recherche Scientifique.

**1940** : Premières synthèses d'éléments transuraniens à Berkeley (Etats-Unis) (Neptunium 239 par E. MACMILLAN et P. ABELSON et Plutonium 238 par G. SEABORG).

**1942** : Isolement à Chicago (Etats-Unis) d'un quart de milligramme de plutonium.

Mise en fonctionnement de la première pile atomique construite à Chicago, sous la direction de E. FERMI.

**1943** : O. AVERY et COLL, montrent, par marquage isotopique, que l'acide désoxyribonucléique (ADN) est le support de l'hérédité.

**1945** : Lancement, par les Etats-Unis, des bombes atomiques de Hiroshima (6 août, bombe à l'uranium 235), et de Nagasaki (9 août, bombe au plutonium).

Mise en fonctionnement de la première pile atomique soviétique. Création du Commissariat à l'énergie atomique.

**1946** : Mise en fonctionnement de la première pile atomique canadienne et de la première pile atomique britannique.

**1947** : Découverte du méson  $\pi$ , prédit par YUKAWA en 1934.

**1948** : Mise en fonctionnement de Zoé, la première pile atomique française, fonctionnant à l'oxyde d'uranium naturel et à l'eau lourde. Elle ne dégage pratiquement pas d'énergie.

**1949** : Isolement à Châtillon du premier milligramme de plutonium français, produit par Zoé.

**1952** : Invention de la chambre à bulles par D. GLASER.

Ouverture du Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay (CEA).

**1953** : Création du Centre Européen de Recherches Nucléaires (CERN) basé à Genève (Suisse).

Découverte de l'antiproton à Berkeley par O. CHAMBERLAIN et E. SEGRE.

Découverte de la structure en double hélice de l'ADN par J.D. WATSON et F.H.C. CRICK (prix Nobel en 1962) en utilisant la diffraction des rayons X.

**1955** : Etablissement, par le théoricien américain M. GELL-MANN, de la notion d'interaction faible, en tant que force responsable de la radioactivité  $\beta$ .

Création à Orsay, d'une extension de l'Institut du radium de Paris, qui

deviendra l'Institut de physique nucléaire d'Orsay, premier laboratoire de la Faculté des Sciences d'Orsay, suivi de peu par le laboratoire de l'Accélérateur Linéaire.

**1956** : Adoption, à l'ONU (New-York), des statuts de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA), qui sera basée à Vienne (Autriche).

Mort d'Irène JOLIOT-CURIE.

**1957** : Signature, à Rome, du traité Euratom instituant une communauté européenne de l'énergie atomique.

**1958** : Première production d'électricité nucléaire en France par le CEA (Marcoule).

Mort de Frédéric JOLIOT-CURIE.

**1959** : Inauguration (9 avril) du service hospitalier Frédéric JOLIOT (SHFJ) du CEA dans les locaux de l'hôpital d'Orsay. Biologistes, médecins, physiciens y jetteront les bases de la médecine nucléaire française.

**1963** : Première production d'électricité nucléaire par EDF à Chinon, filière UNGG (Uranium Naturel Graphite Gaz).

**1964** : Formulation, par les théoriciens américains M. GELL-MANN et G. ZWEIG, de l'hypothèse des quarks, particules constitutives du proton et du neutron, et liées par l'interaction forte.

**1965** : Inauguration, rue d'Ulm, du bâtiment de huit étages qui abrite la polyclinique de la Fondation Curie.

**1966** : Mise au point du dosage de l'insuline, à l'aide d'anticorps radio-marqués, par S. BERGSON et R. YALOW (prix Nobel de physiologie et médecine en 1977).

**1967** : Mise en production à Pierrelatte de l'usine d'enrichissement isotopique de l'uranium par diffusion gazeuse.

**1969** : Première mise en évidence expérimentale, à Stanford (Etats-Unis), par diffusion d'électrons, d'une sous-structure du proton.

**1970** : Réorientation du programme français de recherche et d'équipe-

ment électronucléaire : abandon de la filière UNGG (uranium naturel graphite gaz) au profit des REP (réacteur à uranium enrichi et eau sous pression).

**1971** : Mise en fonctionnement à Grenoble du réacteur franco-allemand à haut flux (RHF). Installation au CERN de la chambre à bulle Gargamelle. Création de l'Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules (IN2P3).

**1972** : Découverte à Oklo, au Gabon, des traces de fonctionnement, il y a près de 2 milliards d'années, d'un réacteur naturel fossile.

**1973** : Mise en évidence des courants neutres au CERN, à l'aide de la chambre à bulles Gargamelle. Cette observation est cruciale pour l'unification de la force électromagnétique et de l'interaction faible.

Mise en évidence au CEA/Fontenay-aux-Roses d'un tokamak (TFR) pour l'étude de la fusion thermonucléaire contrôlée par confinement magnétique.

Mise en service au CEA/Marcoule de la première centrale prototype surgénératrice Phenix.

**1974** : Elaboration, par S. GLASHOW, A. SALAM et S. WEINBERG, de la théorie électro-faible qui unifie la force électromagnétique et l'interaction faible. Cette théorie prédit l'existence des bosons intermédiaires  $W^+$ ,  $W^-$ , et  $Z^0$ .

**1975** : Fusion officielle de la Fondation Curie et de l'Institut du Radium qui deviennent l'Institut Curie.

Réunion à Paris de la 15e conférence générale des poids et mesures qui adopte deux nouvelles unités de mesures de la radioactivité : le Becquerel et le Gray.

**1976** : Création de l'Institut de Protection et de Sécurité Nucléaire (IPSN).

Mise en service du centre de retraitement de déchets radioactifs de La Hague.

**1978** : Création, sur le site de Saclay, du laboratoire national Saturne pour la physique nucléaire aux énergies intermédiaires.

**1979** : Accident de Three Mile Island en Pennsylvanie (28 mars). Grâce à l'enceinte de confinement du réacteur, l'accident (fusion du cœur) n'aura pas de conséquence radiologique sur l'environnement.

Création de l'Agence Nationale pour les Déchets Radioactifs (ANDRA).

Démarrage à Caen du Grand Accélérateur National d'Ions Lourds (GANIL) réalisé par le CEA/CNRS-IN2P3 pour l'étude de la physique des ions lourds.

**1983** : Découverte, au CERN, par C. RUBBIA et son équipe, des bosons intermédiaires  $W^+$ ,  $W^-$ , et  $Z^0$ .

Cette découverte apporte la confirmation expérimentale de la théorie électrofaible qui explique le mécanisme de la radioactivité  $\beta$ .

**1984** : La Convention de Londres sur la protection de l'environnement marin se prononce contre l'évacuation en mer des déchets hautement radioactifs.

Inauguration à Culham en Grande-Bretagne du Joint European Torus (JET), dispositif expérimental pour la faisabilité de la fusion thermonucléaire contrôlée.

**1985** : Mise en service à Creys-Malville, du surgénérateur Superphénix.

**1986** : Accident à la centrale soviétique de Tchernobyl (annoncée officiellement le 28 avril).

Détekté deux jours auparavant en Suède par une élévation du taux de radioactivité ambiante.

**1987** : Signature (22 novembre) du premier protocole d'accord pour le lancement de la construction de la source de rayonnement synchrotron ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) à Grenoble.

**1988** : Mise en service au CEA/Cadarache du tokamak Tore Supra destiné aux études de fusion par confinement magnétique (premier grand tokamak doté d'un champ magnétique toroïdal permanent, créé à l'aide de bobines supraconductrices).

**1989** : Mise en service (le 14 juillet) au CERN du LEP, du plus grand anneau de collision électron-positon du monde.

**1991** : La Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) présente ses nouvelles recommandations générales en matière de radioprotection.

**1992** : Première expérience de simulation à échelle réduite, d'un accident grave de réacteur à eau sous pression (REP), conduite à Cadarache par l'IPSN (Institut de Protection et de Sécurité Nucléaire) en collaboration avec différents partenaires étrangers.

**1993** : Signature, par le CEA, le CNRS/IN2P3, et le Conseil Régional de Basse Normandie, d'un accord pour la construction de l'accélérateur d'ions radioactifs Spiral, destiné à des expériences de physique nucléaire, d'astrophysique et de physique des matériaux.

**1994** : Adoption par le CERN du projet LHC (Large Hadron Collider) de collisionneur proton-proton de 14 TeV. Cet accélérateur sera le plus puissant du monde.

Inauguration, à Grenoble, de la source de rayonnement synchrotron ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) destinée aux études de structure atomique et moléculaire de matériaux inertes et de composés biologiques.

Après un long arrêt dû à des incidents divers, redémarrage de Superphénix en sous générateur.

**1995** : Mise en évidence, aux Etats-Unis, du quark top, dernier des six quarks prédits par le modèle standard de la physique des particules.

entraîne l'attachement du sujet ému à ce qui l'émeut. Opposer les émotifs (E) aux non-émotifs (nE), n'est qu'une manière brève de dire que ceux-là sont plus émotifs que la moyenne des hommes, ceux-ci moins.

