# SAUVERGNE S CIENCE S

# **BULLETIN DE L'ADASTA**

Juin 1999 N° 45



### SOMMAIRE

#### N° 45

- La théorie des
catastrophes p. 3
- Abonnement p. 13
- Le génie d'André Marie
Ampère p. 14 - Une nouvelle modalité
d'imagerie médicale :
La tomographie par
émission de
positonsp. 23
<ul> <li>Les terminaux audiovisuels de</li> </ul>
téléconférencep. 25
- Visite aux eaux
de Volvicp. 31
- Exposoleil p. 32

#### **PERMANENCES:**

Tous les jours ouvrables de 9 h 00 à 12 h 00 et le mercredi de 14 h 00 à 17 h 00

#### **AUVERGNE-SCIENCES**

Publication trimestrielle
19, rue de Bien-Assis
63100 CLERMONT-FERRAND
Directeur de la Publication
Suzanne GELY
Rédaction: Jocelyne ALLEE
N° ISSN 1166-5904
Photo de couverture:
Le Soleil et les éclipses
(Voir article Exposoleil)
Dépôt légal Juin 1999

Imprimeries Centre France - REIX 04 73 60 75 75 - 32408

### **EDITORIAL**



Voici un nouveau numéro de la revue... L'Adasta continue, dans l'espérance, sa marche vers l'an 2000.

Cependant les difficultés ne manquent pas. L'équipe très active des animateurs souhaiterait recruter des bonnes volontés pour l'aider à faire face au travail quotidien de l'Association.

Nous avons cependant la satisfaction d'être encouragés dans notre Mission par votre fidélité et aussi par la reconnaissance officielle du Ministère de l'Education Nationale, de la Recherche et de la Technologie : sur la carte de France qu'il vient d'éditer, l'ADASTA est signalée comme centre de culture scientifique et technique.

Nous continuons les activités de collaborations avec nos adhérents :

- prêts de matériel d'expositions,
- visites à caractère scientifique
- interventions ponctuelles dans les établissements scolaires qui nous le demandent...

Nous remercions vivement tous ceux qui nous aident dans cette mission.

Suzanne GELY

L'ADASTA
a participé à
EXPOSCIENCES
les 26, 27, 28 et
29 mai 1999
à la salle polyvalente
de Cournon
sur le thème des
éclipses de Soleil.



# La théorie des catastrophes

En 1972, il v aura donc bientôt trente ans, René Thom, brillant mathématicien français, lauréat de la médaille Fields, publiait un ouvrage fondamental intitulé: "Stabilité structurelle et morphogénèse". Sous ce titre à la fois abstrait et hermétique il présentait en fait une théorie ambitieuse à vocation universelle : la théorie des catastrophes. La simplicité et l'esthétique géométrique de cette théorie devaient très naturellement susciter l'intérêt et même l'enthousiasme des théoriciens, si bien que, dépassant la physique mathématique, on vit les chercheurs à l'affût d'applications dans tous les domaines de la Science, depuis les sciences dites "exactes" comme les sciences physiques, jusqu'à des sciences plus qualitatives comme les sciences humaines. Cet engouement extrême fut suivi d'une polémique tout aussi extrême débordant largement sur la philosophie. Aujourd'hui avec un peu de recul, il est intéressant de raconter cette histoire car elle éclaire très bien la notion de modèle telle que l'utilisent les scientifiques et cela nous permettra de nous interroger non plus sur le passé, mais sur l'avenir de la théorie des catastrophes.



Charles Ruhla Professeur émérite à l'Université Claude Bernard Lyon 1

## LA NOTION DE CATASTROPHE

Qu'est-ce qu'une catastrophe au sens du physicien ? Nous pouvons en donner une définition à la fois précise et générale :

"On dit qu'il y a catastrophe si un système physique en évolution lente devient le siège d'un changement rapide de son mouvement, de son état, ou des deux à la fois".

Dans notre expérience familière, les exemples fourmillent : une ébullition, une chute d'eau, une vague déferlante, un bateau qui chavire... L'objectif de René Thom est de classer ces événements en différents types de catas-

trophes élémentaires et nous allons commencer par décrire la plus simple de toutes.

LA PREMIERE CATASTROPHE ELEMENTAIRE : LE PLI

Les amateurs de promenades en montagne connaissent tout le charme de ces lacs aux eaux limpides que l'on découvre au détour d'un sentier. Installés dans des cuvettes morainiques laissées par le retrait des glaciers, ils survivent grâce à un petit barrage naturel, dénommé verrou, qui interdit la fuite des eaux vers la vallée. Toutefois, ces mêmes promeneurs découvriront parfois des cuvettes asséchées parce que le verrou a cédé et que l'eau s'est enfuie : c'est, typiquement, et dans tous les sens du terme, une catastrophe. Essayons d'analyser ce problème, non plus en touriste, mais en physicien. En considérant une coupe verticale on schématise facilement la cuvette et son verrou (figure 2). Le profil obtenu est très bien représenté par une fonction du troisième degré de la forme  $y = x^3 + px$  (avec p négatif) qui va jouer le rôle d'une fonction potentielle (figure 3). En effet, l'état du lac est très bien

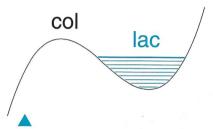


Figure 2 : La vie et la disparition d'un lac de montagne est un phénomène qui relève typiquement de la théorie des catastrophes.

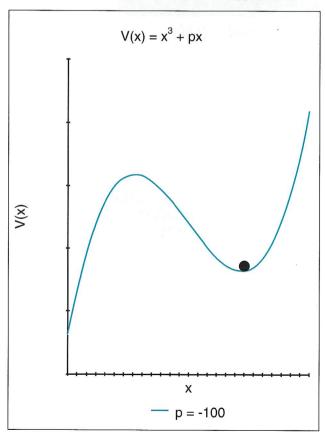
Figure 3: L'état d'équilibre stable d'une bille au fond d'une cuvette de potentiel modélise très bien l'état d'équilibre d'un lac de montagne.

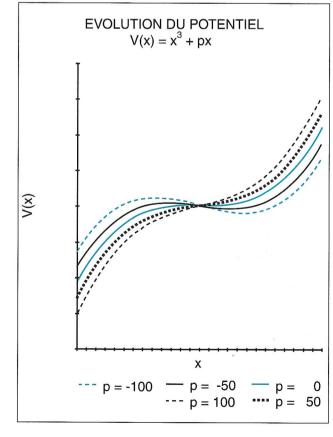
modélisé si l'on recherche l'état d'équilibre d'une bille placée à l'intérieur d'une cuvette de potentiel de la forme  $V(x) = x^3 + px$ . Soumise à l'action de la pesanteur, la bille, après quelques oscillations rapides vite amorties, s'immobilise en équilibre stable au fond de la cuvette qui correspond au minimum de l'énergie potentielle. Un tel système mécanique est appelé système dissipatif; ceci veut dire que l'énergie cinétique de la bille est dissipée par frottement sous forme d'énergie calorifique jusqu'à ce que la bille soit immobile. Si la forme du potentiel évolue lentement, la bille accompagne la déformation en restant constamment en équilibre stable au fond de la cuvette, avec une abscisse x positive...tout du moins tant qu'il existe une cuvette! Que va-t-il donc arriver lorsque le paramètre p va croître (figure 4)? On peut suivre graphiquement l'évolution de la forme du potentiel V(x) lorsque le paramètre p croît de la valeur -100 à la valeur + 100 (unités arbitraires). Pour les valeurs négatives de p il y a un minimum correspondant à un équilibre stable. Un phénomène catastrophique apparaît au moment où p atteint la

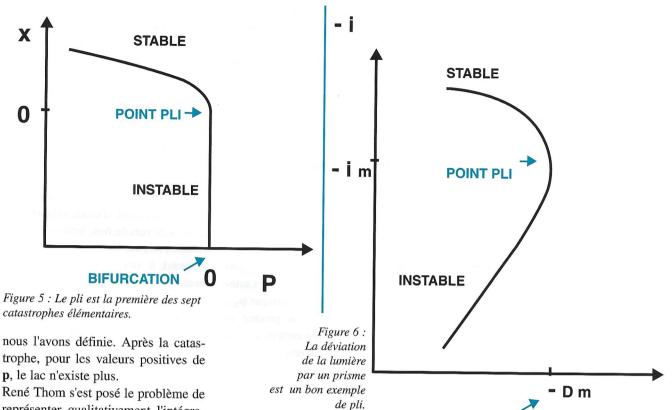
valeur  $\mathbf{p} = \mathbf{0}$ . Le minimum vient de disparaître, la bille n'est plus en équilibre stable, et elle va chuter vers les valeurs de  $\mathbf{x}$  fortement négatives. Pour les valeurs positives de  $\mathbf{p}$  il n'y a plus de minimum et il n'y a plus de bille en équilibre.

Il en est de même pour le lac. Par des mouvements lents, à l'échelle des temps géologiques, l'altitude du verrou s'abaisse tandis que celle du fond du lac remonte. Dans notre modèle mathématique, cela veut dire que le paramètre p croît, devenant ainsi de moins en moins négatif. Le phénomène crucial se produit au moment où le niveau de la surface du lac atteint l'altitude du verrou ; cela se produit au voisinage de la valeur p = 0. Alors l'eau commence à se déverser dans la vallée et, par un processus érosif qui s'accélère, le lac se vide rapidement, laissant la place à une cuvette vide ouverte sur un verrou entaillé : c'est donc bien la catastrophe au sens où

Figure 4: Lorsque le paramètre de commande p croît à partir de la valeur négative p = -100 le potentiel V(x) se déforme progressivement. Dès que p atteint la valeur p = 0 l'équilibre stable d'une bille n'est plus possible.







trophe, pour les valeurs positives de p, le lac n'existe plus.

René Thom s'est posé le problème de représenter qualitativement l'intégralité de ce phénomène catastrophique par une seule figure géométrique qui contiendrait toute l'information spatiale et temporelle sur le système. Voici sa solution (figure 5):

- Sur l'axe des abscisses, appelé axe de commande, on a porté le paramètre p, en unités arbitraires, en mettant bien en évidence la valeur catastrophique p = 0.
- Sur l'axe des ordonnées, appelé axe d'état, on a porté l'abscisse x du centre de gravité du lac (cela revient à considérer que toute la masse du lac est concentrée en un seul point).
- Avec l'écoulement du temps, le paramètre p croît, et l'abscisse x diminue ce qui veut dire que le bord du lac se rapproche du sommet du verrou.
- Lorsque p atteint la valeur 0, le lac se vide rapidement et l'abscisse x du centre de gravité passe, tout aussi rapidement, à des valeurs négatives, ce qui veut dire que toute l'eau du lac a fui vers la vallée.

Le graphe présente donc un pli au voisinage de la valeur catastrophique p = 0. La plus simple des catastrophes élémentaires est le pli. Elle correspond à une fonction potentielle du troisième degré à une variable et un paramètre. Il faut

bien réaliser que la représentation de la fin d'un lac de montagne par un pli n'ajoute pas d'information physique supplémentaire sur cette catastrophe mais qu'elle est une représentation synthétique qui fait apparaître clairement l'essentiel de ce phénomène.

#### LA DEVIATION **DE LA LUMIERE PAR UN PRISME**

Un autre exemple de pli, plus savant, mais familier aux professeurs de sciences physiques, correspond au phénomène de déviation d'un faisceau parallèle de lumière monochromatique par un prisme. Il est d'usage d'en faire la représentation par une fonction D = f(i) ou D est la déviation et i l'angle d'incidence. Mais nous pouvons aussi bien en donner une représentation par une fonction  $-\mathbf{i} = \mathbf{g}(-\mathbf{D})$ et dans ce cas le graphe correspondant apparaît très nettement comme un pli (figure 6). La partie "stable" du pli correspond aux variations lentes de - i, tandis que la partie "instable" du pli correspond aux variations rapides

de - i. L'abscisse du point pli correspond au minimum de déviation - Dm ; ce point de l'axe des abscisses est appelé point de bifurcation.

**BIFURCATION** 

D

Quant au potentiel qui gouverne ce phénomène, c'est le temps de parcours de la lumière depuis la source jusqu'au détecteur. D'après le principe de Fermat, ce temps doit être minimum et cette condition définit l'angle d'incidence pour chaque couple source-détecteur donné. On a donc ici une condition équivalente à celle de l'équilibre d'une bille dans un système mécanique dissipatif.

#### LA DEUXIEME **CATASTROPHE ELEMENTAIRE:** LA FRONCE

Poursuivant la même démarche, nous passons maintenant à un phénomène plus complexe que nous allons introduire par un exemple adéquat. Envisageons une lame d'acier bien élastique, ayant la forme d'un rectangle allongé, et que nous observons par la tranche (figure 7a). Sa forme

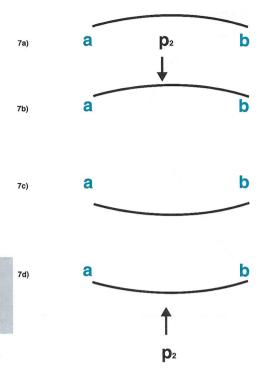


Figure 7 : Etats d'équilibre stable d'une lame d'acier fixée à ses deux extrémités.

est cintrée parce qu'elle est fixée à ses deux extrémités sur des axes  $\mathbf{a}$  et  $\mathbf{b}$  autour desquels elle peut pivoter. On peut décrire convenablement cette situation par la flèche x qui caractérise l'état cintré de la lame et par la distance  $\mathbf{ab}$  que nous utiliserons sous la forme d'un paramètre de commande  $\mathbf{p}_1 = \mathbf{ab}$ .

Que se passe-t-il si l'on exerce sur le sommet de la lame une force verticale (figure 7b) ? Nous caractériserons la grandeur de cette force par le paramètre de commande p<sub>2</sub> compté positivement lorsque la force est dirigée vers le bas. Lorsque p<sub>2</sub> croît de façon continue, la flèche x diminue d'abord lentement et régulièrement, puis soudain, pour une valeur critique positive  $\mathbf{p}_{2c}$  de  $\mathbf{p}_2$ , on observe un passage brutal de la forme cintrée vers le haut à la forme cintrée vers le bas (figure 7c). Cette nouvelle forme, symétrique de la précédente par rapport à la droite ab, est caractérisée par une valeur de x négative, opposée à la valeur de x précédant immédiatement le changement de forme. Nous venons d'observer une catastrophe, commandée par une variation du paramètre  $\mathbf{p_2}$ , et caractérisée par une variation très rapide de la variable d'état  $\mathbf{x}$ .

Est-il possible de revenir à la situation antérieure pour laquelle le cintrage était dirigé vers le haut ? Pour obtenir cela, il faut exercer une force verticale dirigée vers le haut, ce qui correspond à un paramètre p<sub>2</sub> négatif (figure 7d). Avec un certain retard, le même processus se produit en sens inverse : p<sub>2</sub> décroît lentement et régulièrement puis, pour une valeur critique négative de grandeur exactement opposée à la valeur critique p<sub>2c</sub>, la catastrophe inverse se produit et l'on repasse à la forme cintrée vers le haut avec x positif. La réversibilité de ce système n'est pas élémentaire : il existe un retard à la déformation dans un sens et dans l' autre comme si le système conservait la mémoire de sa situation antérieure. Tout ceci est finalement un peu compliqué et l'on est tenté, comme l'a fait René Thom, de chercher une représentation claire et synthétique du problème.

Commençons par préciser la fonction

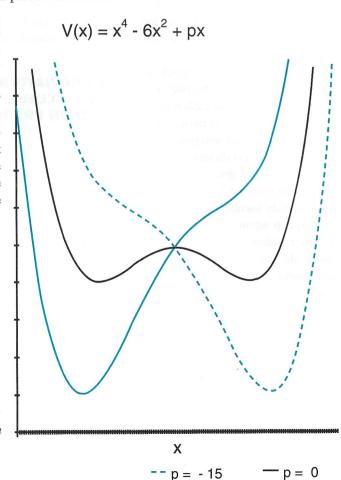
potentielle du système : c'est une fonction du quatrième degré de la forme  $V(x) = x^4 - p_1 x^2$ - p<sub>2</sub> x ; sa représentation grafait phique apparaître une cuvette de potentiel de

Figure 8: Trois formes du potentiel V(x); pour p = 0deux positions d'équilibre stable de la bille sont possibles; pour p = -15ou pour p = +15une seule position d'équilibre stable

subsiste.

forme complexe dans laquelle on peut chercher les états d'équilibre du système en suivant le mouvement libre d'une bille abandonnée à l'intérieur (figure 8). Les variations de la fonction V(x) sont représentées pour trois valeurs du paramètre  $\mathbf{p}_2$  (-15, 0, et +15 en unités arbitraires):

- Pour  $\mathbf{p_2} = \mathbf{0}$ , il y a deux minima symétriques qui correspondent à deux positions d'équilibre stable : Elles correspondent aux deux positions cintrées de la lame d'acier, soit vers le haut, soit vers le bas. Entre ces deux minima se situe un maximum qui correspond à une position d'équilibre instable: la lame d'acier peut s'y trouver, mais elle ne peut pas s'y maintenir. Si on lance une bille dans cette cuvette de potentiel elle va, après quelques oscillations vite amorties, se stabiliser en équilibre stable au fond d'un des deux minima. Le maximum intermédiaire est infranchissable et il n'y a pas de catastrophe. Pour qu'il y ait une catastrophe il faut déformer la cuvette de potentiel en changeant le paramètre p2, ce qui se fait en exerçant une force de grandeur p2 sur la lame d'acier.

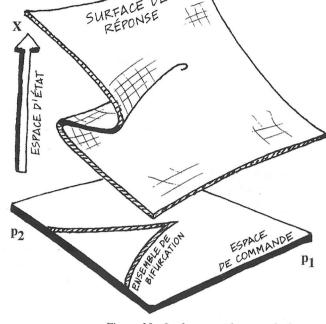


- Pour  $\mathbf{p_2} = +15$ , ce qui correspond à une force dirigée vers le bas, la cuvette de potentiel ne présente plus qu'un seul minimum, à gauche, et, si la bille se trouvait initialement à droite, elle est projetée brutalement à gauche ; ceci veut dire que la lame d'acier passe brutalement de la position cintrée vers le haut à la position cintrée vers le bas : c'est la catastrophe.

- Pour  $\mathbf{p}_2$  = - 15, ce qui correspond à une force dirigée vers le haut, la cuvette de potentiel ne présente plus qu'un seul minimum, à droite, et si la bille se trouvait initialement à gauche, elle est projetée brutalement à droite ; ceci veut dire que la lame d'acier passe brutalement de la position cin-

ment et régulièrement la force  $\mathbf{p_2}$  on constate que la flèche  $\mathbf{x}$  diminue elle aussi lentement puis soudain, pour la valeur critique  $\mathbf{p_{2c}}$ , la lame d'acier passe en forme basse : c'est la catastrophe. Ensuite, si  $\mathbf{p_2}$  continue à

croître, x devient de plus en plus négatif ce qui veut dire que le cintrage vers le bas s'accentue lentement mais il n'y a plus de catastrophe. retour, quand p<sub>2</sub> diminue, la catastrophe en sens inverse ne se produit pas pour la valeur



d'acier au repos ; si  $p_1 < l$ , la lame est

cintrée, si  $p_1 > l$ , la lame est étirée rec-

tilignement. Cela va nous conduire à

une représentation à trois dimensions.

Comme il y a deux paramètres de

commande  $p_1$  et  $p_2$ , il y a deux axes

Figure 10 : La fronce est la seconde des catstrophes élémentaires ; elle est aussi celle pour laquelle il existe dans la Nature le plus d'exemples concrets.

Flèche

X

A

C

F

D

D

G

F

C

P2c

O

P2c

P2

Figure 9 : Variation de la flèche x d'une lame d'acier en fonction de la force  $p_2$  exercée en son milieu. Il y a deux valeurs critiques  $p_{2c}$  et  $-p_{2c}$ ; elles correspondent à des catastrophes.

trée vers le bas à la position cintrée vers le haut : c'est la catastrophe en sens inverse.

Maintenant que nous avons identifié le potentiel du système nous pouvons donner une représentation plus synthétique du phénomène. Sur la figure 9 on a porté en abscisse le paramètre de commande  $\mathbf{p}_2$  et en ordonnée la variable d'état  $\mathbf{x}$ . Le graphe représentatif a la forme d'un Z aux angles arrondis. Nous partons de la branche supérieure en haut à gauche qui correspond à une lame d'acier cintrée en forme haute. En faisant croître lente-

opposée, ce qui veut bien dire qu'il y a un retard au retour à l'état initial. En principe, le graphe comporte deux branches indépendantes AH et BI mais on peut les rejoindre par une branche intermédiaire BH afin d'obtenir une courbe continue; cette branche BH représente les positions d'équilibre instable.

Force

Par exemple, pour p=0, il existe trois positions d'équilibre : une est instable (x=0), deux sont stables (x<0 et x>0). Il y a donc une zone d'instabilité insérée entre deux zones de stabilité (figure 9).

Il reste à prendre en compte maintenant la variation du paramètre  $\mathbf{p_1} = \mathbf{ab}$ que nous avions provisoirement fixé. Cette variation se fait autour de la valeur l qui est la longueur de la lame

de commande et, en conséquence, l'espace de commande est une surface plane à deux dimensions. En revanche, l'espace d'état est un axe rectiligne à une dimension : c'est un axe vertical sur lequel on a porté la valeur de la flèche x. L'intégralité du phénomène est caractérisée par une fonction  $x = f(p_1, p_2)$  dont la représentation dans l'espace à trois dimensions est appelée surface de réponse. Cette surface n'est pas plane; elle évoque au contraire une forme bien connue des couturières : la fronce. Sa projection sur l'espace de commande fait apparaître un tracé très important, celui de l'ensemble de bifurcation. A l'extérieur de cet ensemble, le système est stable tandis qu'à l'intérieur, il est instable. L'identification de la zone d'instabilité est précieuse et doit pouvoir conduire à des applications puisque l'on peut prévoir une catastrophe lorsque l'on franchit la frontière de l'ensemble de bifurcation (figure 10).

La fronce est la deuxième des catastrophes élémentaires. Elle correspond à une fonction potentielle du quatrième degré à une variable et deux paramètres.

On ne peut manquer d'admirer le caractère synthétique et l'élégance géométrique de la solution proposée par René Thom et l'on comprend qu'il ait cherché à poursuivre dans cette voie. Toutefois, avant de poursuivre nous-mêmes dans la théorie des catastrophes, une pause nous est bien nécessaire et nous allons présenter des exemples concrets de la deuxième catastrophe élémentaire.

#### LA MACHINE A CATASTROPHES DE ZEEMAN

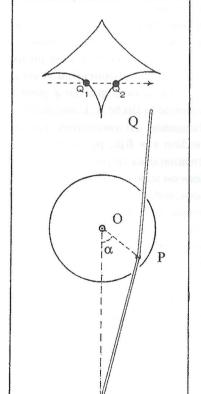
Christopher Zeeman, qui a été un des plus actifs continuateurs de René Thom, a construit une machine simple et démonstrative pour mettre en évidence la fronce. Cette machine de Zeeman est formée essentiellement d'une roue pouvant pivoter autour d'un axe O et de deux élas-

tiques NP et PO, l'ensemble étant installé sur une planche en bois (figure 11). L'extrémité N est fixe alors que l'extrémité Q est déplaçable au gré de l'expérimentateur. Lorsque l'on place le point O sur la planche de manière à tendre les élastiques on constate que la roue se met dans une position d'équilibre stable, définie par l'angle  $\alpha$ . Une fois les élastiques tendus, et pour la plus grande partie de la planche, la roue n'a qu'une seule position d'équilibre stable pour une position donnée de l'extrémité libre Q. Mais on découvre qu'il existe une région du plan, délimitée par une courbe à quatre points de rebroussement, pour laquelle il n'y a pas une seule position d'équilibre stable attachée à un point Q, mais deux positions définies par  $\alpha_1$ et  $\alpha_2$ . Dans ce cas, la roue va se placer sur l'une ou l'autre de ces positions en fonction de la situation antérieure du point O. Lorsque le point O se déplace horizontalement en venant de la gauche la roue est dans une position d'équilibre  $\alpha_1$  (point P à gauche) qui évolue lentement avec le déplacement du point Q. Cette situation se maintient lorsque le point Q atteint la posi-

tion  $Q_1$  et elle perdure jusqu'à ce qu'il arrive à la position  $Q_2$ . Alors, la roue pivote brutalement sous l'action des forces exercées par les élastiques et elle va occuper la position  $\alpha_2$  (point P à droite). C'est la catastrophe annoncée. Au retour, le point Q se déplace de droite à gauche, et la roue reste dans la position  $\alpha_2$  (point P à droite) jusqu'au moment où Q atteint la position  $Q_1$ . Alors, la catastrophe se produit en sens inverse et la roue revient en  $\alpha_1$  (point P à gauche).

La région cruciale du plan où apparaissent les catastrophes, délimitée par une courbe à quatre points de rebroussement, est l'ensemble de bifurcation d'une surface de réponse formée de quatre fronces; cette surface caractérise toutes les catastrophes de la machine de Zeeman.

Cet appareil à caractère pédagogique est facile à réaliser dans un laboratoire d'enseignement et l'on pourra, par une suite d'essais successifs, tracer complètement la frontière de l'ensemble de bifurcation. On constatera alors que cette courbe est en même temps l'enveloppe de toutes les positions de l'élastique PQ. C'est donc, par des travaux pratiques, un accès concret à la théorie des catastrophes.



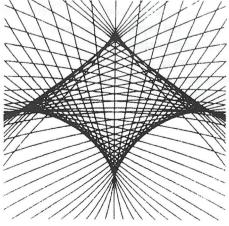
N

Figure 11 : La machine à catastrophes de Zeeman :

a) La machine est essentiellement formée d'une roue pivotant autour d'un axeO et de deux élastiques tendus NP et PQ.
b) La frontière de l'espace de bifurcation est une enveloppe dessinée par toutes les

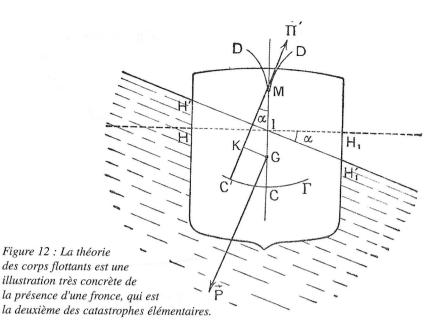
positions de l'élastique PQ.

h



#### L'EQUILIBRE DES NAVIRES

Si les hommes construisent empiriquement des navires depuis la plus haute antiquité, en revanche, la théorie des navires n'a été élaborée que très progressivement, à partir des travaux d'un génial fondateur : Archimède. Ce ne fut pas très rapide car ce n'était pas simple et c'est ainsi qu'il y eut, le 10 août 1628, un naufrage mémorable, celui du Wasa, qui chavira le jour de son lancement dans la rade de Stockholm. Si l'enquête d'alors ne put aboutir, faute de connaissances scientifiques suffisantes, on sait aujourd'hui par une analyse a posteriori de l'épave, que l'accident était dû à une erreur de conception, car le profil de la coque



n'assurait pas au bateau une stabilité suffisante. En effet, on a établi depuis, et bien avant les travaux de René Thom, une théorie du navire ; elle permet aux architectes marins de déterminer avec précision pour chaque bateau un profil de coque qui assure un bon couple de rappel à l'équilibre en cas de roulis, évitant ainsi le chavirement.