**L'activité est la disposition à l'action qui provient de soi-même.** L'actif (A) a un besoin congénital qui le pousse à l'action, alors que l'inactif (nA) agit contre son gré, à son corps défendant, avec peine. Il y a de faux actifs. Mais attention, un inactif n'est jamais qu'un moins actif.

**L'homme à retentissement primaire (P) vit dans le présent,** ou dans le futur immédiat, alors que **celui à retentissement secondaire (S) amortit le présent** en exploitant le passé et en préparant l'avenir. (voir tableau en bas de page).

C'est la seule question qui me semble en rapport avec la créativité. Les réponses à cette question n°29 montrent clairement que **l'activité est le seul critère de positif pour la «débrouillardise».** L'émotivité et le retentissement sont neutres.

Cela ne me surprend pas : 99% de sueur, et 1% de bonheur. Les idées ne tombent pas du ciel, gratuites. Quant à l'émotivité et au retentissement, ils peuvent être autant des freins que des moteurs.

#### Facteurs complémentaires.

**Une approche en souplesse (Vénus) me semble plus créatrice, qu'une approche de domination (Mars).** Un «Mars» aime commander, est facilement rude et brusque, et peu lui importe souvent l'impression qu'il laisse. Un «Vénus» n'entend s'imposer que par l'agrément, le charme, l'amabilité, la séduction ; il est conciliant et habile. Cela m'amène, naturellement, à évoquer la supériorité

#### des femmes sur les hommes dans certains domaines relevant de la créativité.

Je vois quatre indices :

- leur deux hémisphères participent au langage,
- leurs corps calleux («connectique» H.G. - H.D.) seraient plus performant (+10% en section, et vitesse plus grande des transmissions),
- 30% des bébés filles reconnaissent le visage de leur maman, non pas avec leur H.D. comme les autres filles et garçons, mais avec leur H.G.
- la testostérone, hormone mâle par excellence, serait défavorable à la créativité des hommes, aux époques où son taux est le plus élevé. Avis aux responsables des bureaux d'études !

**La mixité est vivement recommandée dans les séances de créativité ! De même, la largeur du champ de conscience est préférable à une étroitesse.** Cet aspect caractériel est manifestement lié aux domaines H.D. ou H.G.

Enfin, pendant les séances de créativité, **un comportement allocentrique est préférable à l'égoïsme :** il faut faire corps avec le groupe, et lui donner toutes ses idées et ses connaissances. Mais il n'est pas interdit d'être créatif solitaire, égoïste ou non. Il n'est pas interdit, non plus, de se réunir entre égoïstes. Prenons-en, par exemple, dix. Chacun veut donner peu, mais recevoir beaucoup. Et tout le monde est comblé, car neuf fois peu, cela fait beaucoup...

#### DES IMAGES MENTALES AUDIO-VISIO-SCRIPTO-KINESTHESIQUES

**La Programmation Neuro-Linguistique (la P.N.L.) est une**

**démarche relative à la communication,** née aux Etats-Unis il y a une quinzaine d'années, à partir des travaux de R. BANDLER et de J. GRINDER. Voir, par exemple, le livre [38] de P. BARRERE ET A. CAYROL. Les modèles résultent de l'observation des meilleurs professionnels de la communication.

Les gens perçoivent, traitent, se représentent, mémorisent et s'expriment essentiellement de trois façons différentes :

- LES VISUELS voient et utilisent des «vues» de manière globale, synthétique, simultanée, documentaire...
- LES AUDITIFS écoutent et utilisent des «mots», en séquences, de manière discursive, linéaire, analytique...
- LES KINESTHESIQUES ressentent et utilisent des émotions, des sentiments et des sensations physiques.

*«L'âme ne pense jamais sans image» (ARISTOTE)*

*«La parole est moitié à celui qui parle, moitié à celui qui écoute» (MONTAIGNE)*

*«Je ne puis retenir les mots eux-mêmes. Je dois mémoriser les sentiments» (M. MONROË)*

Il existe des personnes à dominante visuelle, d'autres à dominante auditive, et d'autres qui sont plutôt kinesthésiques : **chacune a son canal de communication favori.** Le système dominant d'une personne est celui qu'elle utilise le plus souvent, et dans lequel elle est capable de la plus grande finesse de distinction.

Je suis surtout visuel (abstrait), assez kinesthésique, et très peu auditif. **On trouve assez facilement les canaux favoris des gens en analysant leur**

nE	A	P	Sanguins	81,1%	Voici la liste des noms donnés aux 8 familles de caractères, avec leurs critères de base.  J'ai porté les % de oui, dans chaque famille, à la question n°29 : «pratique et débrouillard, par exemple, dans l'esquisse d'un plan ou dans la recherche d'un moyen de sortir des difficultés, en sachant tirer parti de moyens de fortune».
E	A	S	Passionnés	75,5%	
E	A	P	Colériques	71,6%	
nE	A	S	Flegmatiques	59,0%	
nE	nA	S	Apathiques	50,0%	
nE	nA	P	Amorphes	49,0%	
E	nA	S	Sentimentaux	47,8%	
E	nA	P	Nerveux	41,9%	

**vocabulaire parlé et (ou) écrit, et en observant les mouvements de leurs yeux.** Les visuels regardent en l'air, les auditifs à l'horizontale et les kinesthésiques vers le bas. A leur gauche pour évoquer le passé, avec les images mémorisées et à leur droite pour les aider à construire leurs images favorites. Et les bons professionnels font l'effort d'utiliser le même canal que celui de leur interlocuteur. Même au téléphone !

A	C.G.	C.D.	D
Auditifs		Visuels	
B	L.G.	L.D.	C
Kinesthésiques			

95% des gens ont leurs aires cérébrales du langage parlé, écouté, écrit et lu dans leur H.G. (attention, les idéogrammes et l'iconographie analogique -les chiffres romains- sont traités par l'H.D.). Pour raisons de proximité et de construction, **le langage est l'outil par excellence des modes C.G. et L.G.**

De même, **les images visuelles et kinesthésiques seraient les outils privilégiés des modes C.D. et L.D.** Et j'ai bien l'impression qu'un nombre important de créatifs célèbres étaient plutôt visuels et kinesthésiques.

Voici les paroles d'A. EINSTEIN rapportées dans [41]. :

*«Les mots ou le langage, sous la forme orale ou écrite, ne semblent jouer aucun rôle dans le mécanisme de mes pensées...*

*...Les éléments mentionnés ci-dessus sont, en ce qui me concerne, de nature visuelle et musculaire. Ce n'est que dans un second temps, après que le jeu d'association mentionné ci-dessus est suffisamment bien établi et peut être reproduit à volonté, que prend place la recherche laborieuse des mots ou autres signes conventionnels.»*

	↓	↓	↓
Pour les kinesthésiques			
Pour les auditifs			
Pour les visuels			
de l'iconographie	**	*	*
des mots	*	**	*
de la vie	*	*	**

**Comment communiquer efficacement à un groupe varié et inconnu ?**

**En panachant les modes**, en élargissant notre vocabulaire... et en faisant l'effort des canaux qui ne nous sont pas familiers.

Tout ceci, bien sûr, pour exploiter avec efficacité notre réaction de synthèse mystérieuse :

**Image du Problème + Image Révélatrice ⇔ Idée de solution.**

L'animateur en créativité devra favoriser la formation et la rencontre d'images mentales auditives, visuelles, kinesthésiques... gustatives et olfactives.

Attention, la formation des images visuelles est plus lente que celle des images auditives ; en particulier, il est important de parler lentement. Pour en savoir plus sur les images mentales, consulter le livre [49] d'E. GREBOT.

Il faut ici évoquer **l'école de la gestion mentale**, antérieure à la P.N.L., **d'A de LA GARANDERIE**. Voir par exemple [50]. Il fut d'abord mauvais élève (il n'entendait pas bien), puis très brillant dès l'instant où il a pu travailler à son rythme avec des documents écrits. Il s'est intéressé passionnément aux problèmes de l'échec scolaire. Et c'est ainsi qu'**il à découvert le rôle des images mentales auditives et visuelles, dans la réussite scolaire**. Un enfant a une dominante visuelle ou une dominante auditive. S'il est visuel, par exemple, et si son environnement est plutôt auditif et non averti, il se peut que l'enfant comprenne mal, et se fasse mal comprendre. D'où un apprentissage particulier des parents et des maîtres et bien sûr des enfants pour

que ceux-ci puissent gérer correctement leurs images mentales (dominantes ou non).

Une séance de créativité se fera dans une salle éloignée des écoutes et des regards indiscrets ; avec de grands tableaux blancs et des feutres de couleurs pour écrire des mots et des nombres, et pour tracer de l'iconographie. *«Un petit croquis m'en dit plus qu'un long discours»* (NAPOLEON). Et je rappelle qu'il faut écrire toutes les idées de solutions trouvées, par exemple sur de grandes feuilles de papier.

**Aujourd'hui, Léonard de VINCI ne serait pas bachelier !**

Léonard de VINCI (1452-1519) est considéré comme l'un des génies les plus créatifs de tous les temps. C'était un touche-à-tout de talent et de bon goût... mais désordonné. Il était peintre, sculpteur, musicien, écrivain, géologue, ingénieur, architecte, anatomiste, astronome, mathématicien, metteur en scène... Et d'après sa biographie [39] écrite par S. BRAMLY, il avait du charme et de l'humour, était bel homme et fort physiquement, très cultivé... mais dandy et extravagant. J'ai noté, entre autres, **trois facteurs ayant favorisé sa production créative : sa naissance illégitime, sa gaucherie non contrariée et sa dominance hémisphère droit**.

Léonard était le fils illégitime d'un notaire, et on lui a donné le nom du village où il est né... De ce fait, il ne pouvait pas exercer certains métiers, dont celui de notaire, comme son père. Donc, inutile d'entreprendre des études savantes... Et comme il était doué pour le dessin, son père l'a mis en apprentissage dans un atelier de peinture. Ainsi, sa créativité n'a pas été prisonnière d'une profession accapareuse.

**Enfant, il était gaucher**, et son éducation n'ayant pas été très stricte, **on ne l'a pas contrarié**. Heureusement. Car toute son expression picturale (dessins, croquis, plans, peinture) était le fait de son «ineffable main gauche». Par la suite, il est devenu ambidextre pour l'écriture, capable d'écrire «en miroir». Dans les pays où

les gauchers sont libres d'exprimer leur gaucherie (ce n'est pas le cas du Japon en particulier), ces derniers représentent environ 12% de la population. J'ai vérifié cet ordre de grandeur, en quelques minutes, en observant jouer les enfants à la raquette sur les plages de l'Atlantique, à marée basse. D'après H. de MONTROND, [54], 35% des architectes américains sont gauchers, contre 3% seulement chez les intellectuels. Je ne peux pas entrer ici dans les détails, par exemple, des vrais et des faux gauchers. Mais ils auraient un corps calé un peu plus gros que celui des droitiers. Et comme la gestion de leur main gauche est réalisée par leur H.D., à proximité de la gestion visio-spatiale, on peut édifier des hypothèses quant à leur talent pictural et créatif. Ils sont également brillants en sports individuels : tennis et tennis de table, escrime... Leur temps de réponse global a été mesuré un peu plus rapide que celui des droitiers. Et statistiquement, ils sont meilleurs en mathématiques. Si notre main droite est le partenaire de notre H.G. dominant et juste, notre main gauche est l'alliée de notre H.D. artistique et créatif. Ce n'est pas la main impure et sinistre (du latin sinister, gauche) méprisée par tant de civilisations !

**La dominance H.D. de Léonard ne fait pas de doute.** Nous lisons par ci par là dans [39] :

«Dans ses carnets, Léonard passe régulièrement du coq à l'âne»

«Il renonce rarement au plaisir d'un petit dérapage analogique»

«Il passe sans cesse du plus sérieux au plus futile»

«Beaucoup d'oeuvres sont inachevées, Léonard éprouve du mal à finir»

«Des confidences involontaires, donc, en tout cas détournées, métaphoriques, et toujours décousues, isolées, sans commentaire»

**Il était «visuel» et probablement «kinesthésique»,** et avait quelques difficultés avec les mots. Il écrit :

«Avec quels mots, écrivain, égaleras-tu dans ta description la figure complète que restitue le dessin ?» et

«Dès le point du jour, l'air se remplit d'innombrables images auxquelles l'œil sert d'aimant».

Un de ses carnets (codex trivulcien) est mystérieux : près de 9 000 mots se succèdent sans continuité logique et sans explication.

**Et son mode «cortical gauche» était faible !»** Un niveau scolaire pas bien haut». «Pour la théorie, il ne peut se passer d'un guide, de conseils, d'explications... L'algèbre surtout lui demeure hermétique : il maîtrise mal les chiffres, on le voit régulièrement s'empêtrer dans ses calculs, se tromper jusque dans de simples additions...» Avec un tel handicap, aujourd'hui, un jeune Léonard de VINCI n'aurait pas beaucoup de chances pour exprimer ses talents, en dehors des murs des banlieues : pas de bac, pas de fac, pas de grande école... pas de diplôme... pas d'embauche. Et peu de grands créatifs dans les entreprises, dans les administrations, dans les partis politiques... Je crois savoir que la contribution de Léonard en mathématiques concerne plus particulièrement la géométrie, domaine où intervient l'H.D.

### COMMENT DEVENIR MEILLEURS EN CREATIVITE

Je vous rappelle mes cinq conseils : vous informer, puis vous former, ensuite pratiquer, pratiquer et ... pratiquer. En effet, la créativité ne s'use que si on ne s'en sert pas.

**Je vous ai donné un trousseau de clefs pour vous informer :** à vous de choisir celles qui vous paraissent les mieux adaptées à vos besoins et à votre personnalité. Je vous encourage à lire trois ou quatre livres, pour élargir votre information, et pour consolider votre motivation. J'ajoute le livre [56] «Développez votre créativité» de Time Life à ma liste minimale [16], [18], [21] et [27] relative aux techniques de Créativité. Je vous conseille de faire l'achat à plusieurs, et de confronter les idées fortes qui se dégagent.

**Ensuite, vous avez plusieurs solutions pour vous former :**

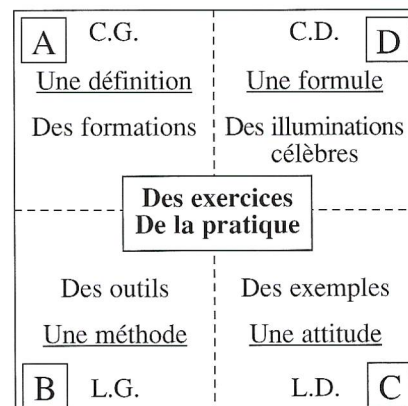
- faire un stage chez un professionnel : 10 à 40 000 F pour trois à quatre jours,

- faire venir un professionnel pour dix à vingt participants : 15 à 30 000 F par jour,

- Créer un club d'autoformation en créativité,

- tenter votre chance en famille,

- tenter votre chance tout seul.  
etc.

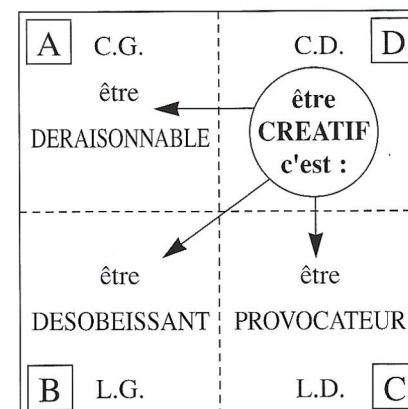


Je suis convaincu de l'efficacité d'un travail «cerveau complet», tel que suggéré avec les mots clés du tableau ci-contre.

Mais faites bien passer le SAVOIR ETRE (une attitude) avant le SAVOIR FAIRE, sinon vous risquez l'échec.

Utilisez bien une méthode multi-sensorielle pour vos images mentales traitées par vous-même, et émises pour les autres.

«Si vous parvenez à vous libérer de vos vieilles habitudes mentales et des blocages qui limitent votre pensée, vous serez vite capable d'examiner n'importe quelle question sous un éclairage nouveau» (Time Life [56])



**Il faut du courage pour être créatif, et savoir prendre des risques.** Avec les autres et avec soi-même.

La créativité n'est pas un phénomène naturel dans la circuiterie de traitement des informations dans le cerveau. Elle est agressive pour les autres modes de pensée. Ou bien, est-elle naturelle dans les cas d'extrême danger, pour notre survie ?

D'où l'histoire suivante, arrangée par mes soins (j'ai perdu sa source).

Yvan le Rouge, écumeur de la mer des Caraïbes, voulait se débarrasser d'un prisonnier qu'il avait dans la cale de son bateau. Il le fait monter sur le pont, en présence de l'équipage.

«Prisonnier», dit-il, «je veux te donner ta chance. Voici un sac contenant une bille blanche et une bille noire. Tu en prendras une, sans regarder, et tu nous la montreras. Si elle est blanche, tu seras incorporé dans l'équipage, et si elle est noire, tu sauteras par dessus bord».

Le malheureux savait bien que le fourbe Yvan avait mis deux billes noires... Il plonge le bras dans le sac, s'empare d'une bille qu'il serre dans sa main, retire celle-ci du sac... et feint un déséquilibre dû au roulis, et jette vivement la bille à la mer, derrière lui. Et présente ses excuses. Yvan se doit alors de faire constater que la bille restante est noire, donc que la bille tirée par le prisonnier était blanche. Fou de rage, il a dû tenir sa promesse !

**Il est très difficile de créer dans un environnement hostile.** Pour convaincre, il est nécessaire d'obtenir de bons résultats très vite. Et malgré cela, une personne sur trois reste sceptique. Il est nécessaire d'être prudent et de travailler à huis clos. Mais force est de constater que certaines personnes sont plus créatives que d'autres, et c'est à partir d'elles qu'il faut construire un réseau solide. L'essentiel, c'est d'obtenir une masse critique favorable, en sachant qu'il faut cinq enthousiastes pour neutraliser deux hostiles.

OSBORN [20] et CLARK [8] suggèrent qu'une première équipe trouve les idées, et qu'une deuxième classe, trie et choisisse les meilleures idées de la première. Cela était peut être

valable il y a cinquante ans aux U.S.A, mais je suis persuadé qu'aujourd'hui, en France, il est préférable de tout confier à la même équipe.