Sur la figure 12, nous avons rassemblé tous les éléments qui permettent, dans la théorie du navire, de trouver les conditions de stabilité vis à vis de l'inclinaison. Pour des commodités de présentation, le profil transversal de la coque sert de référentiel, et la surface libre de la mer apparaît en oblique par rapport à ce profil. Le poids P du bateau est appliqué en son centre de gravité G, tandis que la poussée π de l'eau est appliquée au centre de poussée C qui est le barycentre de la partie immergée. Quand la coque est verticale et la surface de la mer horizontale les forces P et  $\pi$  sont, sur un même axe vertical, égales et opposées, ce qui veut dire que le bateau flotte. S'il y a un coup de roulis, la surface de la mer apparaît en oblique par rapport à la coque ; le centre de poussée C est maintenant en C' car la forme de la partie immergée a changé. Ceci veut dire que lorsque le bateau s'incline, le centre de poussée décrit une courbe de poussée qui est une caractéristique fixe du profil de la coque. La poussée

 $\pi$ ' est portée par la normale en C' à la courbe de poussée. Le poids P, toujours appliqué en G, forme avec la poussée  $\pi$ ' un couple qui tend à rééquilibrer le navire en le ramenant à la verticale (sur le cas de figure, il s'agit d'une rotation dans le sens des aiguilles d'une montre). Quelle condition faut-il satisfaire pour qu'il en soit toujours ainsi ? La théorie des navires donne une réponse simple :

Considérons l'enveloppe de toutes les poussées. C'est une courbe, symétrique par rapport à l'axe de symétrie du profil de la coque, et qui présente un point de rebroussement sur cet axe. On l'appelle courbe métacentrique et le point de rebroussement M est appelé métacentre. Cette courbe métacentrique est caractéristique du profil de la coque. Aux petits angles d'inclinaison on peut considérer que la poussée  $\pi$ ' passe par le métacentre M avec une excellente approximation (3ème ordre). On voit tout de suite alors, sur la figure 12, que le centre de gravité G est en dessous du métacentre M et qu'il en résulte que le couple des forces P et  $\pi$ ' est un couple de rappel vers l'équilibre. En revanche, si le centre de gravité G est au-dessus du métacentre M, le couple des forces P et  $\pi$ ' agit en sens inverse, augmente le déséquilibre et provoque le chavirement. Cela se produit si la forme de la coque est mal conçue et ce fut le cas du Wasa. Cela se produit aussi quand

on surcharge le bateau en admettant sur le pont un nombre très important de passagers excédentaires ; le centre de gravité G s'élève au fur et à mesure qu'augmente le nombre de passagers et il finit par passer au-dessus du métacentre M ; il suffit alors d'une très faible perturbation pour que le navire, en équilibre instable, bascule brutalement.

#### Pour qu'un corps flottant soit en équilibre stable, il faut que son centre de gravité soit au-dessous de son métacentre.

La théorie du navire a précédé les travaux de René Thom, mais on voit qu'elle s'intègre très bien dans le cadre de la théorie des catastrophes. La courbe métacentrique est la frontière de l'ensemble de bifurcation d'une fronce. Elle délimite deux régions : la région inférieure qui correspond à la stabilité et la région supérieure qui correspond à l'instabilité et donc au chavirement.

#### LES SEPT CATASTROPHES ELEMENTAIRES

Les premiers succès dans les applications du pli ou de la fronce ne pouvaient qu'inciter René Thom à poursuivre dans cette voie, en utilisant des potentiels de formes de plus en plus complexes susceptibles de caractériser la dynamique de systèmes eux aussi de plus en plus complexes. Cela devait le conduire à la démonstration d'un théorème absolument fondamental :

Si l'évolution d'un système physique dissipatif peut être décrite à l'aide d'un potentiel dépendant au plus de deux variables d'état et de quatre paramètres externes, cette évolution peut être marquée par des catastrophes qui sont nécessairement représentées par l'une des sept catastrophes élémentaires ou par l'addition de plusieurs d'entre elles.

Cet énoncé nécessite quelques commentaires explicatifs :

- Les variables d'état (variables internes), qui caractérisent l'état du

système, seront notées x s'il y en a une,  $x_1$  et  $x_2$  s'il y en a deux.

- Les paramètres de commande (paramètres externes) qui caractérisent les contraintes imposées au système, seront notés **p**<sub>1</sub>, **p**<sub>2</sub>, **p**<sub>3</sub>, **p**<sub>4</sub>.
- Le système est dissipatif, c'est à dire amorti. Lorsqu'il est le siège d'une évolution lente, il se place toujours dans l'état d'énergie potentielle minimale par une suite d'oscillations rapides vite amorties.
- Au-delà des deux premières catastrophes élémentaires (le pli et la fronce), il y a plus qu'une variable d'état et deux paramètres externes, et la représentation complète de la réponse du système nécessite l'utilisation d'espaces à plus de trois dimensions.
- Si le nombre de paramètre externes est égal à cinq, on peut montrer que le nombre de catastrophes élémentaires est infini et le théorème perd tout son sens.

Voici maintenant quelles sont ces sept catastrophes élémentaires avec leurs potentiels associés :

1) Le pli :

 $V(x) = x^3 + p_1 x$ 

2) La fronce:

 $V(x) = x^4 - p_1 x^2 - p_2 x$ 

3) La queue d'aronde :

 $V(x) = x^5 + p_1 x^3 + p_2 x^2 + p_3 x$ 

4) La vague : (ombilic hyperbolique)

 $V(x_1,x_2) = x_1^3 + x_2^3 + p_1 x_1 x_2 + p_1 x_2 + p_2 x_1$ 

5) Le poil : (ombilic elliptique)

 $V(x_1,x_2) = (x_1^3)/3 - x_1 x_2^2 + p_1(x_1^2 +$ 

 $X_2^2$ ) -  $p_1 X_1 - p_2 X_2$ 

6) Le papillon:

 $V(x) = x^6 + p_1 x^4 + p_2 x^3 + p_3 x^2 + p_4 x$ 7) Le champignon : (ombilic parabolique)

 $V(x_1,x_2) = x_1^2 x_2 + x_2^4 + p_1 x_1^2 + p_2 x_2^2 + p_3 x_1 + p_4 x_2$ 

On ne manquera pas de remarquer que l'abstraction du sujet n'exclut pas le sens pédagogique et que René Thom a su trouver des noms à la fois pittoresques et caractéristiques pour désigner les sept catastrophes élémentaires. Il est plus difficile de se les représenter complètement puisque, en dehors des deux premières, nous entrons dans des espaces à plus de

Figure 13 : Les sept catastrophes élémentaires.

- a) Le pli.
- b) La fronce.
- c) La queue d'aronde.
- d) La vague (ombilc hyperbolique).
- e) Le poil (ombilic elliptique).
- f) Le papillon.
- g) Le champignon (ombilic parabolique).



Figure 13 a : Le pli. Représentation complète à deux dimensions.

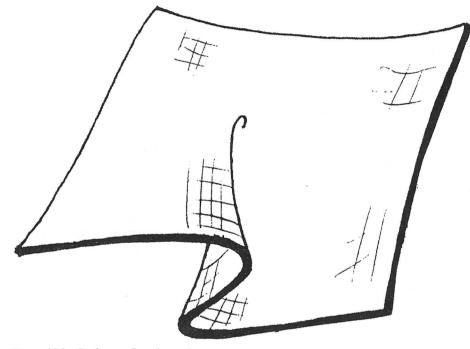
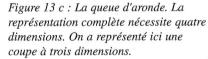
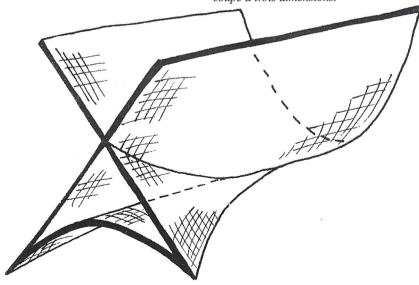


Figure 13 b : La fronce. Représentation complète à trois dimensions.



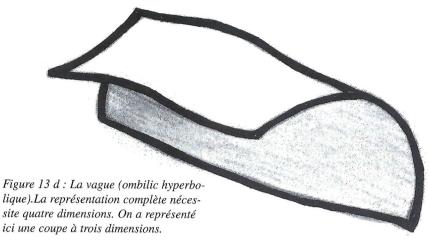


trois dimensions et ce sont seulement des coupes qui peuvent nous aider à imaginer! Nous nous contenterons donc de représentations à deux ou trois dimensions et nous donnons à cet effet, sur la figure 13, des représentations des sept catastrophes élémentaires destinées à soutenir notre imagination. On ne pourra qu'admirer le pouvoir conceptuel du créateur de la théorie qui est manifestement très à l'aise dans la manipulation de tels objets géométriques.

#### SUCCES, EXCES, CRITIQUES ET DEBATS

Cette théorie mathématique élégante représente un progrès important de la théorie des équations différentielles et, quoi qu'il arrive, cette brillante construction sera toujours considérée comme une avancée par les mathématiciens parce qu'elle constitue un acquis dans le domaine de la logique même si elle ne devait avoir par la suite aucune application pratique. Mais il est bien évident que l'ambition de René Thom est beaucoup plus grande et le seul choix du nom indique assez l'objectif qu'il souhaite atteindre : modéliser tous les phénomènes catastrophiques du monde macroscopique par une théorie mathématique simple et unificatrice. Qu'en est-il sur ce point ?

Pour les sciences physiques, qui sont quantitatives avec précision, on a pu trouver et prouver qu'il existe quelques phénomènes dont la description entre tout à fait dans le cadre de la théorie des catastrophes. En dehors de la machine de Zeeman, qui est une machine ad hoc puisqu'elle a été construite pour cela, on peut encore citer l'équilibre des corps flottants, la caustique d'un miroir sphérique, la structure de l'arc-en-ciel, le diagramme thermodynamique f (p, v, T) d'un corps pur, et quelques autres encore... Il y a eu également des tentatives intéressantes, mais déjà plus qualitatives, pour décrire en terme de catastrophes élémentaires le battement régulier du coeur ou le développement d'un



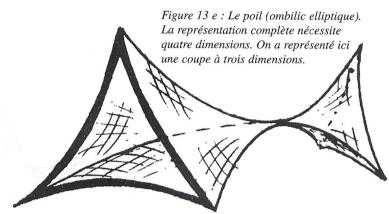
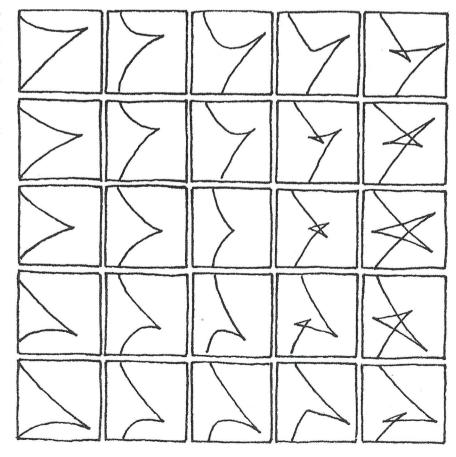


Figure 13 f : Le papillon. La représentation complète nécessite cinq dimensions. On a représenté ici une série de coupes à deux dimensions.



embryon. Mais le jour où Christopher Zeeman a présenté des modèles de fronce pour décrire qualitativement l'agressivité d'un chien ou les mutineries dans les prisons de violentes critiques sont apparues, remettant en cause l'intégralité de la théorie des catastrophes, l'accusant d'être seulement un langage et de ne pas être une théorie scientifique. Cette critique excessive était l'expression de grands espoirs déçus.

Qu'est ce donc qu'une théorie scientifique? Un exemple familier au physicien va nous permettre de le comprendre. La théorie classique de l'électromagnétisme de Maxwell est un modèle mathématique simple et unificateur qui permet, à partir de quatre équations élégantes, de décrire tous les phénomènes connus dans le domaine de l'électrostatique, la magnétostatique, l'électrocinétique, et l'électromagnétisme. Ces phénomènes connus étaient décrits par des lois partielles telles que la loi de Coulomb, la loi d'Ohm, la loi de Joule, la loi de Biot et Savart, la règle du bonhomme d'Ampère, la loi de Laplace, la loi de Faraday, la loi de Lenz... Mais ce n'est pas tout ; au-delà de son caractère descriptif, la théorie de Maxwell est aussi une explication fonctionnelle qui permet de prévoir d'autres phénomènes et elle a été véritablement validée le jour où les ondes électromagnétiques prévues Maxwell ont été découvertes expérimentalement par Hertz. La théorie est alors passée du stade descriptif au stade opérationnel.

Qu'en est-il sur ce point pour la théorie des catastrophes ? Elle représente une description simple et cohérente d'un certain nombre de phénomènes macroscopiques déterministes pour lesquels une variation continue entraîne brutalement une variation discontinue que René Thom appelle catastrophe. Contient-elle une explication qui lui permettrait d'être opérationnelle et de prévoir à l'avance une catastrophe comme les météorologues prévoient les tempêtes ? Non, car cette théorie est descriptive et non fonctionnelle ; elle nous apprend assez

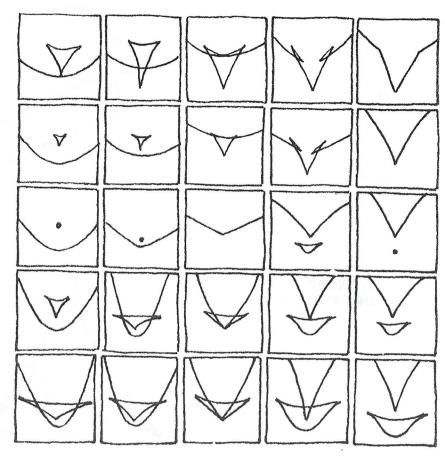


Figure 13 g : Le champignon (ombilic parabolique). La représentation complète nécessite six dimensions. On a représenté ici une série de coupes à deux dimensions.

peu sur les mécanismes responsables d'un phénomène sinon qu'elle nous fournit une clé pour les chercher car elle donne la forme du potentiel attaché à chaque catastrophe élémentaire. Pour bien comprendre ce point délicat nous allons revoir à nouveau l'équilibre des corps flottants.

Comme nous l'avions indiqué précédemment, la théorie des corps flottants a commencé par le théorème d'Archimède qui est une théorie des corps immergés : "Tout corps plongé dans un liquide subit de bas en haut une poussée verticale égale au poids du liquide déplacé". On a démontré ensuite, et par étapes, qu'il y avait un centre de poussée, une courbe métacentrique, un métacentre, pour en arriver finalement à la condition de stabilité d'un corps flottant vis à vis de l'inclinaison : "Le centre de gravité doit être situé en dessous du métacentre".

Imaginons maintenant, simple hypothèse d'école, que la découverte se soit faite historiquement en sens inverse. Essayons alors d'établir la suite des événements :

Un physicien brillant, qui connaît bien la théorie des catastrophes et les barycentres, est sollicité par des constructeurs de navires; ces derniers sont des empiristes, qui travaillent en utilisant des recettes traditionnelles, et qui voudraient bien savoir pourquoi, dans la plupart des cas, leurs bateaux sont stables, et pourquoi, dans des cas plus rares, ils chavirent. Notre physicien penserait naturellement au chavirement en terme de catastrophe et, par des essais sur maquette, en surchargeant progressivement le pont du corps flottant pour le faire chavirer, il ne manquerait pas d'identifier la courbe métacentrique et le métacentre (figure 12). Sa connaissance de la théorie des catastrophes lui ferait immédiatement penser qu'il vient de découvrir l'ensemble de bifurcation d'une fronce et il en déduirait tout aussi immédiatement quelle est la région d'équilibre instable et la

région d'équilibre stable. Il pourrait donc indiquer aux constructeurs de navires la règle de construction à respecter : "Le centre de gravité doit être situé en dessous du métacentre". Mais, comme il est un bon physicien. il chercherait ensuite à comprendre pourquoi il en est ainsi et, par un raisonnement mathématique, il découvrirait qu'il existe une force  $\pi$ ', dirigée de bas en haut, appliquée au barycentre C' de la partie immergée, d'intensité égale au poids du liquide déplacé et qui forme avec le poids P un couple de rappel qui rééquilibre le navire incliné par un coup de roulis. En clair, il aurait démontré le théorème d'Archimède. Cette fiction historique illustre une démarche par laquelle la théorie des catastrophes, purement descriptive aurait pu servir d'initiatrice à la découverte d'un mécanisme explicatif, la poussée d'Archimède.

#### L'AVENIR DE LA THEORIE DES CATASTROPHES

Cette histoire fictive pourrait bien un jour devenir réalité. Même si cela ne s'est pas encore produit, même si la théorie des catastrophes est toujours essentiellement descriptive, elle pourrait néanmoins devenir un jour ce guide pour la découverte de mécanismes explicatifs que l'on espérait à sa naissance. En effet, cette théorie est une réflexion profonde sur les propriétés géométriques de l'espacetemps, qui est notre espace physique,

et il n'est peut être pas fortuit que le théorème fondamental de la théorie des catastrophes fasse intervenir quatre paramètres de commande, ce qui correspond justement à la dimension quatre de l'espace-temps. L'exemple illustre de Henri Poincaré nous incline à l'optimisme. A la fin du siècle dernier, pour dépasser le problème des équations différentielles non intégrables, ce dernier avait imaginé une méthode permettant de classer qualitativement les différentes solutions. Ses résultats ont été exposés dans un livre difficile et néanmoins resté très célèbre : "Méthodes nouvelles de la mécanique céleste". Soixante dix ans plus tard, l'étude des phénomènes chaotiques a conduit les théoriciens à utiliser et développer l'oeuvre de Henri Poincaré. Avec le secours d'ordinateurs puissants, qui n'existaient pas en 1900, ils ont découvert les attracteurs étranges qui représentent l'essence même de la théorie du chaos. C'est cette dernière théorie qui, pour le moment, paraît la voie la plus immédiatement productive dans l'étude des systèmes physiques instables. Mais il faudra bien, tôt ou tard, chercher à développer une théorie générale de la dynamique des systèmes physiques macroscopiques, qu'ils soient ou ne soient pas dissipatifs, et ce jour là, les travaux de René Thom seront incontournables car ils constitueront un élément de base pour une meilleure description et compréhension du monde. La création de la théorie des catastrophes est donc une belle aventure scientifique dont nous ne connaissons encore ni la suite, ni la

#### **BIBLIOGRAPHIE**

#### LIVRES

#### Ian STEWART

"Oh! Catastrophe! (les chroniques de Rose Polymath)"
Editions Belin 1982

#### - Ivar EKELAND

"Le calcul, l'imprévu" (Chapitre 3, page 95)

Editions du Seuil 1984

#### - René THOM

"Stabilité structurelle et morphogénèse" Editions Benjamin 1972

#### ARTICLES

#### - Ivar EKELAND

"La théorie des catastrophes" La Recherche n°81, septembre 77, page 745

#### - Jearl WALKER

"Caustiques et catastrophes"

Pour la Science n°73, novembre 1983, page 160

#### - Ivar EKELAND

"La théorie des catastrophes" (article relu 20 ans après par son auteur)
La Recherche n°301, septembre 97, page 89

#### INTERNET

http://perso.wanadoo.fr/l.d.v.dujardin/ct/

http://perso.wanadoo.fr/marxiens/philo/pretapen/thom.htm

#### Adhésions et Abonnements

fin.

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. 04 73 92 12 24 - Fax 04 73 92 11 04 - e-mail : adasta@wanadoo.fr

# Le génie d'André Marie Ampère\*

VIII - AMPÈRE PHYSICIEN 1820 - 1826

Il suffit de relire les comptes rendus de l'Institut.

#### Lundi 4 septembre 1820:

Monsieur Arago rend compte des expériences faites par M. Oersted relativement à l'influence réciproque du magnétisme et du galvanisme et répétées à Genève par M. de la Rive.

#### Lundi 11 septembre 1820:

M. Arago répète les expériences de magnétisme et de galvanisme dont il a parlé dans la séance précédente, il lit le mémoire d'Oersted, daté du 21 juillet 1820 intitulé "Expériences sur l'effet du conflict électrique sur l'aiguille aimantée".

Dans ce mémoire, Oersted signale seulement la déviation d'une aiguille aimantée au voisinage d'un courant électrique mais il ne fournit aucune explication.

En effet, les physiciens étaient habitués alors à la théorie newtonienne d'actions et réactions s'exerçant en ligne droite entre deux points et nul ne comprenait pourquoi l'aiguille aimantée déviait perpendiculairement au fil électrique conducteur.

C'est alors que l'imagination et le génie mathématique d'Ampère s'emparent de la question, lui permettent de comprendre le phénomène et d'apporter une semaine plus tard à l'Académie la découverte qui a immortalisé son nom!



Suzanne Gély-Arcaix
Agrégée de Sciences Physiques
Ancienne élève
de l'Ecole Normale Supérieure

Procès-verbal de la séance à l'Institut du 18 septembre 1820 :

Monsieur Ampère lit un mémoire contenant des expériences qui lui sont propres et qui ajoutent de nouveaux faits aux expériences de M. Oersted relatives à l'action du galvanisme sur le magnétisme.

#### 25 septembre 1820:

M. Ampère lit un mémoire sur les effets produits sur l'aiguille magnétique par la pile voltaïque et qui fait suite au mémoire lu dans la séance précédente. Il annonce un fait nouveau, celui de l'action mutuelle de deux courants électriques sans l'intermédiaire d'aucun aimant. Il fait des expériences pour prouver ce fait et elles remplissent le reste de la séance. Le soir du 25 septembre, Ampère écrit à son fils à Genève " tous mes moments ont été pris par une circons-

tance importante de ma vie... " et il raconte la séance mémorable à l'Institut.

communications Entre les l'Académie il refait des expériences confirmatives tantôt avec Fresnel, tantôt avec Despretz, en présence d'élèves de l'Ecole Normale, du Général Campredon, de César Antoine Becquerel. Tout réussit à merveille et, comme il l'écrivait longtemps après, le mémoire lu par lui à l'Académie des Sciences le 25 septembre 1820 contenait en germe tout ce qu'il devait découvrir dans la suite, il y avait prédit les résultats ultérieurs...

A partir de cette date, les expériences et les théories se succèdent jour après jour. C'est la petite maison de la rue des Fossés Saint Victor qui sert de laboratoire, ce sont toutes les faibles ressources d'Ampère qui passent en construction d'appareils (il n'y avait à l'époque pas de crédits de l'Etat). Un des plus émouvants témoignages de cette période est la table d'Ampère, instrument rudimentaire, construit de ses propres mains - comme l'aurait fait un serrurier de village - et avec lequel il exécuta toutes ses expériences démontrant l'action exercée sur un courant électrique par un aimant ou par un autre courant électrique (cette table et les appareils originaux sont conservés actuellement au Laboratoire de Physique du Collège de France).

En 1820, les plus grands savants de France et de l'étranger gravissent l'escalier modeste de l'humble demeure du savant et sortent émerveillés de l'exactitude des propos énoncés par Ampère. Cependant, les

<sup>\*</sup> Suite de l'article paru dans le n°44 d'Auvergne Sciences.

révélations ne manquèrent pas de contradicteurs. Par exemple, certains disaient que les phénomènes n'étaient qu'un cas particulier des faits d'attraction et de répulsion bien connus entre les corps électrisés. Mais Ampère répondait victorieusement que les faits nouveaux différaient entièrement des anciens : alors que deux corps électrisés de la même manière et mis en contact se repoussent, deux fils électriques traversés par le même courant s'attirent. Les idées d'Ampère faisaient difficilement leur chemin parce qu'elles s'écartaient profondément des théories alors courantes en mécanique où l'on cherchait à tout ramener aux forces centrales newtoniennes entre points doués de masse. Au contraire. les forces élémentaires d'Ampère, naissent du mouvement des charges et ne vérifient pas, sous sa forme ancienne, le principe de l'action et de la réaction.

Mais la validité des travaux d'Ampère ne tarda pas à s'imposer à tous grâce surtout à l'appui que l'analyse mathématique donna rapidement à l'expérimentation.

Ampère a toujours considéré les mathématiques comme un instrument à utiliser pour ses recherches physiques ; dans les problèmes concrets qu'il rencontrait (déviation de l'aiguille aimantée par un fil électrique, attraction ou répulsion entre des fils conducteurs parcourus par un courant), Ampère pensait que l'explication - qui existait certainement - ne pouvait être obtenue que par les méthodes mathématiques. L'exemple le plus frappant est celui de la fameuse formule dite d'Ampère et de Stokes qui transforme une intégrale double étendue à une surface en une intégrale simple calculée sur le contour. Ampère avait besoin de cette transformation pour la détermination du champ magnétique créé par un courant électrique circulant dans un conducteur ; il établit la formule pour ce cas particulier.

Mais le mathématicien Stokes montra ensuite que la formule était tout à fait générale et s'appliquait au contour d'une surface quelconque.

Cet automne 1820 fut prodigieux car les travaux expérimentaux d'Ampère et ses communications sensationnelles à l'Institut se succédaient presque chaque semaine.

#### Le 2 octobre 1820 :

M. Ampère présente un projet de télégraphe électrique.

#### Le 9 octobre 1820:

M. Ampère lit un troisième mémoire contenant la suite de ses recherches sur l'aimant, l'électricité et la pile"
Puis c'est l'invention de l'électroaimant en collaboration avec Arago
Pour cela, Ampère imagine un courant contourné en spirales nombreuses autour d'un cylindre auquel il donne le nom de solénoïde et qui s'avère être équivalent à un aimant droit avec deux pôles : un pôle nord et un pôle sud. En plaçant une aiguille de fer doux dans l'axe du solénoïde elle s'aimante à son tour...

Mais l'imagination d'Ampère ne s'arrête pas là ; un barreau aimanté produit un champ magnétique analogue au champ magnétique extérieur d'un solénoïde.

Alors dès 1821, Ampère suggère que, par analogie, le champ magnétique d'un aimant a pour source des

boucles microscopiques de courant existant dans la structure de l'aimant. Il est légitime alors de traiter ces " courants ampériens " comme des dipôles magnétiques rendant compte de la plupart des propriétés macroscopiques des milieux aimantés.

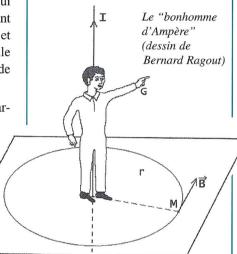
Il restait à comprendre la nature physique de ces dipôles magnétiques. Et ce seront les théories modernes du XX<sup>eme</sup> siècle avec la découverte des structures atomiques qui confirmeront, de façon éclatante, l'intuition d'Ampère.

Le 2 avril 1822 Ampère peut lire à la séance publique de l'Académie une notice d'ensemble de ses découvertes que complétera le 8 avril 1822 un mémoire récapitulatif.

La description complète appartient aux ouvrages de Physique. Il suffit de rappeler que Ampère a montré l'analogie entre aimant et courant, a découvert l'action réciproque de deux courants, a inventé l'électroaimant, a donné la théorie complète de l'électromagnétisme ouvrant la voie aux découvertes ultérieures, à la théorie de Maxwell sur les ondes et à leurs applications pratiques...

Parmi toutes les merveilleuses trouvailles laissées par Ampère, utilisées encore et à la portée de tous, je citerai seulement le théorème d'Ampère et le bonhomme d'Ampère.

Le théorème permet de déterminer le champ magnétique B créé par un fil rectiligne conducteur infini parcouru par un courant électrique



d'intensité I en un point M à la distance r du fil.