**Le tri des idées permet de dégager quatre familles :**

- les trop en avance sur leur temps,
- les originales envisageables,
- les banales
- les farfelues, les hors sujets, les utopiques...

**Les résultats obtenus sont aléatoires.** Les idées excellentes sont rares, seulement dans 2 à 5% des problèmes traités. Ce sont celles, par exemple, qui permettent en moins d'une heure de débloquer une situation empoisonnante depuis des années. Les bonnes idées sont majoritaires. Et les résultats médiocres ou nuls se rencontrent dans quelques pour-cent des cas. **Les problèmes rencontrés dans la vie ne ressemblent pas souvent à ceux qui sont traités à l'école.**

A propos d'enseignement, nous avons consacré des milliers d'heures pour maîtriser le mode C.G., et nous pouvons bien en donner quelques dizaines de plus pour enrichir notre mode C.D. Je connais peu d'établissements scolaires qui enseignent la créativité. On m'a signalé l'Ecole de Commerce de Lille, qui fait débiter la première année par un stage de créativité, dès les premières heures de scolarité. Ceci pour permettre, entre autres, aux élèves de faire rapidement connaissance, dans une ambiance tonique.

**J'ai pris le risque, depuis plusieurs années, de m'appuyer sur un modèle plus ou moins hasardeux du cerveau.** Cela est pour moi, pratique et efficace, parce que «kinesthésique» (ou «somesthésique»). Mais je conçois bien que certaines personnes rejettent catégoriquement une telle approche.

C'est une grille-outil, un filtre réducteur qui aide à décoder la réalité en la simplifiant.

**Les 4 quadrants de N. HERRMANN correspondent assez bien aux définitions des 4 fonctions psy-**

**chologiques fondamentales du médecin-psychologue Suisse C.G. JUNG.**

Exemple du sensoriel : organisé, travailleur, méthodique, entier, avec un bon sens pratique, il privilégie l'action et la planification

A	C.G.	C.D.	D
Pensée		Intuition	
Sensation		Emotion	
B	L.G.	L.D.	C

**Plus étonnante encore est la ressemblance avec les 4 énergies de base du TAROT !** Le tarot est un langage symbolique, s'appuyant sur l'image comme mode de transmission, constituant une synthèse de connaissances latines, orientales, égyptiennes, cabalistiques et médiévales. A noter que le Bateleur dispose des deniers dans sa main droite, et du bâton dans sa main gauche.

**La kinésiologie est moins ésotérique.**

Voir [9], [43] [44] [45] et [55].

Un stage de quatre jours de BRAIN GYM ne m'a pas déçu, et m'a convaincu des relations corps-cerveau

A	C.G.	C.D.	D
Energie intellectuelle EPEE - AIR Pique		Energie sexuelle et créative <b>FEU - BATON</b> Trèfle	
Carreau DENIER - <b>TERRE</b> Energie physique et matérielle		Cœur <b>EAU - COUPE</b> Energie émotionnelle et affective	
B	L.G.	L.D.	C

Enfin, je signale les succès de librairies aux USA [47] et [48], de B. EDWARDS, pour celles et pour ceux qui voudraient apprendre à dessiner.

**BONNE CRÉATIVITÉ  
À TOUTES ET À TOUS.**

## BIBLIOGRAPHIE (suite)

- [38] BARRERE P.  
La Programmation Neurolinguistique  
E.S.F
- [39] BRAMLY S.  
Léonard de VINCI - Biographie J.C.  
Lattès
- [40] CHANARD J.  
Développement de la créativité de  
groupe T. 2300 (\*)
- [41] DAMASIO A.R.  
L'erreur de DESCARTES - La raison  
des émotions Odile Jacob
- [42] DELAFOLLIE G.  
Analyse de la valeur - Hachette
- [43] DENNISON P.E.  
Kinésiologie, le plaisir d'apprendre  
Souffle d'Or
- [44] DENNISON P.E.  
Kinésiologie éducative - Brain gym  
Souffle d'Or
- [45] DIAMOND J.  
Le corps ne ment pas - Souffle d'Or
- [46] ECCLES J.C.  
Evolution du cerveau et création de la  
conscience Flammarion
- [47] EDWARDS B.  
Dessiner grâce au cerveau droit  
Mardaga
- [48] EDWARDS B.  
Vision - Dessin - Créativité  
Mardaga
- [49] GREBOT E.  
Images mentales et stratégies d'ap-  
prentissage E.S.F
- [50] LA GARANDERIE (de) A.  
Le dialogue pédagogique avec l'élève  
Le Centurion
- [51] LENHARDT V.  
L'Analyse Transactionnelle Retz
- [52] LE SENNE R.  
Traité de caractérologie P.U.F
- [53] MOLES A.  
Fonction innovation A. 4 400 (\*)
- [54] MONTROND (de) H.  
Vive les gauchers Richaudeau
- [55] POTSCHKA F.  
Toute la kinésiologie Souffle d'Or
- [56] X  
Développez votre créativité Time Life

(\*) *Les Techniques de L'Ingénieur*



### MATERIEL ELECTRONIQUE PROFESSIONNEL

Composants - Mesure - Outillage  
Réalisation circuits imprimés

**63000 CLERMONT-FERRAND**

22, rue Saint-Adjutor  
Tél. 73 31 13 76 - Fax 73 31 09 34

**87000 LIMOGES**

17, rue des Arènes  
Tél. 55 32 47 96 - Fax 55 32 42 83

## Découverte de la radioactivité naturelle

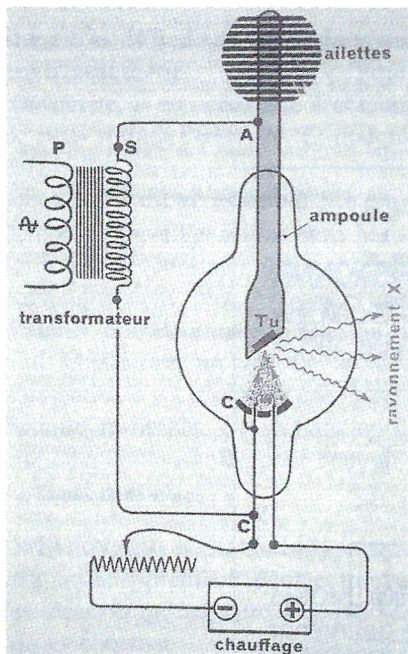
**Suzanne GELY**

Ancienne élève

de l'Ecole Normale Supérieure de Sèvres.  
Agrégée de Sciences Physiques.

La fin de l'année 1895 est une année charnière pour la science internationale.

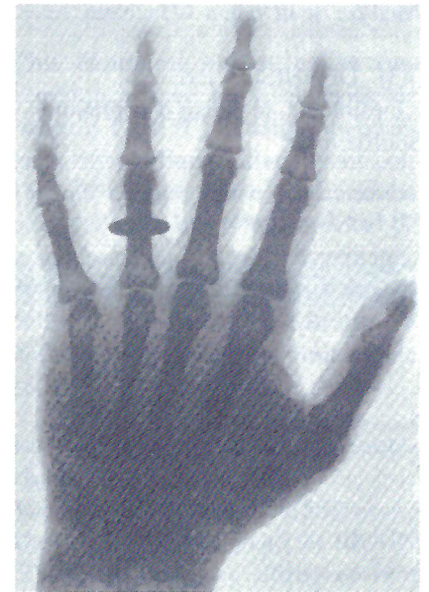
PASTEUR vient de mourir le 28 Septembre 1895 à MARNES-la-COQUETTE après avoir révolutionné la biologie, montré l'existence des microbes et inventé le premier vaccin. Antoine LUMIERE, père de Louis et Auguste LUMIERE, fabricants de plaques photographiques, projette à PARIS, au Grand Café du Boulevard des Capucines, "dans le Salon Indien", le 28 Décembre 1895, leur premier film "La sortie des usines LUMIERE à LYON" qui soulève l'enthousiasme des spectateurs.



Tube de Coolidge

Et voilà que le même jour, 28 Décembre 1895, William Conrad RONTGEN à l'Université de WURZBOURG en Allemagne annonce qu'il a découvert un nouveau rayonnement invisible, mais capable de traverser les corps opaques, d'impressionner une plaque photographique et d'électriser l'air sur son passage. RONTGEN montre la première radiographie d'une main (celle de sa femme) car les nouveaux rayons sont moins pénétrants pour les éléments lourds (existants dans les os) que pour les éléments légers (dans la chair). Ces rayons se produisent dans un tube de Crookes, grosse ampoule de verre scellée, avec un vide assez poussé (la pression du gaz est environ 100 000 fois plus faible que la pression atmosphérique, elle est de l'ordre de 0,01 millimètre de mercure). L'ampoule est soumise à une différence de potentiel élevée de l'ordre de 50 000 volts. L'intérieur de l'ampoule est obscur mais la paroi opposée à la cathode (négative) devient fluorescente. La stupéfaction de l'assistance est immense à la vue de la radiographie de la main.