B se trouve dans le plan passant par M perpendiculairement au fil ;

son sens est donné par règle du Bonhomme d'Ampère qui, couché sur le courant électrique lui entrant par les pieds et lui sortant par la tête, regardant le point M, a le champ à sa gauche;

son intensité est donnée par :

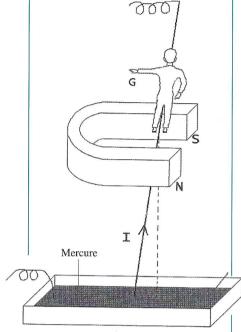
B x  $2\pi r = \mu_0 I$ 

I en Ampères, r en mètres, B en Teslas;

 $\mu_0 \text{ est une constante universelle} \\ \mu_0 = \frac{4\pi}{10^7} = 4\pi \text{ x } 10^7$ 

Pour cette démonstration Ampère utilise la formule de Stokes Ampère déjà signalée Le Bonhomme d'Ampère sert encore pour déterminer le sens de la force subie par un courant placé dans un champ magnétique.

Le Bonhomme d'Ampère - couché sur le courant lui entrant par les pieds



Action d'un champ sur un courant (dessin de Bernard Ragout)

lui sortant par la tête - regarde dans le sens du champ (du nord au sud) a la force à sa gauche

Fil conducteur mobile autour de 0 placé entre les pôles d'un aimant avec l'extrémité inférieure plongée dans le mercure.

Mais au milieu de tous ces travaux, et au printemps 1821, la santé d'Ampère commence à décliner ; de plus il manque lamentablement d'argent ; sa soeur Joséphine essaie de bien tenir son ménage mais son budget est grevé par l'entretien de la maison, l'achat d'instruments de physique, la publication de ses ouvrages... Il doit emprunter de l'argent à Fresnel...

Un poste au Collège de France lui assurerait un revenu supplémentaire; comme un siège se trouve vacant le 30 décembre 1823, il pose sa candidature mais des marchandages et des manoeuvres politiques compromettent son élection. Il tourne à la neu-

rasthénie, il écrit le 26 janvier 1824 " je n'ai jamais été si malheureux que je suis, si accablé d'ennuis, si surchargé de travail "; au cours des mois suivants la situation ne s'arrange guère et, le 2 juillet, Ampère écrit à son fils à Rome " Je suis endetté de tous côtés et ne sais où donner de la tête... je ne sais quel sombre chagrin me fait douter de tout...".

Néanmoins, le 11 juillet 1824, le **Collège de France** se réunit à nouveau et nomme Ampère.

Il nage alors dans la joie mais elle sera de courte durée! En effet, il désirait alors se démettre du poste - trop contraignant à son goût de professeur - à l'Ecole Polytechnique mais le Ministre de l'Instruction Publique l'oblige - sans doute pour donner la place à un autre - à démissionner du poste d'Inspecteur Général. Il doit se soumettre mais il va batailler pendant plusieurs mois pour obtenir la compensation financière d'une retraite proportionnelle...

Malgré tous ses soucis, il arrive encore à présenter des mémoires d'Électromagnétisme à l'Institut le 12 septembre 1825 puis le 21 novembre 1825. Mais surtout il fait la synthèse de tous ses travaux commencés depuis 1820 et publie, à la fin de 1826 un volume de 220 pages - in quarto intitulé "Théorie des phénomènes électrodynamiques uniquement déduite de l'expérience".

Ce sera le dernier grand ouvrage scientifique, car Ampère est de plus en plus fatigué et les soucis familiaux empoisonnent son existence.

#### IX - LES DERNIÈRES ANNÉES 1826 - 1836

Ampère essaie de marier son fils Jean Jacques Antoine, revenu d'Italie le 10 décembre 1824, laissant Juliette Récamier à Naples ; celui-ci renonce à la carrière d'auteur dramatique pour se consacrer à la critique. Ampère lui propose comme épouse Clémentine Cuvier, la fille de l'illustre naturaliste qui est son ami.

Mais Jean-Jacques refuse, part en Allemagne, en Scandinavie (il est devenu polyglotte), et abandonne ainsi, une fois de plus, son père qui, à 50 ans, ressemble déjà à un vieillard. Du côté de sa fille Albine, née en 1807 de son second et malheureux mariage, il connaît aussi beaucoup de déboires qu'il est inutile d'expliciter longuement : Albine se marie en 1827, à l'âge de 20 ans, avec un officier Gabriel Ride mais ivrogne et brutal (Ampère, toujours aussi naïf n'a pas pris suffisamment de renseignements sur cet homme); la vie conjugale d'Albine est alors traversée de scènes épouvantables et aboutit à une séparation judiciaire ; malgré cela le mari revenait à la charge pour menacer sa femme et soutirer de l'argent au pauvre Ampère ; Ride finit par être enfermé à Charenton dans l'asile d'aliénés, en sortit et, usé par les excès, mourut en 1843 : de son côté. Albine devenue folle à son tour, s'éteindra au mois d'août 1842, six ans après Ampère.

Au milieu de tous ces tourments familiaux, Ampère connaît cependant une grande satisfaction, sa réintégration comme Inspecteur Général des études le 7 mai 1828, après trois ans et demi d'interruption. En contrepartie - mais il l'accepte sans regret - il doit démissionner de l'Ecole Polytechnique.

Mais sa santé continue à décliner : en 1829 il a une grave pneumonie puis une fluxion de poitrine qui l'obligent alors à faire un séjour prolongé dans le midi de la France et à interrompre ses cours au Collège de France où il est remplacé, d'abord par Savart, puis par Antoine César Becquerel, celui-là même qui l'avait assisté dans ses premières expériences d'électromagnétisme et dont le petit fils Henri immortalisera le nom Becquerel en découvrant la Radioactivité naturelle en 1896.

Cependant, la santé d'Ampère semble s'améliorer et au printemps 1831, il commence une tournée d'inspection dans le midi et arrive à Clermont-Ferrand fin juillet.

Là, il fait la connaissance de **Benoît Gonod**, professeur au collège royal

de Clermont et bibliothécaire de la ville. Les deux hommes, malgré leur différence d'âge, (Ampère a 56 ans et Gonod n'a que 39 ans) étaient faits pour s'entendre. En effet, Benoît Gonod était né dans l'Ain, région voisine du Lyonnais, donc presque compatriote d'Ampère, toujours très attaché sentimentalement à Lyon, sa ville natale. Gonod avait d'abord été professeur au Collège de Belley avant d'être nommé à celui de Clermont où il enseignait aussi bien le grec, le latin, la rhétorique que la mécanique ou la cosmographie. C'était donc, comme Ampère, un esprit universel; une amitié s'établit entre eux, Gonod vouant au grand savant une admiration fervente et respectueuse. Les deux hommes commencent à parler de la classification des Sciences...

Mais Ampère doit rentrer à Paris, il retrouve sa maison vide d'enfants puisque Jean Jacques court l'Europe à la suite de Juliette Récamier et qu'Albine est mariée depuis 1827...

C'est alors qu'un jour de novembre 1831, Ampère reçoit la visite du jeune Frédéric Ozanam, recommandé par des amis lyonnais et venu faire à Paris des études supérieures. Ampère, devinant en ce jeune homme une âme d'élite l'accueille chez lui, dans sa maison, comme un autre enfant et le gardera pendant 5 ans, jusqu'à sa mort. Frédéric Ozanam restera marqué par l'influence d'Ampère, alors en pleine fièvre philosophique et sociale et qui lui fera partager son rêve humanitaire.

Frédéric Ozanam deviendra un brillant professeur de lettres à la Sorbonne. De même qu'Ampère avait fondé, en 1804, à Lyon, autour de lui la "Société Chrétienne" d'existence éphémère, Frédéric Ozaman créera, avec un groupe de jeunes intellectuels catholiques les "Conférences de Saint Vincent de Paul " qui, elles, survivront puisqu'il en existe encore aujourd'hui des centaines partout dans le monde ; elles ont pour but d'aider matériellement, moralement et spirituellement les pauvres, les vieillards, les isolés, les exclus et les meurtris de la vie. Leur fondateur,

Frédéric Ozaman, le jeune ami et disciple d'Ampère vient d'être béatifié à Paris, au mois d'août 1997 lors de la venue du Pape aux journées mondiales de la Jeunesse (JMJ).

La présence de Frédéric Ozaman au foyer d'Ampère lui donne un regain de jeunesse et de courage. Les essais de rédaction et de mise en forme amorcés pendant l'été précédent à Clermont-Ferrand dans les conversations avec Gonod au sujet de la classification des sciences sont suffisamment avancés pour que, pendant l'hiver 1831-1832, Ampère fasse dévier son enseignement au Collège de France vers la "mathésiologie" c'està-dire "la connaissance de l'enseignement". Dans le même temps, au Collège de France, Ampère engage, avec Cuvier, une discussion célèbre sur "l'évolution" : Arago et Sainte Beuve ont rappelé fidèlement et longuement les péripéties de cette célèbre controverse.

En 1832, les morts successives de plusieurs savants : Cuvier, Cassini, Chaptal, effraient Ampère qui s'éloigne de Paris où règne une épidémie de choléra.

Au début de l'été, le voici de nouveau à Clermont-Ferrand, où il prend pension chez Gonod, complaisant et dévoué qui s'enflamme pour la classification des sciences devenue la "mathésiomonie" Gonod venait de mettre de l'ordre dans la bibliothèque de la ville, étiquetant les nombreux ouvrages pour les placer dans un catalogue facile à consulter. C'est par cet esprit de classification que Gonod mérita l'admiration du grand Ampère et le privilège d'être associé à son travail. Ampère, emporté par le bouillonnement de ses idées, se sentait figé lorsqu'il fallait coucher ses pensées sur un papier. Alors, Ampère parlait, Gonod écrivait puis on relisait ensemble, on discutait et on arrivait ainsi à clarifier les idées...

D'ailleurs Ampère rend un vibrant hommage à Gonod dans la préface de son ouvrage paru en 1834 et donné à l'impression en septembre chez l'éditeur clermontois Thibaud Landriot. La collaboration de Gonod ne fut ni insignifiante, ni inutile puisque Ampère écrit "M. Gonod a constamment coopéré à la rédaction de l'ouvrage que je publie aujourd'hui, rédaction qui lui appartient autant qu'à moi-même. Je ne saurais lui témoigner assez ma reconnaissance pour le dévouement avec lequel il s'est consacré à cette publication, pour le secours que m'ont prêté sa plume exercée et cette pénétration remarquable qui lui faisait trouver sans cesse l'expression la plus propre à rendre ma pensée. Je me plais à le remercier ici de sa participation à un travail qui, sans lui, eût pu être indéfiniment ajourné".

C'est par l'ouvrage "le grand Ampère" paru en 1925, de Louis de Laumay, membre de l'Institut que j'ai appris, il y a peu de temps, la collaboration d'Ampère avec Gonod en 1832; je me suis aussitôt précipitée à la bibliothèque de Clermont pour en savoir davantage.

Hélas, j'ai consulté en vain la biographie de Gonod écrite en 1852 par Delarfeuil, l'Hommage funèbre fait par A. Veysset en 1849 lors de la mort de Gonod ainsi que l'éloge funèbre d'Alexandre Bedel de 1850. Je n'ai trouvé aucune allusion au passage d'Ampère dans la vie de Gonod; il semble que ces personnalités clermontoises l'aient ignoré ou y aient attaché peu d'importance.

Heureusement, grâce à la bienveillance de Monsieur Dominique Frasson-Cochet, responsable de la bibliothèque de Clermont, j'ai découvert un mémoire fort intéressant "un lettré du Bugey, Benoît Gonod" écrit en 1895 par M. Ferraz, professeur à la Faculté des lettres de Lyon, mémoire publié à Lyon (et non à Clermont). L'auteur, citant la préface d'Ampère si élogieuse pour Gonod (et reproduite un peu plus haut) rend un grand hommage à ce brillant Clermontois si injustement oublié par ses concitoyens.

De même, monsieur Louis Saugues, membre de l'Académie des Sciences et Belles Lettres de Clermont m'a fait connaître un curieux petit ouvrage publié en 1863 à Paris contenant un récit de voyage dans le Puy de Dôme par Monsieur Antonin Rondelet professeur et économiste français né à Lyon (lui aussi !), vers 1821. Il enseigna la philosophie à la Faculté de Clermont vers 1870 mais, quelques années auparavant, il avait visité l'Auvergne. Intrigué par une curieuse construction en rotonde surmontée d'une croix à l'entrée du petit village de Thèdes, dans les montagnes entourant Clermont, à une quinzaine de kilomètres de la ville, il apprit alors que cette originale chapelle était le tombeau de Monsieur Gonod, décédé en 1849. Il écrit " Monsieur Gonod avait une certaine notoriété littéraire : il avait composé de nombreux ouvrages historiques et avait publié un manuscrit inédit de Fléchier (le célèbre prélat, hôte assidu de l'hôtel de Rambouillet, bel esprit, poète de "les grands jours salon) sur d'Auvergne tenus à Clermont en 1665". Un peu plus loin, il écrit "C'est à l'influence et aux conseils de Monsieur Gonod que nous devons l'admirable ouvrage de Monsieur Ampère sur la classification des sciences. Ce livre a été composé à Clermont et il a été dicté presque tout entier pendant les longues insomnies du savant académicien. Au milieu des nuits, Monsieur Ampère appelait tout d'un coup son ami, qui lui servait de secrétaire "Gonod, je vous en prie, levez-vous ; j'ai une idée que je vais perdre" Quand le soleil inondait la chambre de ses rayons, Ampère finissait par s'apercevoir qu'il était grand jour et qu'il avait oublié de dormir..." C'était donc en 1832, au mois d'août... En septembre un premier volume était assez avancé pour pouvoir être donné à l'impression chez l'éditeur clermontois Thibaud Landriot (déjà cité). Alors Ampère, soulagé de voir son ouvrage à l'imprimerie, partit avec son fils pour une course géologique en Auvergne tout heureux de s'enthousiasmer pour un sujet aussi passionnant que la géophysique.. C'est ainsi qu'au mois de juin suivant, en 1833, il publie une "théorie de la formation de la Terre". Mais sa préoccupation essentielle reste la mise en forme défi-

nitive de son ouvrage philosophique

**"la classification des sciences"** qui paraît à Paris chez Bachelier n° 55 quai des Augustins en 1834.

Il est temps de donner rapidement un aperçu de ce monument philosophique auquel Ampère a travaillé de nombreuses années, avec persévérance. Ses découvertes scientifiques prodigieuses ont retardé la rédaction de cet ouvrage qui a pour but de ramener à l'unité toutes les parties aujourd'hui morcelées à l'infini du savoir humain et de réaliser ainsi une conception totale du monde et de la vie, c'est-àdire une véritable **philosophie**.

Avant Ampère, les savants et les philosophes ont entrepris bien des fois d'établir une classification méthodique et rationnelle des connaissances humaines. Pendant le Moyen-Age les études furent d'abord partagées en 7 branches qu'on appelait "les sept arts libéraux". Dès le XIIIeme siècle, Saint Bonaventure applique son génie à une véritable classification en quatre formes principales intitulées :

- lumière extérieure (arts mécaniques et usuels)
- lumière inférieure (musique, peinture, sculpture)
- lumière nucléaire (philosophie divisée en logique, étude de la nature morale)
- lumière supérieure, surnaturelle comprenant : le dogme, la morale chrétienne, la mystique.

Puis c'est la classification de Francis Bacon (chancelier d'Angleterre sous Jacques 1er) qui, vers 1660, distingue trois facultés principales : la mémoire, l'imagination et la raison auxquelles se rattachent respectivement l'histoire, la poésie et la philosophie, chacune de ces connaissances se divisant ellesmêmes en plusieurs branches.

Ensuite ce sont Diderot et d'Alembert qui publient en 1751, en tête de l'Encyclopédie un tableau représentant le système figuré des connaissances humaines mais cette nouvelle classification ne diffère guère de celle de Bacon et reprend la même division des facultés intellectuelles en changeant seulement l'ordre : la raison occupe le second rang et l'imagination ne vient qu'au troisième.

A ces classifications ingénieuses, Ampère va, substituer une classification naturelle fondée sur les rapports que les objets des sciences ont entre eux. Il groupe les sciences en commençant par celles qui se rapportent aux objets les plus simples pour s'élever progressivement vers celles qui se rapportent aux objets les plus complexes. mais il apporte une nouvelle vision des connaissances en faisant aux sciences morales et aux sciences littéraires une place importante dans sa classification ; c'est en cela qu'Ampère présente une supériorité sur Auguste Comte préoccupé lui aussi de classification des sciences. Ce philosophe entré comme élève à l'Ecole Polytechnique en 1814 alors qu'Ampère y enseigne les mathématiques - publie en 1825 "les Considérations philosophiques sur les savants" puis en 1830 son "Cours de philosophie". Or, on sait qu'Ampère, tout en étant professeur de mathématiques à l'Ecole Polytechnique, a enseigné la philosophie à la Faculté des Lettres de Paris en 1819 et a commencé à exposer là les prémices de sa classification des sciences. Celle d'Auguste Comte, postérieure à 1819, vise comme celle d'Ampère à établir une continuité entre les connaissances humaines mais Auguste Comte, prisonnier de sa formation polytechnicienne, attache une importance capitale aux mathématiques tandis qu'Ampère, ne les considérant que comme un instrument, associe le concret à l'abstrait, se base sur l'expérimentation et procède ensuite par synthèse.

Ampère rattache toutes les connaissances humaines à deux types principaux :

- Les sciences cosmologiques : c'est le Premier Règne (étude du cosmos, le monde matériel)
- Les sciences noologiques : c'est le second Règne (domaine de la pensée "noos")

Ensuite, chacun de ces règnes est divisé en **deux sous-règnes**.

C'est ainsi que **le Cosmos** (Premier Règne) comprend deux sous-règnes A et B, l'un A inorganique, l'autre B organisé. A (inorganique) : **sciences cosmologiques proprement dites** 

B (organisé): sciences physiologiques

Chacun de ces sous-règnes se divise en deux embranchements selon le domaine étudié :

A inorganique : • I sciences mathématiques: notions de grandeur et de mesures

• II sciences physiques : propriétés des corps inorganiques

B organisé: • III sciences naturelles: étude des êtres vivants • IV sciences médicales : phénomènes vitaux

Ainsi pour le Cosmos, on obtient quatre embranchements. Chaque embranchement se divise à son tour en deux sous-embranchements fractionnant naturellement en deux, le domaine étudié. On trouve donc, pour cosmologiques, huit les sciences sous-embranchements naturels.

#### **SCIENCES COSMOLOGIQUES:** Premier règne

I mathématiques:

a) sciences mathématiques proprement dites (spéculatives)

b) physico-mathématiques (appliquées)

II physiques:

A

B

c) physiques proprement dites (étude générale des phénomènes)

d) géologiques (terre et minéraux)

III naturelles:

e) phytologiques (plantes)

f) zoologiques proprement dites (êtres animés)

IV médicales :

- g) physicomédicales (lois générales de la santé)
- h) médicales proprement dites (maladies)

Mais chaque sous embranchement se divise en deux sciences (dites du premier ordre) selon qu'on se propose un but théorique ou pratique. Voici quatre exemples simples:

#### SOUS EMBRANCHEMENTS

- a) Sciences mathématiques proprement dites
- b) Sciences physicomathématiques
- c) Sciences physiques proprement dites
- e) Sciences phytologiques

#### SCIENCES DU 1ER ORDRE

- 1 arithmologie (théorique) 2 géomètrie (figurée)
- 3 mécanique (théorique)
- 4 uranologie (appliquée)
- 5 physique générale (théorique) 6 technologie (appliquée)
- botanique (théorique) agriculture (appliquée)

Pour le cosmos on trouve donc 16 sciences du premier ordre (les unes théoriques, les autres pratiques) (arithmologie, géométrie ; mécanique, uranologie; physique générale, technologie; géologie, oryctotechnie ; botanique, agriculture : zoologie, zootechnie ; physique médicale, hygiène; nosologie, médecine pratique).

Mais chaque science du 1er ordre (théorique ou pratique) se divise en deux selon qu'elle est élémentaire ou comparée; pour le cosmos on trouve donc 32 sciences du second ordre. Enfin chaque science du second ordre se divise à son tour en deux sciences du troisième ordre établissant les lois fondamentales. Un exemple simple est fourni par la mécanique :

1 <sup>ER</sup> ORDRE	2 <sup>ème</sup> ORDRE	3 <sup>ème</sup> ORDRE
	e) mécanique élémentaire	3.1 cinématique, loi de Vitesse 3.2 statique (loi d'équilibre)
3 mécanique	f) mécanique transcendante	3.3 dynamique
	(ou comparée)	(loi du mouvement) 3.4 mécanique moléculaire (loi interne de la matière)

C'est ainsi que, pour Ampère, le cosmos (premier règne) comprend 64 sciences du troisième ordre.

De même Ampère classe les sciences noologiques du second règne en deux sous-règnes correspondant l'un C à l'individu, l'autre D aux groupes humains:

C (individu): sciences noologiques proprement dites

D (groupes humains): sciences sociales

Chacun de ces sous règnes se divise en deux embranchements selon le domaine étudié ; on obtient donc 4 embranchements (pour les sciences noologiques):

Sous-règne C: • V sciences philosophiques: étude des facultés intellectuelles et morales

> VI sciences dialegmatiques: moyens de communication de la pensée

Sous-règne D:

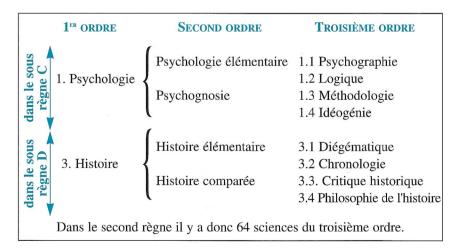
· VII sciences ethnologiques : étude des sociétés humaines • VIII sciences poli-

tiques: moyens de conservation des sociétés humaines

Chacun des embranchements se fractionne naturellement en deux sousembranchements d'après le sous domaine étudié ; puis chaque sous embranchement donne deux sciences du premier ordre selon que le domaine étudié est envisagé de façon théorique ou appliquée.

SCIENCES NOOLOGIQUES		Second Règne		
	Embranchements	Sous-embranchements	Sciences du 1 <sup>er</sup> ordre	
	V Sciences philosophiques	Philosophiques proprement dites	{ 1. Psychologie 2. Métaphysique	
C	philosophiques	Morales	3. Ethique 4. Thélesiologie	
	VI sciences	Dialegmatiques proprement dites	5. Glossiologue 6. Littérature	
▼ dialegmatiques	uiaiegmanques	Eleuthérotechniques	7. Technesthétique 8. Pédagogie	
	VII sciences	Ethnologiques proprement dites	1. Ethnologie 2. Archéologie	
ethnologiques D		Historiques	3. Histoire 4. Hiérologie	
	VIII sciences	Ethnorytiques	5. Nomologie     6. Art militaire	
*	politiques	Ethnégétiques	7. Economie sociale 8. Politique	

Dans le second règne il y a donc 16 sciences du premier ordre. Chaque science du premier ordre se divise en deux sciences du second ordre selon qu'elle est élémentaire ou comparée; on trouve donc 32 sciences du second ordre. Enfin chaque science du second ordre (élémentaire ou comparée) donne deux sciences du troisième ordre établissant les lois fondamentales. Prenons un exemple simple dans chaque sous-règne.



Ainsi Ampère classe le règne matériel (ou **cosmologique**) et le règne de la pensée (ou **noologique**) en **128 sciences**. Il affirme, que ce sont des **divisions naturelles**, fondées sur la structure même de notre esprit et de nos connaissances.

Malgré l'importance de son but et la notoriété de son auteur, cette classification d'Ampère n'a pas recueilli beaucoup de suffrages et n'a pas reçu d'applications pratiques. On lui reproche l'abus de la division dichotomique, le fractionnement excessif des connaissances et les néologismes qu'Ampère a été obligé d'inventer, en s'inspirant du grec et avec certainement l'aide de Gonod, pour désigner toutes ces sciences.

Cependant, certains mots créés par Ampère (cinématique, pédagogie) sont devenus courants aujourd'hui avec leur sens initial; par contre la "cybernétique" qui, pour Ampère, était une science politique du troisième ordre, classée entre la diplomatie et la théorie du pouvoir, représente aujourd'hui la science des mécanismes de communication et de contrôle dans les machines et les êtres vivants.

Même si cette classification ne s'est pas vulgarisée elle reste le témoignade l'esprit encyclopédique d'Ampère. Les 128 sciences humaines, classées en deux règnes, cosmologique et noologique, sont présentées à la fin de l'ouvrage dans un tableau précédé de 3 poèmes latins "Proemium, Prolegomena Synopsis" dédiés à son fils "Optimo et carissimo filio". Par ces poèmes, Ampère définit en vers latins les sciences auxquelles ils se rapportent. Après la parution de son ouvrage en 1834, Ampère met en chantier le second tome qu'il n'aura pas le temps de terminer et que son fils achèvera. A cette époque, en 1834, ce fils tant aimé, Jean Jacques Antoine est nommé professeur de littératures étrangères au Collège de France et Ampère, très heureux, vient, après ses propres cours de physique dans ce même Collège de France, assister avec émotion et admiration à ceux de son fils.

Mais il subit à cette époque là, les déboires familiaux dûs au mari d'Albine et sa santé continue à décliner. Il décide cependant au mois de mai 1836, de partir en tournée d'inspection dans le Midi; il passe par Saint Etienne où l'ami Bredin s'inquiète de son état physique et veut l'obliger à se reposer. mais Ampère ne l'écoute pas et part à Marseille où il arrive dans un tel état de délabrement qu'il est obligé de se coucher : Ampère, logé au Lycée, entouré de soins attentifs, semble se remettre et entre en convalescence. Il parle de poursuivre sa tournée d'Inspection lorsqu'une forte fièvre le terrasse. Après 24 heures de délire, il meurt le 10 juin 1836, à l'âge de 61 ans.

On lui fit, à Marseille, de modestes funérailles et son corps fut déposé dans le cimetière de la ville. A Paris, cette disparition n'eut pas un retentissement en rapport avec la perte immense que venaient de faire le monde de la science et celui des intelligences. Cependant, ses amis Arago et Sainte Beuve célébrèrent solennellement sa mémoire en remarquant, comme l'écrit Sainte Beuve, "la perte de Monsieur Ampère, à un âge encore peu avancé n'a pas fait, à l'instant aux yeux du monde, même savant, tout le vide qu'y laisse en effet son génie".

Trente trois ans plus tard, en 1869, ses restes furent transportés à Paris, au cimetière Montmartre où Ampère repose, près de son fils Jean-Jacques, mort à son tour en 1864, membre de l'Académie Française et de l'Académie des Sciences et Belles Lettres.

Non loin de ce tombeau des deux



Tombeau d'Ampère au cimetière Montmartre à Paris.

Ampère, se trouve celui de **Juliette Récamier**, morte en 1849, infirme et à moitié aveugle, à l'âge de 72 ans. Ainsi leurs destins mêlés dans la vie restent unis dans le souvenir du passant qui vient, dans le cimetière Montmartre, au coeur de Paris, évoquer les êtres à jamais disparus.

#### CONCLUSION

Ainsi, Ampère fut un prince de la science, un savant inspiré. Mais il n'a pas été seulement un habile expérimentateur et un théoricien remarquable. Avant tout calcul, avant toute expérience, il avait parcouru une longue phase d'investigations et de méditations. Pour Ampère, les découvertes ne sont pas arrivées par hasard, il est allé au devant d'elles par une sorte de pressentiment.

Pour ces phénomènes électromagnétiques entièrement nouveaux qu'il a devinés, c'est lui qui en a varié les circonstances et a imaginé des expériences élégantes servant de base à la théorie, c'est lui qui a fait tous les calculs et inventé toutes les démonstrations.