La nouvelle se répand dans le monde comme une traînée de poudre. Ces rayons sont appelés X car on ignore leur nature et il faudra attendre 17 ans pour les identifier comme un rayonnement électromagnétique analogue à la lumière et aux ondes hertziennes (découvertes en 1887 par HERTZ). Cette découverte de RONTGEN sera le point de départ de la Physique moderne.



Radiographie  
de la main de Mme RONTGEN

En cette fin d'année 1895, le monde scientifique tout entier se passionne donc pour les nouveaux rayons.

A PARIS, le lundi 20 Janvier 1896, à la séance hebdomadaire de l'Académie des Sciences, Henri POINCARÉ montre les premières radiographies que RONTGEN vient de lui envoyer. Comme le verre de l'ampoule productrice des rayons X est fluorescent, Henri POINCARÉ propose alors l'hypothèse que l'émission des rayons X et la fluorescence sont des phénomènes associés. Or, l'un des académiciens présents, Henri BECQUEREL travaille justement sur la fluorescence des cristaux et promet



à Henri POINCARÉ d'essayer de valider cette hypothèse.

## MAIS QUI EST HENRI BECQUEREL ?

Henri BECQUEREL est issu d'une famille de savants et appartient à une dynastie de 4 physiciens, polytechniciens, académiciens, titulaires de la chaire de Physique au Muséum d'Histoire Naturelle à PARIS. Henri a hérité la vocation scientifique de son père Edmond et de son grand-père Antoine-César ; son fils Jean, polytechnicien aussi, entrera à son tour à l'Académie des Sciences et, comme lui, enseignera la Physique au Muséum d'Histoire Naturelle.

C'est en 1763 que le Chevalier Pierre-Hector BECQUEREL de la Chevrotière, originaire d'AMIENS en Picardie, est nommé lieutenant du Roy de la petite place forte de CHATILLON-sur-LOING (actuellement CHATILLON-COLIGNY dans le Loiret) où il exerce sa charge jusqu'à sa mort en 1775.

Louis-Hector BECQUEREL, fils de Pierre-Hector, est trésorier des guerres à CHATILLON-sur-LOING et il en devient Maire en 1792. Il échappe de justesse à la guillotine sous la Terreur et continue ensuite son mandat sous le premier Empire.

Antoine-César BECQUEREL, fils de Louis-Hector, naît à CHATILLON en 1788. Reçu à l'Ecole Polytechnique en 1806, il en sort en 1808 comme officier du génie. Envoyé en 1810 à la guerre d'Espagne, il participe aux sièges les plus terribles : TARRAGONE, TORTOSE, VALENCE où il fait preuve en même temps de bravoure dans la bataille et d'humanité envers la population. En 1815, démissionnaire de l'armée, il prend sa retraite comme chef de bataillon et se consacre désormais à la science pendant 60 ans. Travailleur infatigable, il réalise une œuvre scientifique importante : 529 ouvrages et notes.

On peut citer :

- Découverte de la pyroélectricité en 1819

- Etude de la conductibilité : des métaux de l'électricité atmosphérique des phénomènes électro-capillaires
- invention de l'électrochimie
- Réalisation en 1829 de la première pile à courant constant (cuivre, sulfate de cuivre, acide sulfurique, zinc) exploitée quelques années plus tard par DANIELL, physicien Anglais qui recopie, sans les citer, les raisonnements et les expériences de BECQUEREL. DANIELL, agissant ainsi, illustre une fois de plus l'éternel "sic vos non vobis" de VIRGILE dans les "Bucoliques".

Les découvertes et les travaux de Antoine-César BECQUEREL le conduisent à l'Académie des Sciences en 1829, puis à la chaire de Physique du Muséum d'Histoire Naturelle à partir de 1838. Il met son intelligence et son dynamisme au service de sa région natale car il est maire de la Commune "Le Charme". Membre du Conseil Général du Loiret, il publie de nombreux mémoires attirant l'attention du gouvernement sur l'amélioration de la Sologne.

Fondateur de la dynastie scientifique des BECQUEREL, il sera le patriarche qui orientera, conseillera, guidera les plus jeunes dans leurs recherches scientifiques. Il meurt à PARIS le 18 Janvier 1878 alors que son fils Edmond et son petit-fils Henri sont déjà des physiciens confirmés.

La ville de CHATILLON-sur-LOING, reconnaissante, édifie en 1888 une statue qui se dresse fièrement, encore maintenant, sur la place principale et perpétue la gloire d'Antoine-César BECQUEREL.

Edmond BECQUEREL, deuxième fils d'Antoine-César, naît en 1822 à PARIS, au Muséum dans le logement de fonction de son père, chargé de la chaire de physique au Muséum d'Histoire Naturelle.

Elevé dans l'atmosphère studieuse du laboratoire de son père, il s'intéresse tout jeune à ses travaux. Bien que reçu en 1838, à l'âge de 16 ans, au concours de l'Ecole Polytechnique et à celui de l'Ecole Normale de la rue d'Ulm, il choisit la même année

d'être le collaborateur de son père. Il se consacre entièrement à la Science, faisant des recherches sur l'électrochimie, la pyrométrie, la transformation de l'électricité.

Le père et le fils se passionnent pour la luminescence, propriété de certains corps d'émettre de la lumière après avoir été éclairés par une source lumineuse excitatrice. Si, par suppression de la source excitatrice, la luminescence disparaît : le corps est fluorescent, si elle subsiste : le corps est phosphorescent.

Edmond invente un appareil à fentes tournantes, le phosphoscope, pour mesurer la persistance et la décroissance de la phosphorescence ; il classe les corps dont il dispose d'après la lumière réémise et il découvre que les sels d'uranyle ont une phosphorescence cinquante fois supérieure à celle du sulfure de calcium (c'est en 1789 qu'un chimiste allemand KLA-PROTH avait découvert l'urane et l'avait ainsi dénommé en l'honneur de la planète Uranus que l'astronome HERSHELL venait de découvrir, mais c'est seulement en 1842 que le chimiste français PERIGOT isole le métal uranium à partir de son oxyde l'urane).

Edmond succède à son père à la chaire de Physique au Muséum d'Histoire Naturelle et entre à son tour à l'Académie des Sciences, le 18 Mai 1863.

Il meurt à Paris en Mai 1891.

Henri BECQUEREL, fils d'Edmond naît à PARIS en 1852 dans ce Muséum où son père est né, habite et travaille. Il fait ses études au Lycée Louis-le-Grand et a, comme professeur en Taupe, le grand mathématicien Gaston DARBOUX. Entré à l'Ecole Polytechnique en 1872, il en sort en 1874 dans le corps des Ponts et Chaussées ; il épouse Lucie JAMIN, fille de son professeur de Physique à l'Ecole Polytechnique (JAMIN est un opticien de renom et académicien). Henri devient ingénieur en 1877 mais abandonne l'administration pour se consacrer à la physique.



*César-Antoine BECQUEREL 1788 - 1878*



*Edmond BECQUEREL 1822 - 1891*



*Statue de César-Antoine BECQUEREL  
à Châtillon-Coligny*



*Henri BECQUEREL 1852 - 1908*

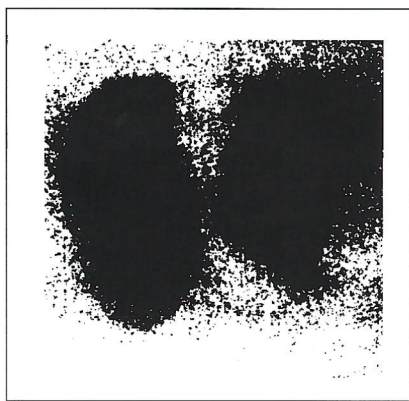


*Jean BECQUEREL 1878 - 1953*

Ses premiers travaux de recherche portent principalement sur l'optique. Entre 1875 et 1882, il s'intéresse à la polarisation rotatoire induite par des champs magnétiques et à la polarisation atmosphérique. A partir de 1883, il étudie les spectres infrarouges des vapeurs métalliques. De 1886 à 1888, il étudie l'absorption de la lumière dans les cristaux et soutient sa thèse de doctorat en 1888.

En 1889, il est élu à l'Académie des Sciences. Nommé professeur de physique au Muséum d'Histoire Naturelle, en 1892, après la mort de son père, il conclut sa leçon inaugurale consacrée à l'exposé des travaux de ses deux prédécesseurs, son père et son grand-père, en parlant **"d'une vie toute entière consacrée au culte de la science"**.

En 1895 il devient professeur à l'École Polytechnique. C'est le 20 Janvier 1896, encouragé par Henri POINCARÉ, qu'il décide d'entreprendre des recherches pour savoir si la fluorescence des sels d'uranium, étudiée depuis deux générations au Muséum, est de même nature que les rayons X.