Mais il n'a pas creusé soigneusement un sillon droit dans une direction unique. Parti de l'algèbre, il passa par la chimie, atteignit son point culminant en physique, revint à la philosophie. De même son coeur, comme son cerveau, fut perpétuellement agité. Tout se mêlait en lui. Alors qu'on le croit occupé d'intégrales, il bâtit une théorie chimique, scrute les secrets de la psychologie, explicite les fondements de l'électromagnétisme mais, quand on va au fond de son âme, on s'aperçoit qu'il est assoiffé de tendresse et préoccupé par une image féminine...

Malgré ses tourments, rien n'est resté étranger à ce puissant génie. La philosophie, les lettres, les arts, la poésie et même les questions économiques et sociales ont été l'objet de méditations persévérantes. Chez Ampère, l'alliance de la Science et de la Philosophie n'est pas un fait accidentel et sans portée. Tout se tient. En cela, il rejoint Descartes qui, en publiant en 1637 son célèbre "Discours sur la méthode"

faisait remarquer que ses principes s'étendaient à tous les ordres de connaissances. Pour le prouver, il faisait paraître, au même moment que son ouvrage philosophique, trois traités scientifiques : "La Géométrie, la Dioptrique et les Météores", consacrés respectivement aux mathématiques, à la physique et à l'astronomie. Ainsi, Ampère appartient à la lignée des grands penseurs et on peut placer son nom à côté des plus illustres comme Newton, Descartes, Pascal ... Mais Ampère était modeste. Bien que membre de l'Institut, décoré de la Légion d'Honneur, Professeur au Collège de France, il resta à l'écart des hautes dignités liées au pouvoir. Il n'a été ni ministre, ni député, ni sénateur, ni conseiller d'état, ni préfet, ni Pair de France, ni comte, ni baron ... alors que Laplace est Pair de France sous la Restauration, que Monge sénateur impérial reçoit avec le titre de comte un blason et des armoiries tandis qu'Arago deviendra ministre de la Guerre et de la marine en 1848.... Ampère cultivait la science avec un magnifique désintéressement par goût mais aussi dans le désir profond de collaborer au progrès de l'esprit humain et à l'amélioration de la vie sociale.

à l'amélioration de la vie sociale. Il a été un précurseur. Il croyait que les machines électriques permettraient aux hommes d'être libérés des travaux pénibles. Il prédisait avec plus de cent ans d'avance "la réduction du temps de travail" thème qui, depuis 1936 et le Front Populaire est à l'ordre du jour de tous les gouvernements successifs

pour satisfaire les revendications légi-

times des travailleurs.

En mars 1817, Ampère écrivait à l'un de ses amis, Monsieur Gosse "on ne doit pas craindre le développement de l'industrie et les inventions de machines successives, de procédés pour abréger le travail ... plus les hommes produisent, plus la nation est heureuse". mais il écrivait aussi un peu plus tard à Bredin "le vrai but de la politique ne doit pas être de rendre les hommes heureux mais de les rendre meilleurs".

En terminant cet exposé dont le but était de célébrer la mémoire d'Ampère à la fois algébriste, physicien, chimiste, poète, philosophe... je dirai simplement que les mérites d'Ampère sont si nombreux et si grands qu'il est difficile de les commenter longuement et même de les citer tous.

La diversité, la généralité et la profondeur de ses connaissances, de ses aptitudes, de ses talents ont fait de lui un génie. A sa naissance, Ampère avait reçu des dons exceptionnels qu'il a fait fructifier sans idée de profit car il avait la probité, la générosité et la bonté d'une âme simple et profonde. Sa vie fut tourmentée et passionnée mais il resta très attaché aux valeurs morales, sociales et spirituelles indispensables au progrès humain. Ampère est mort pauvre et très modestement, mais sa renommée résistera à l'usure du temps.

On peut lire sur sa tombe : IL AJOUTA AUX CONNAISSANCES HUMAINES

DANS LES SCIENCES MATHEMATIQUES, PHYSIQUES,

MÉTAPHYSIQUES ET MORALES. IL CREA LA THÉORIE ÉLECTRODYNAMIQUE

IL ÉCRIVIT L'ESSAI

SUR LA PHILOSOPHIE DES SCIENCES

DU VRAI CHRÉTIEN

IL AIMA L'HUMAIN ; IL FUT SIMPLE, BON ET GRAND.

#### **BIBLIOGRAPHIE**

- "La classification des sciences" Ampère 1834
- "La vie et les travaux d'Ampère" par Valson 1886
- "Le grand Ampère" par Louis Delaunay 1925
- "Voyages dans le Puy-de-Dôme" par Rondelet 1863

Documentation du Musée Ampère - Poleymieux

Suzanne GELY-ARCAIX Clermont-Ferrand, le 21 Mars 1998

# Une nouvelle modalité d'imagerie médicale : la tomographie par émission de positons (TEP)

#### MÉDECINE NUCLÉAIRE ET TEP

Spécialité médicale à part entière, la médecine nucléaire est basée sur l'administration de substances faiblement radioactives dans un but de diagnostic (il s'agit alors de l'imagerie scintigraphique) ou de traitement (il s'agit lors de la radiothérapie métabolique). En fonction de la nature de la substance radioactive, qui est un médicament appelé radiopharmaceutique, la radioactivité se concentre dans des régions particulières qui sont visualisées grâce à un détecteur spécifique, la caméra à scintillation.

La TEP représente une variante technique de l'imagerie scintigraphique. La substance utilisée est marquée par des radioéléments artificiels particuliers, les émetteurs de positons. Produits en cyclotron, les plus utilisés en médecine de ces émetteurs d'"électrons positifs" sont le carbone-11, l'azote-13, l'oxygène-15 et le fluor-18. Leur inconvénient majeur est leur courte période physique (de 2 minutes pour l'oxygène-15 à 110 minutes pour le fluor-18), ce qui rend obligatoire la présence du cyclotron à proximité du lieu d'utilisation, sauf pour le fluor-18. Mais ils présentent l'avantage, en raison de leur faible masse, d'autoriser le marquage et le suivi par imagerie de petites molécules d'intérêt biologique. Parmi celles-ci, la plus intéressante est certainement le glucose marqué par le fluor-18, ou fluor-18 fluorodésoxyglucose, en abrégé FDG. Les hôpitaux pratiquant déjà l'imagerie TEP au FDG se divisent en deux catégories :



Jean MAUBLANT
Service de médecine nucléaire-Centre
Jean Perrin-Clermont-Ferrand.

ceux qui s'approvisionnent auprès d'un centre producteur régional situé à moins de deux heures de transport, avec tous les aléas que ce transport peut représenter, et ceux qui possèdent leur propre cyclotron (à usage exclusivement hospitalier) afin de couvrir directement leur besoin en fluor-18.

Concernant le détecteur, l'imagerie TEP se différencie de l'imagerie habituelle de la médecine nucléaire par le fait que l'émission du fluor-18 est double. En effet, l'annihilation d'un positon avec un électron produit deux photons gamma de 511 keV partant en sens opposé, alors que les radioéléments habituels comme le technétium-99m (1) n'émettent qu'un seul rayon (photon gamma) à la fois. Cette caractéristique physique permet de localiser précisément l'emplacement d'une source de fluor-18. Elle explique pourquoi la TEP permet la

(1)  $m = m\acute{e}tastable$ .

production d'images en coupes transverses comme le fait la tomodensitométrie en radiographie. En contrepartie, la surface sensible du détecteur doit être grande, ce qui pèse sur son coût.

En pratique, la TEP au FDG présente un certain nombre d'avantages par rapport aux autres techniques d'imagerie médicale (radiographie, imagerie par résonance magnétique, échographie):

- certaines anomalies peuvent être décelées par TEP alors que les autres examens sont normaux
- l'ensemble du corps peut être visualisé; l'image obtenue est un peu ce que serait une radiographie unique de l'ensemble du corps
- le tissu anormal apparaît avec un fort contraste alors que les régions normales de l'organisme sont quasiment invisibles (à l'exception du cerveau et du foie).

Mais il existe aussi des inconvénients :

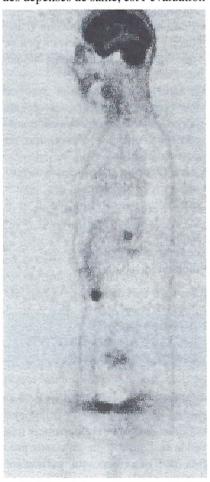
- médiocre visualisation des petites anomalies (résolution de 5 mm contre 1 mm avec les autres techniques)
- coût élevé du matériel
- · moindre disponibilité.

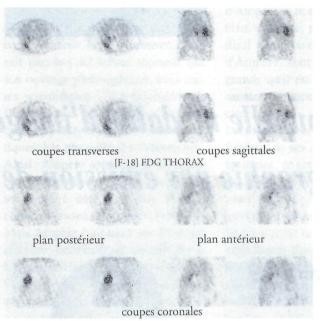
#### APPLICATIONS DE LA TEP AU FDG EN CANCÉROLOGIE

Appliquée depuis près de deux décennies en neurologie et en cardiologie, la TEP connaît un développement très rapide en cancérologie grâce aux progrès des détecteurs qui permettent

désormais le bilan complet d'extension d'un cancer en un seul examen. La principale indication qui se dégage actuellement est l'exploration des nodules pulmonaires isolés, anomalies découvertes à la radiographie et qui correspondent fréquemment à un cancer. Le diagnostic de malignité de ces lésions est difficile à poser avec les méthodes classiques. L'examen TEP au FDG permet de déceler avec une très grande sensibilité et spécificité la présence de tissu tumoral aussi bien dans le nodule que dans d'éventuels sites secondaires. Dans certains centres étrangers, les chirurgiens thoraciques n'opèrent plus sans disposer des résultats de la TEP. Compte tenu de la gravité de cette pathologie et du fait qu'il s'agit du cancer qui arrive aujourd'hui au premier rang dans les pays développés, avec une incidence qui augmente régulièrement (surtout chez la femme), cette seule application suffit à justifier l'implantation des centres de TEP.

La deuxième indication importante, porteuse d'un fort potentiel d'économies dans un domaine très coûteux des dépenses de santé, est l'évaluation





Patient adressé pour opacité radiologique tumorale du lobe inférieur droit. La bronchoscopie avec biopsie est négative. La TDM signale "une masse dans le segment de Nelson droit s'accompagnant d'une adénopathie hilaire droite et d'une adénomégalie infracentimétrique sous-carénaire". La tomoscintigraphie (TEDC) au FDG, effectuée une semaine plus tard, montre que la masse tumorale est hyperfixante et objective, dans un plan plus antérieur, trois groupes ganclionnaires dont l'un médiastinal homolatéral, ce aui classe la tumeur N2. Après pneumonectomie droite avec curage intertrachéobronchique, l'histologie objective un carcinome épidermoïde invasif bien différencié avec atteinte de la plèvre viscérale et envahissement des groupes ganglionnaires intraparenthymateux, hilaire et médiastinal homolatéral, ce qui confirme l'examen au FDG (image hôpital Tenon).

précoce de la réponse thérapeutique en chimiothérapie. Il s'agit là de pouvoir déceler rapidement (en quelques jours au lieu de quelques mois) si un patient porteur d'un cancer connu et traité médicalement répond ou non à la chimiothérapie. En cas de non réponse, le passage anticipé à un autre type de traitement représente un gain de temps et une économie substantielle.

Le troisième domaine concerne la détection d'une récidive tumorale dans un tissu remanié par une chirurgie antérieure. Le développement d'un tissu cicatriciel dans les régions opérées diminue de façon importante les performances des méthodes classiques d'imagerie, en particulier dans le cerveau et le colon. L'imagerie TEP est totalement insensible à ce facteur et prend donc là une importance toute particulière.

#### DÉVELOPPEMENT ACTUEL DE LA TEP EN FRANCE, EN EUROPE ET DANS LE MONDE

La France possède à ce jour trois installations en activité : Orsay (clinique du CEA), Lyon et Caen. Toutes sont des installations relativement anciennes orientées vers des applications de recherche dans le domaine de la neurophysiologie. Chacune possède son cyclotron.

L'Allemagne possède plus de 60 installations (dont 10 privées), la Belgique 8, la Suisse 3, l'Italie 3, l'Espagne 3 (privées). La ville jumelle de Clermont-Ferrand en Ecosse, Aberdeen, vient de s'équiper d'un second ensemble TEP.

Les milieux professionnels français de la médecine nucléaire sont très préoccupés par la faiblesse du parc national en TEP et s'efforcent d'agir auprès des autorités de tutelle pour tenter de combler le retard qui se creuse dans ce domaine avec les pays voisins. La situation évolue un peu depuis quelques mois. Ainsi le FDG a obtenu l'autorisation de mise sur le marché en décembre 1998. Par ailleurs le seul constructeur français de détecteur en médecine nucléaire (Sopha Medical Vision à Buc) travaille sur un projet de caméra pour l'imagerie TEP. Enfin de nombreux services de médecine nucléaire ont actuellement un projet TEP, les plus avancés étant ceux de Paris, Rennes et Nantes. Ces efforts conjugués devraient permettre de ne pas encore priver pour trop longtemps les patients français d'une des avancées significatives de l'imagerie en cancérologie.

Patiente âgée de 56 ans présentant une métastase costale d'un cancer colique. Bilan préopératoire avant une parétectomie thoracique: mise en évidence sur l'examen TEP au FDG d'une métastase hépatique et d'une métastase de la paroi abdominale, toutes deux inapparentes sur la tomodensitométrie et l'échographiq abdominale (image SHF) Orsay/IGR Villejuif).