Première photographie montrant l'émission spontanée des rayons uraniques

Guidé par cette idée -qui allait bientôt se révéler fautive- BECQUEREL choisit pour ses expériences un sel qu'il est en train d'étudier : le sulfate double d'uranyle et de potassium. Pour obtenir la phosphorescence, il l'expose d'abord au soleil pendant quelques heures, puis le place sur une plaque photographique préalablement enveloppée de papier noir ; il enferme le tout dans une boîte, espérant qu'un rayonnement émanant du sel phos-

phorescent traversera le papier noir pour venir impressionner la plaque. Effectivement, au développement, la plaque est impressionnée. Il communique sa découverte à l'Académie des Sciences le lundi 24 Février 1896 et, pour mieux cerner le phénomène, il continue à expérimenter. Par exemple, il interpose une pièce de monnaie entre le cristal phosphorescent préalablement exposé au soleil et le paquet en papier noir contenant la plaque photo. Il enferme le tout dans une boîte. Au bout de quelques heures, le développement de la plaque révèle l'ombre portée de la pièce : les rayons émis par le cristal ont été arrêtés par le métal... comme pour les rayons X. Le soir venu, Henri BECQUEREL prépare ses expériences pour le lendemain : plaques photos emballées de papier noir, cristaux prêts pour l'exposition au soleil car il pense toujours que l'excitation de la fluorescence est indispensable à l'émission du rayonnement.

### C'EST ALORS QUE LE DESTIN VA ENTRER EN JEU

Le lendemain, le ciel est couvert de gros nuages ; le physicien range son matériel dans un tiroir car aucune exposition au soleil n'est possible et ceci pendant plusieurs jours (on est à la fin Février).

Le dimanche 1er Mars 1896, le soleil reparait. Henri BECQUEREL va donc recommencer ses expériences mais, dans une intuition géniale, il vérifie d'abord l'état d'une des plaques restées dans le tiroir pendant plusieurs jours. La notion de **"témoin"** est très importante en recherche scientifique. A son grand étonnement, la plaque a été impressionnée, bien que le cristal n'ait pas été ensoleillé au préalable. Donc, il arrive à la conclusion que les cristaux de sels d'uranium émettent naturellement des radiations pénétrantes sans avoir été préalablement excités par la lumière. Dès le lundi 2 Mars, à la séance hebdomadaire de l'Académie des Sciences, Henri BECQUEREL annonce la découverte des rayons uraniques.

Il était temps car, en ANGLETERRE, à LONDRES, Sylvanus THOMPSON travaille aussi sur la fluorescence du nitrate d'uranium et s'appête à publier des résultats. Le destin a permis que BECQUEREL le devance de très peu de temps...

Après cette découverte, Henri BECQUEREL continue ses expérimentations. Il vérifie que la phosphorescence n'est pas nécessaire à l'émission de rayonnement et que celui-ci est dû à l'uranium lui-même, qu'il soit sous forme métallique ou sous forme de composés solides ou en solution.

Or, une jeune femme d'origine polonaise Marie SKLODOWSKA, née à VARSOVIE en 1867, épouse d'un physicien confirmé Pierre CURIE (inventeur avec son frère Jacques du quartz piézoélectrique) cherche un sujet de thèse de doctorat. Conseillée par son mari, elle choisit l'étude des nouveaux rayonnements uraniques de BECQUEREL. Elle commence son travail en décembre 1897. Elle mesure quantitativement l'activité des sels d'uranium par leur pouvoir d'ionisation de l'air et ceci grâce à l'électromètre à quartz piézoélectrique des frères CURIE.

Quatre mois plus tard, à la séance du 12 Avril 1898, elle présente à l'Académie des Sciences une note tout à fait remarquable : elle confirme -comme BECQUEREL l'avait déjà énoncé- que le rayonnement uranique est une propriété de l'atome d'uranium mais, de plus, elle annonce que des composés de thorium sont également actifs et que certains minéraux comme la pechblende (oxyde d'uranium) et la chalcocite (phosphate de cuivre et d'uranyle) sont beaucoup plus actifs que l'uranium lui-même. **"Ce fait est très remarquable, écrit-elle, et porte à croire que ces minéraux contiennent un élément beaucoup plus actif que l'uranium"**.

Et c'est alors que Marie CURIE donne le nom plus général **"Radioactivité"** à l'émission par différents corps de rayonnement analogues à ceux de l'uranium. Trois mois plus tard, en Juillet 1898, Marie et Pierre CURIE annoncent la découverte d'une nouvelle substance radioactive : le **Polonium**, métal voisin du bismuth par ses propriétés chimiques.

En décembre 1898, c'est l'annonce de la découverte du **Radium** par ce même couple de chercheurs qui travaille avec acharnement : leur épopée est une très belle histoire, assez longue à raconter qui pourrait faire l'objet d'un autre article. Ils fonderont à leur tour une dynastie de savants : les JOLIOT-CURIE.

En 1899, BECQUEREL reçoit des CURIE un tube de verre contenant une petite quantité de radium ; de crainte de le perdre, il n'ose s'en séparer et garde précieusement le tube dans la poche intérieure de son veston. Après quelques jours, il sent une démangeaison sur la peau et constate une brûlure. Pierre CURIE refait l'expérience et observe le même phénomène. Des études systématiques sont faites. C'est le début de la radiothérapie. Dès 1901, DANLOS, médecin de l'hôpital Saint-Louis à PARIS, soigne des lupus - maladies cutanées - par le radium et obtient des guérisons.

En Juin 1903, Marie CURIE soutient sa thèse de doctorat. A la fin de la même année, en 1903, le Prix Nobel de Physique est attribué à BECQUEREL, Pierre et Marie CURIE pour leur découverte de la radioactivité spontanée et leurs études des rayonnements émis.

C'est le troisième prix Nobel de Physique : le premier ayant été décerné en 1901 à W.C. RONTGEN -physicien Allemand- pour la découverte des rayons X, le second ayant été attribué en 1902 à LORENTZ et ZEEMANN, physiciens néerlandais pour l'étude de l'influence du champ magnétique sur la lumière. En 1903, c'est la FRANCE qui est honorée par le prix Nobel car la Radioactivité est une invention bien française : c'est pourquoi l'unité d'activité du système international (une désintégration par seconde) définie en 1980, s'appelle un Becquerel et non pas un Thompson ! Et il est bien certain que la découverte initiale de BECQUEREL du 1er Mars 1896 a été le point de départ des découvertes ultérieures (polonium, radium, radioactivité artificielle...) par la famille CURIE. Mais il est certain aussi que cette décou-

te prodigieuse a été le fruit du travail de trois générations de chercheurs : Henri, sublimant par une inspiration de génie toutes les connaissances accumulées par son grand-père sur la fluorescence et par son père sur les propriétés remarquables des sels d'uranium.

Après ce prix Nobel, Henri BECQUEREL continue ses travaux en collaboration avec les CURIE mais il meurt prématurément au CROISIC le 25 Août 1908 à l'âge de 56 ans.

Cependant, il a eu la joie de transmettre le flambeau scientifique à son fils Jean.

Jean BECQUEREL, fils de Henri et Lucie JAMIN, naît à PARIS en 1878, l'année de la mort de son arrière grand-père Antoine-César, fondateur de la dynastie scientifique. Sa mère meurt en 1878 quelques semaines après sa naissance.

Elève, comme son père, au Lycée Louis-le-Grand, il entre à l'Ecole Polytechnique en 1897 et suit la voie tracée par ses ancêtres.

Nommé en 1909 au Muséum d'Histoire Naturelle dans la chaire de Physique, il succède dans ce poste à ses trois ascendants directs : Antoine-César, Edmond, Henri.

Ses recherches portent sur les propriétés optiques et magnétiques des cristaux.

Il découvre la polarisation rotatoire paramagnétique. Il étudie aussi :

- la relativité
- les transmutations d'éléments
- les rapports de la physique avec l'art musical
- l'expansion de l'Univers.

Il entre à l'Académie des Sciences en 1946, l'année de la célébration du cinquantenaire de la découverte de son père (émission d'un timbre). Il meurt à PORNICHET en 1953 sans laisser de descendants pour reprendre le flambeau.

Mais à CHATILLON-COLIGNY, berceau de la famille, il y a un musée BECQUEREL et aussi la statue de l'ancêtre Antoine-César. De plus, à ROUEN, un centre de lutte contre le cancer porte le nom de Henri BECQUEREL (Centre Henri BECQUEREL rue d'Amiens 76038 ROUEN

Cedex). En effet, les applications médicales de la radioactivité ayant transformé le diagnostic et le traitement des tumeurs, il est bien juste que ce nom illustre, attaché à la prodigieuse aventure de la radioactivité, soit ainsi célébré.

En terminant, il faut souligner que RONTGEN, BECQUEREL puis les CURIE n'ont jamais pris de brevets pour leurs inventions dont les applications scientifiques, industrielles, techniques, médicales, sont innombrables.

Ils ont travaillé sans idée de profit, d'argent.

Ils ont été parfaitement désintéressés. Ce sont des bienfaiteurs de l'Humanité.

En conclusion, je laisse la parole à Pierre CURIE qui disait en 1903 en recevant le prix Nobel :

*“On peut concevoir que dans des mains criminelles le radium puisse devenir très dangereux, et ici on peut se demander si l'humanité a davantage à connaître les secrets de la nature, si elle est mûre pour en profiter ou si cette connaissance ne lui sera pas nuisible. L'exemple des découvertes de Nobel est caractéristique, les explosifs puissants ont permis aux hommes de faire des travaux admirables. Ils sont aussi un moyen terrible de destruction entre les mains des grands criminels qui entraînent les peuples vers la guerre. Je suis de ceux qui pensent avec Nobel que l'humanité tirera plus de bien que de mal des découvertes nouvelles”*

*Pierre CURIE  
(Conférence Nobel 1903)*

## BIBLIOGRAPHIE

ÉLECTRICITÉ DE FRANCE  
Centre de Production Nucléaire de DAMPIERRE  
ECOLE POLYTECHNIQUE SABIX  
ADASTA : Centre de Ressources

# La vulgarisation scientifique

par **Roland FUSTIER**  
Professeur de Sciences Physiques  
au Lycée Virlogeux de Riom

## INTRODUCTION

Jean Rosmorduc déclare dans la préface de son ouvrage *25 mots clés de la culture scientifique* : «on ne demande pas à un individu qui a une culture musicale d'être un virtuose du piano ou de composer. Posséder une culture scientifique n'implique pas que l'on manie les concepts et les instruments comme un chercheur et que l'on expose les connaissances théoriques comme un enseignant. L'individu possédant une culture scientifique en saisit le sens général des éléments les plus importants, sait qu'ils ne constituent qu'un moment de la connaissance de l'humanité susceptible d'être remise en cause». Il comprend les enjeux sociaux des inventions et des nouveaux concepts.

## PROBLEMATIQUE

Avant toute chose, ouvrons un dictionnaire. Le Robert définit la vulgarisation comme «le fait d'adapter un ensemble de connaissances scientifiques et techniques de manière à les rendre accessibles à un lecteur non spécialisé, de reformuler un discours portant sur un objet de science afin d'être compris d'un plus grand nombre».

Il faut assurer à la science une présence dans la culture générale des gens

afin qu'ils puissent mieux comprendre leur environnement quotidien dont ils savent de moins en moins de chose. En effet, le citoyen est psychologiquement de plus en plus dépendant, sur le plan matériel, des spécialistes. Le vulgarisateur va s'interposer entre ceux-ci et celui-là.

Il n'est pas honteux de vulgariser quand on pense que le grand EINSTEIN en personne a jugé cette démarche utile. Les vrais grands esprits ont le génie de la simplification, ils cherchent les mots pour le dire, les images qui facilitent la compréhension et les métaphores éclairantes. Certains vulgarisateurs brillants (Hubert Reeves, Albert Ducrocq, Joël de Rosnay) réussissent là où le système éducatif échoue. Indiscutable sur le plan scientifique, Hubert Reeves montre aussi un talent littéraire, une belle tête, un bel accent : c'est un chercheur du théâtre de la science. Si vous n'êtes pas littéraire en même temps que scientifique, personne ne vous suivra. Le génie est de trouver l'interface qui permette à la fois de donner envie de s'introduire dans une discipline et de soutenir l'intérêt par un récit passionnant. Mais comment choisir des termes qui tout en étant simplificateurs, ne soient pas réducteurs de la réalité complexe que l'on cherche à décrire ? Toutefois beaucoup d'articles et d'émissions ont pour objectif la relation publique de la communauté scientifique voulant montrer au «bon peuple» les mer-

veilles de ses découvertes. Mais, participer à une culture scientifique consiste-t-il seulement à donner un vernis de savoir, une connaissance factice ? Le message sera efficient si l'enseigné a le sentiment d'avoir compris quelque chose qui lui donne le pouvoir de se faire une opinion, de se sentir moins démuné face aux spécialistes, dans le but agir si besoin est. Fouquier prétend notamment que la bataille se fait sur les systèmes de représentation. Il ne s'agit pas de conduire des récepteurs ignorants vers un savoir scientifique mais d'habituer les regards vers une vision scientifique du monde. Il faut donc aboutir à un discours scientifique en prenant appui sur l'histoire, la philosophie, les représentations populaires plus que sur la science proprement dite. Il n'empêche que la vulgarisation repose en partie sur la confiance puisque le profane a peu de garanties pour juger les informations. Alors qu'il est bon en littérature de laisser vagabonder son imagination, dans le domaine scientifique, il est au contraire nécessaire de construire ses connaissances avec une certaine rigueur.

## CRITIQUES

Le slogan «la science pour tous» ne cache-t-il pas un autre slogan plus intéressé qui serait «tous pour la science» ?

La vulgarisation échoue souvent car elle est plus soucieuse de son rapport avec la science des spécialistes que de celui qui la lie au public. Sous la pression des disciplines, les cours de science cherchent à faire entrer dans le monde des scientifiques plus que d'aider à explorer le monde. Son principal objectif devrait être d'offrir à quiconque la possibilité de devenir scientifique plutôt que de créer une relation de dépendance par rapport à un savoir socialement incarné dans des classes différentes. L'apparente indifférence de l'homme de la rue l'illustre parfaitement, tempérée toutefois par un certain succès de la formation permanente, (celle-ci touchant il est vrai, une frange de la population plus à l'écoute). Or, l'augmentation autonome du savoir croît avec la situation sociale et le degré d'instruction, (on apprend d'autant plus que l'on sait). La vulgarisation n'arrive donc pas à transformer la hiérarchie du savoir et des compétences issus du système d'enseignement traditionnel et elle renforcerait plutôt sa légitimation.

Elle fait partie du métier de chercheur, soucieux de faire connaître et partager ses résultats au plus grand nombre ! Il est d'ailleurs curieux de constater que les enseignants sont souvent plus critiques vis-à-vis de la vulgarisation que les chercheurs ! Cela viendrait-il d'un sentiment de frustration ? Si la diffusion de la recherche est une composante du champ scientifique, la logique de l'exposition ne se superpose pas toujours à celle de l'investigation. La démarche empirique, les intuitions créatives, la répétition besogneuse ne transparaissent pas toujours dans le discours.

Quels sont alors les arguments des scientifiques qui refusent ouvertement la vulgarisation ?

- la science n'est pas expliquée mais seulement mise en scène
- on présente un produit simili nanti de fausses connaissances
- on contribue à bâtir le mythe de la scientificité
- le discours sur la science est souvent trop dogmatique

- on peut bluffer les gens avec des pseudo-connaissances scientifiques

- les journalistes des rubriques scientifiques lisent trop souvent en diagonale et se comportent trop en critiques et essayistes

- on crée une certaine technocratie qui va de colloque en colloque faisant finalement peu avancer le problème.

## QUELQUES REPONSES

Quel est l'objectif poursuivi ?

- transmettre un savoir pour parler ?
- transmettre un savoir de culture ?
- transmettre un savoir pour le savoir ?

OU FORMER DES COMPE-  
TENCES ?

Quel est le public visé ?

- des spécialistes d'un autre domaine ?
- issu de l'enseignement supérieur scientifique ?
- niveau baccalauréat scientifique ? ou autre ?
- possédant un vocabulaire scientifique de base ?
- possédant un bon niveau dans la langue française ?

ET SURTOUT CE PUBLIC ADHE-  
RE-T-IL A LA FORMATION OU  
AU MOINS A L'INFORMATION ?

... Et comment attirer le «non public» ?

Dans le système éducatif essayons tout de même de «vendre» des sciences physiques à tous les élèves en ayant parfaitement conscience que certains ne sont pas motivés. Réfléchissons à l'utilisation des techniques de communication qui, en d'autres circonstances, incitent à l'achat. Tendons des «perches» à l'apprenant qui se juge souvent incapable d'apprendre, évitons qu'il ne se ferme définitivement aux sciences. Serge MOSCOVICI prétend que l'image et l'analogie sont les deux énergies nucléaires de notre univers de communication.

## L'IMAGE

L'image paraît sans rivale car elle est immédiatement accessible. Pourtant le rapport PROMONTI (1989) montre l'échec relatif de l'utilisation de l'audiovisuel en science. La plupart des films conçus pour un large public cherchent à rabattre la pensée scientifique à la pensée commune (BACHELARD). En cela il ne ferait que la moitié du chemin car il faudrait repartir en sens inverse. Ne choisit-on pas un sujet parce qu'il est facile à expliquer ?

Les médias doivent prendre une large part à la vulgarisation. Ils doivent attirer, séduire par le plaisir des yeux et la détente de l'esprit, mais à partir de là ils ont déjà des difficultés à fidéliser. Dans l'ère du «zapping», ils butent sur la limite «temps» que les auditeurs veulent y consacrer. L'enseignant qui doit en priorité assurer ses cours, préparer ses travaux pratiques, corriger ses copies, participer à un certain nombre de réunions doit prendre sur son temps libre s'il veut rester un éternel étudiant, toujours en état d'alerte. Il faut admettre que la télévision, les conférences, les expositions ou les visites d'usines appellent un prolongement écrit ou un cours. Pour le professeur comme pour l'élève, il est évident qu'il n'y a pas de méthode pour accéder à la connaissance sans effort personnel, au besoin douloureux. L'esprit préscientifique peut se laisser surprendre par l'aspect insolite d'une expérience (difficulté par exemple à concevoir des ordres de grandeur autres que l'échelle humaine). Il peut constater que les corps tombent, se contenter de cette affirmation sans chercher à approfondir l'étude de la chute en recherchant les variables.

## Utilisation des films

La vidéo est d'une grande souplesse d'utilisation. On peut choisir dans son cours le moment de la visualisation, ne passer qu'une partie de l'enregistrement, arrêter, revenir en arrière... Il faut avoir réfléchi aux objectifs :

- Pourquoi utiliser tel film ?
- Que va-t-il apporter ?
- Connaissances antérieures des élèves ?
- Rôle du professeur pendant la projection ?
- Comment l'exploiter ?
- Comment évaluer son impact ?

Une surdose d'images peut aussi faire perdre la raison, le passionnel prenant alors le dessus jusqu'à la glorification possible de fausses sciences.

## LA METAPHORE

Les scientifiques n'aiment pas les métaphores, pourtant elles sont un instrument de premier plan dans la clarification comme dans la construction des connaissances. Les concepts sont parfois des métaphores durcies et sociabilisées au point qu'elles sont devenues des notions fondamentales. Le courant disciplinaire (la «Fac») de la pensée scientifique a tendance à occulter le caractère métaphorique de ses concepts comme étant les résultats d'observations. Il nous arrive au Lycée de présenter des situations soi-disant concrètes dans le cours pour contribuer à la compréhension du modèle alors que c'est celui-ci qui devrait nous aider à résoudre les problèmes. Elles ne s'apprennent pas (ne sont pas connaissance) mais s'emploient (un outil). La métaphore peut aider à traduire la science aux non scientifiques. La comparaison d'un fait nouveau avec un objet familier est rassurante. On a souvent affaire à des choses qu'on ne peut ni voir, ni toucher, ni sentir. Il ne reste alors que notre imagination pour les définir. La fonction pédagogique de la métaphore permet de communiquer en faisant comprendre, ou plutôt saisir, des phénomènes hors de la portée de nos sens, voire trop abstraits. Elle joue un rôle clé en visualisant, en imaginant dans notre quotidien pour diffuser les idées nouvelles difficiles. C'est un exercice pédagogique périlleux qui

consiste à inventer des signes, des discours compréhensibles par le plus grand nombre, des images capables de communiquer des messages, non seulement des informations mais aussi des notions, des concepts. Ceux-ci pris dans un univers habitué à manier l'abstrait seront traduits pour un public plus habitué au concret.

### Exemple :

La métaphore de l'écoulement d'un liquide entre deux réservoirs situés à des altitudes différentes est souvent utilisée pour introduire la notion de différence de potentiel et justifier la circulation de charges. Sa limite apparaît rapidement : si on coupe la canalisation entre les deux réservoirs l'eau s'écoule toujours... Et si on coupe le fil électrique ? ! !

Cette métaphore appliquée au déplacement de chaleur entre deux corps (sources) de températures différentes a permis à la notion de **calorique** (fluide) de résister un certain temps. Il ne faut toutefois pas trop insister sur une métaphore, ne pas la répéter trop souvent, car elle est destinée à disparaître une fois la théorie assimilée ou quand celle-ci va changer.

## LES PROBLEMES DE L'INFORMATION

Trois acteurs interviennent dans l'information :

- les milieux scientifiques qui la produisent,
- les médias qui la transmettent en pratiquant l'investigation ou la vulgarisation,
- les publics (et non le public) qui la reçoivent.

NB : les attentes des publics et les normes exigeantes des médias influent en retour sur la production de l'information. Il arrive aussi bien aux scientifiques qu'aux journalistes de céder à certaines modes en s'ap-

puyant sur l'intérêt supposé des publics.

Comment est produite l'information ? Habituellement la publication d'un chercheur ou d'une équipe est destinée aux spécialistes pour la soumettre à la critique. La communauté scientifique n'est pas immunisée contre les effets d'écoles, les luttes d'influence et les arguments d'autorité. Le manque de formation historique et philosophique empêche souvent de situer le travail dans l'évolution des connaissances et du contexte social (les références antérieures remontent au maximum à cinq-six ans).

Interaction avec les médias :

Les spécialistes de l'information confondent parfois passion et hystérie, adoptent un ton excité pour imiter l'enthousiasme qui serait celui des chercheurs. Ont-ils toujours les moyens d'évaluer l'importance d'une découverte ? Les chercheurs ne voulant pas laisser le soin aux journalistes de faire toute l'information sont amenés à emprunter les mêmes pratiques, à simplifier abusivement, rechercher le sensationnel, les effets d'annonce, pour assurer leur promotion. Ils ne doivent pas faire l'impasse sur les conditions de production pour ne pas dénaturer la portée et la signification de leur recherche.

## REFERENCES

*La vulgarisation scientifique* B. JURDANT, La Recherche février 75

*Signes et discours dans l'éducation et la vulgarisation scientifiques*

Actes des sixièmes journées internationales sur l'éducation scientifique, collection Giordani et Martinant Z'éditions.

*Alphabétisation scientifique et technique* Gérard FOUREZ De Boeck Université.

Revue du Palais de la Découverte mars 95 (transmettre la science aujourd'hui).

*Au Musée Mandet  
de Riom*

**Reliure  
haute couture**

*Le Musée Mandet présente des reliures originales créées par des artistes contemporains à la demande de la bibliothèque municipale de Riom. Une occasion également de parcourir rapidement l'histoire de la reliure.*

La bibliothèque municipale de Riom possède un fonds ancien constitué à l'origine par la bibliothèque du collège des Oratoriens et qui s'est enrichi peu à peu grâce à des dons et des legs de personnalités locales : Romme, Malouet, Dumoulin, Clémentel et plus récemment la Marquise de Montgon et Mlle Carriau.

Depuis une trentaine d'années, quelques acquisitions sont venues compléter le fonds local et régional et c'est en 1978 qu'a débuté la constitution d'un fonds de bibliophilie contemporaine. Celle-ci avait pour but d'assurer la continuité de ce fonds dont certains documents datent du Moyen Age.

La création d'un fonds de reliures d'art répond elle aussi à cet objectif. Mais l'origine de cette initiative, réside également dans la conviction que les bibliothèques ont une autre mission qui est d'encourager la création, et aussi la rencontre entre les créateurs, les artistes et le public.

Enfin, une autre raison a conduit à développer ce projet à Riom. Riom est, en effet, **une ancienne ville de tanneries**. Or, l'art de la reliure est très étroitement lié au travail du cuir. Aussi, créer un fonds de reliures à Riom, c'était faire mieux connaître un artisanat d'art peu connu en France et renouer symboliquement avec le passé de la ville.

*Lieu de l'exposition : Musée Mandet  
14, rue de l'Hôtel de Ville  
63200 RIOM - Tél. : 73 38 18 53  
jusqu'au : 12 mai. Visites commentées :  
les dimanches à 15 h 30  
14 et 28 avril - 5 et 12 mai*

*Au Musée Lecoq  
à Clermont-Ferrand :*

**Exposition :  
des plantes  
et des hommes**

L'être humain dépend obligatoirement des plantes pour sa survie, alors que les plantes - apparues sur la terre bien avant lui - n'ont aucunement besoin de lui pour leur développement.

Depuis quelques années, l'homme redécouvre qu'il est indissociable de son environnement, avec lequel il forme un tout : l'ECOSYSTEME. Cette prise de conscience s'accompagne d'un changement dans les mentalités et les comportements, notamment dans la relation à l'univers végétal.

Ces relations entre les hommes et les plantes s'expriment à travers différents usages que nous faisons des plantes : **thérapeutique, alimentaire, cosmétique, magique, vestimentaire, objets d'étude scientifique...** sans oublier que les plantes sont les grandes pourvoyeuses d'oxygène sans lequel nous mourrions asphyxiés.

L'exposition explore cette relation de l'homme à l'univers végétal à travers cinq modules, qui en illustrent de manière vivante les grands axes.

**L'espace magique et symbolique** avec le marché des guérisseurs, la porte ouverte sur les traditions, le langage des fleurs.

**L'espace thérapeutique** avec l'herboristerie, les préparations à base de plantes et la pharmacologie.

**L'espace du futur** avec les cultures hors-sol, les cultures in vitro, la télé-détection et les brèves du futur.

**L'espace historique et quotidien** avec l'histoire du thé, du café, du chocolat, les produits de l'épicerie, le blé et le maïs.

**L'espace artistique** avec la mode, les timbres, la musique, la peinture et le land'art.

*Cette exposition est conçue et réalisée par l'Association LA SANTA MARIA à Paris. Jusqu'au 30 juin 1996.*

*Musée Lecoq - 15, rue Bardoux  
63000 Clermont-Ferrand  
Tél. 73 91 93 78*

*Au Musée Crozatier  
au Puy-en-Velay :*

**Hommage  
à Pierre NAUTON  
(1912 - 1970)**

Linguistique et technologue, directeur de l'Institut d'Etudes Romanes Pierre Gardette à Lyon.

A l'occasion de la publication par la société des Amis du Musée Crozatier du fonds photographique réalisé par le frère Nauton lors de son enquête technolinguistique sur le sud du Massif Central, le musée organise une exposition à partir des clichés les plus significatifs de la vie matérielle de la société agraire régionale dans l'immédiat après-guerre. Cette exposition sera accompagnée d'évocations d'ambiances créées à l'aide des collections ethnographiques du musée.

*Début avril - Fin août 1996.*