# Les terminaux audiovisuels de téléconférence

G.Buchner, I. Haigneré France Télécom CNET



#### 1. INTRODUCTION

On considère que les deux principaux services de téléconférences audiovisuelles sont la visiophonie et la visioconférence que nous désignerons par le terme générique de visiocommunications. Ces services sont fournis par des terminaux qui sont soit des visiophones soit des équipements plus ou moins complexes de visioconférence. La limite de distinction entre ces deux types est cependant assez floue, dans la suite nous soulignerons les différents paliers techniques ou fonctionnels qui existent entre eux et tenterons d'en délimiter les frontières. Les modalités de mise en oeuvre des terminaux de visiocommunications sont des déclinaisons spécifiques du même corpus de normes et peuvent s'implémenter sous des formes très variées. Seuls les usages, les règles de manie-

ment ou d'ergonomie, ainsi que les configurations de services qui les mettent en oeuvre peuvent les différencier.

On note cependant deux types ou deux axes d'usage de base : les terminaux dits individuels utilisés par un (rarement deux) utilisateur(s) et les terminaux de groupe utilisés par un groupe de personnes. De cette distinction découlent des approches techniques bien discernables.

## 2. PETITE HISTOIRE DU VISIOPHONE

L'idée d'émettre et de recevoir la voix du correspondant et son image date de la fin du 19 ème siècle.

Cette utopie mit plus de 40 ans pour se concrétiser et bien plus longtemps pour se réaliser. Des tâtonnements eurent lieu en Allemagne avant 1935 mais les premiers brevets seront publiés vers 1940. Ils sont repris de façon concrète aux BELL LABS vers 1965. des expérimentations sont menées aux USA à partir de cette époque sans jamais connaître d'effets ni de suites retentissantes. Ce produit, le "PICTUREPHONE", n'avait pas séduit car il avait été accueilli avec beaucoup de réserves. Par exemple, ce n'est pas parce que l'on dispose de la fonction image que celle-ci est utilisée au mieux. Le résultat des expérimentations montrait que trop souvent le cadrage des personnes devant la caméra était mal assuré. Il ne subsistait plus, par intermittence, que la fonction téléphonique ce qui décourageait beaucoup d'utilisateurs. Se mettre au garde à vous devant la caméra n'était pas non plus la solution. Ce fut, entre autres, l'un des reproches que l'on fit au PICTURE-PHONE, sans oublier qu'à l'époque, le coût de la transmission et du terminal étaient excessifs.

Contrairement à ce qui est admis, un visiophone n'est pas un téléphone auquel on a ajouté les fonctions visuelles et même s'il est destiné à deux utilisateurs éventuels, ce n'est pas non plus un poste de conférence téléphonique. La fonction image est spécifique en elle-même et l'histoire de la visiophonie en établira la preuve.

C'est en 1970 que le CNET se lance dans l'aventure de la visiophonie, peu de temps après le début de l'expérience de BELL LABS. Cette ligne d'étude fut successivement empreinte d'espoirs et d'incertitudes en dépit des avancées techniques remarquables qu'elle suscita. Le terminal visiophonique, fabriqué par MATRA, utilisait le même standard que son "cousin" des BELL LABS : écran au format 11/10 (et non pas celui de la télévi-

sion qui est au format longueur image/largeur = 4/3), image en noir et blanc de diagonale d'environ 15 pouces, bande passante du signal vidéo 1 MHz, standard de balayage 313 lignes (1/2 format CCIR), 267 lignes utiles entrelacées, fréquence trame 60 Hz, fréquence ligne 8 kHz. Rappelons qu'il s'agissait d'un terminal qui émettait et recevait les signaux en mode dit bande de base c'est à dire en analogique. Le standard d'analyse et de restitution était en conformité avec celui des composants vidéo d'extrémité.

Rapidement ce terminal fut doté d'un système mains libres d'assez bonne qualité pour l'époque. La caméra était constituée d'un tube d'analyse d'image en technologie VIDICON électronique. Son axe optique était confondu avec celui de l'écran cathodique de visualisation. La qualité de l'image essayait de rendre le service convivial car il n'y avait pas d'effet "faux jeton" ("effet faux jeton", expression triviale, pour signifier que les regards des correspondants ne se font pas les yeux dans les yeux lorsque l'axe de la caméra n'est pas confondu avec celui de l'écran).

Le terminal autorisait l'envoi de l'image d'un document au format A5 ou d'un objet placé sous le terminal. Sa zone de cadrage était délimitée et matérialisée par un éclairage adéquat.

Ainsi fut réalisé au CNET un véritable réseau expérimental d'environ 100 abonnés (octobre 1974), répartis entre les sites d'ISSY LES MOULI-NEAUX et de LANNION, reliés par des commutateurs vidéo pilotés par des autocommutateurs TELIC CT 704 qui bénéficiaient d'une signalisation téléphonique émise par le terminal. Le trafic était supervisé. Malheureusement les terminaux manquaient de fiabilité ce qui portait préjudice à la qualité de service. Ce terminal disposait déjà à l'époque de fonctions télématiques rudimentaires et pouvait se connecter à un serveur qui était un calculateur.

Ainsi, on devine que cet ancêtre ait pu faire date et servir de référence pour poser les principes de la visiophonie. Il avait une configuration et des facilités que bien des visiophones, par la suite, n'arriveront pas à égaler dans leur conception et leur interface audio visuelle.

## 3. HISTORIQUE DE LA VISIOCONFERENCE

De la visiophonie, terminal individuel, à la visioconférence, service mettant en relation des groupes, il n'y a qu'un pas qui fut vite franchi. Les deux services débutèrent presque simultanément. Les études sur la visiophonie et la visioconférence sont historiquement imbriquées et leur évolution fut parallèle.

En Amérique du Nord, entre les années 1975 à 1980, on notait une quarantaine d'expériences de visioconférences aussi bien en site professionnel que dans le domaine de l'enseignement à distance. Citons le réseau de l'Université de QUEBEC qui disposait de 3 salles de visioconférences, celui de BELL Canada qui utilisait la transmission satellite. L'équipement était un meuble de conférence. Le réseau opérationnel de la NASA comportait 20 salles gérées par un point nodal. Le sentiment qui prévalait à cette époque, hormis le coût de la transmission, était que le public n'était pas demandeur, qu'il avait du mal à s'exprimer devant un microphone et une caméra, qu'il s'agissait d'un mode de communication imposé alors que les voyages étaient très faciles.

Au CNET, tout a commencé dans la ligne des études de la visiophonie, par un brevet publié en 1975. Le thème était la commutation des images reçues par des utilisateurs distants, en fonction du niveau sonore émis par les locuteurs. Il traduisait l'innovation sur une application de visioconférence. L'idée reposait sur l'utilisation des visiophones de bureau en les disposant en un système de visioconférence. Ce système fut expérimenté et servit de base à des démonstrations internationales.

Cette configuration fut remplacée en 1978 par le modèle que nous connaissons actuellement. Il dispose d'un écran visible par tous et d'une ou deux caméras qui "filment" les conférenciers. Les premières investigations dans le domaine ont eu lieu en déployant un corpus d'étude multiple. Le CNET devenait maître d'oeuvre d'une industrialisation des premiers prototypes fonctionnels qui servaient à des études probatoires. La connaissance acquise au niveau des équipes a toujours été capitalisée et s'est toujours trouvée disponible pour amorcer les étapes suivantes. En effet, ce sont des techniques qui évoluaient par paliers et anticipaient la demande.

Le codage en temps réel des signaux vidéo était possible depuis 1974. Les spécialistes en traitement d'image travaillaient sur des outils de simulation dans le but conjoint d'aboutir à implanter leurs résultats sur la visiophonie et sur la visioconférence. Deux types de codecs permettaient d'établir des liens de conférence sur les artères numériques entre les sites de LANNION et ISSY LES MOULI-NEAUX. Un codec dit à rafraîchissement systématique servit de base aux expérimentations (1975). Cette technique fut améliorée et suivie avec un codec dit à rafraîchissement conditionnel. Ces algorithmes furent standardisés dans le cadre des groupes européens COST211 avant d'être acceptés au CCITT (qui est devenu l'IUT) sous la référence H. 120. Ces équipements fonctionnaient avec un débit numérique en ligne de 2048 kbit/s en se basant sur la norme de transmission de multiplexage numérique G 703.

Des améliorations de l'ergonomie des salles virent le jour avec l'utilisation du mode "split screen" qui fût introduit très tôt. Il permettait de visualiser, sur 2 écrans placés côte à côte, un groupe de plusieurs personnes afin de n'utiliser qu'un seul signal vidéo codé en ligne. Dès cette époque, les grands problèmes étaient posés, mais rarement bien résolus. La qualité du son était relativement mauvaise, le niveau en double parole était insuffisant et il fallait prêter l'oreille. C'est vers 1985

que les travaux sur l'annulation d'écho aboutirent à une qualité acceptable. D'autres difficultés rencontrées concernaient les systèmes vidéo peu performants, la qualité d'accueil de la salle et l'ergonomie (éclairage, taille des écrans, colorimétrie des images, confort des utilisateurs, fiabilité des connexions, pannes de transmission, etc. Au cours de l'exploitation de ce mode de communication est apparu le besoin d'échanger autre chose que de la voix et de l'image. Il y avait nécessité impérieuse d'ajouter toute une gamme d'accessoires permettant d'agrémenter ou de consolider les échanges.

Le mode "transfert de document" fut longtemps absent de l'offre de service. La principale raison était la mauvaise définition des caméras qui ne permettaient pas le transfert de documents au format A4. Le mode de travail coopératif fut introduit avec les premiers tableaux électroniques qui apparurent en 1983. Mais il fallut attendre 1990 pour avoir une première version ergonomique de ce mode d'échange. C' est le monde informatique qui créa les outils logiciels et donna une nouvelle impulsion.

Actuellement ces moyens supplémentaires sont devenus essentiels à la communication de groupe. Ils sont appelés de façon générique "données". Ils regroupent l'ensemble des informations structurées, non audiovisuelles telles que dessins, schémas, ordre du jour de la réunion, discussion sur un graphique ou texte avec possibilité d'annotation, tableau blanc partagé à distance etc. Ils peuvent être générés directement au cours de la réunion ou être préparés avant la session et "conviés" à apparaître puis traités durant la réunion. A eux seuls ils constituent un service rendu. Ils peuvent n'accompagner que la fonction échange audio et à ce titre constituent service d'audiographie sur lequel beaucoup d'opérateurs fondent des espoirs.

Le coût d'un service nécessitant un débit de 2 Mbit/s était prohibitif. Ce n'est que lors de la mutation des codecs vidéo pour passer au débit de 384 kbit/s que prit naissance une nou-

velle stratégie pour développer le service. Les réseaux numériques devenaient disponibles. Avec NUMERIS, les équipements d'extrémité répartissaient le train numérique sur 3 canaux. En 1991 apparurent les meubles de visioconférence mobiles, se substituant aux salles équipées de matériel coûteux. La diffusion de ces meubles devait assurer la vulgarisation de la visioconférence.

Elle devenait un moyen de téléprésence simple à utiliser. Le service était obtenu par réservation et un opérateur établissait les liens manuellement par brassage de liaisons spécialisées. Le problème se déplaçait alors vers les liaisons multipoints qui allaient devenir les points névralgiques du service, il était principalement assujetti aux performances de ces équipements "Equipements nodaux dits Visioconférence Multipoints" anglais Multi Conference Unit, MCU).

# 4. DES SOLUTIONS POUR DES SERVICES DIFFERENTS

Tous les terminaux de visiophonie ou de visioconférence s'appuient sur des technologies voisines. Si l'on se base sur des critères de plate-forme d'intégration, d'usage et de clientèle on distingue des types ou des gammes de produits que l'on peut classer de la façon suivante :

1) Ceux dits dédiés destinés principalement au grand public, résidentiels ou professionnels. Ils disposent d'un nombre de fonctions restreint. Les possibilités de connexion à des périphériques extérieurs sont limitées. Ils sont représentés par des visiophones compacts qui peuvent être aussi des terminaux haut de gamme dont on a soigné l'esthétique. Les produits dédiés disposent nécessairement des fonctions de communication de base (appel, fonction mains libres, etc.) et des services téléphoniques, certains assurent même la fonction répondeur/enregistreur. Quand ils sont destinés au monde professionnel, ils permettent l'accès aux services supplé-

mentaires derrière un PABX. On peut classer comme terminal dédié, un système composé d'une console communicante qui se branche comme un périphérique sur l'accès PERITELE-VISION d'un téléviseur, d'un vidéo projecteur, d'un écran d'ordinateur. Ce produit se rapproche des systèmes de jeux sur téléviseur. Il est connu sous l'appellation anglaise de "set top box" ou même de "black box". Cette console dispose des outils nécessaires au pilotage du service (télécommande, clavier par fil ou infra rouge, navigateur dans le menu), d'une caméra dédiée ou d'un camescope. Un équipement de visioconférence peut être constitué à partir d'une base faite d'un tel équipement, il dispose des modules de transmission et du raccordement au téléviseur.

2) Les terminaux construits sur une base d'ordinateur personnel, destinés principalement au monde professionnel. On parlera alors de kits pour PC car ils sont constitués de cartes additionnelles que l'on enfiche dans les bus de l'ordinateur tout comme le sont les modems, ou les autres périphériques. Ils permettent la fonction visiophonie et même pour certains la fonction de visioconférence. Cette gamme de produits bénéficie d'une force de développement de la part de l'industrie informatique et est en pointe par rapport aux autres solutions. En général elle peut être livrée avec des interfaces permettant de créer des applications spécifiques. L'expérience montre que l'installation (et la désinstallation) de telles solutions n'est pas toujours évidente contrairement à ce qu'affirment les notices des constructeurs. Les conflits d'adressage sont fréquents. C'est un des arguments qui valorise encore les solutions dédiées qui ne sont pas prêtes d'être abandonnées. Les terminaux en kits sont souvent utilisés en visioréunion avec travail coopératif et sont bien adaptés au télétravail.

3) Les produits destinés au travail de groupe, la plupart du temps présentés sous forme de **meuble de visioconférence**. C'est un concept qui réunit dans le même ensemble tous les moyens de réaliser une réunion de groupe à distance : le codec vidéo et audio, les équipements de visualisation et de prise de vue, les transducteurs audio qui peuvent être déplacés, les interfaces de pilotage (télécommande, clavier) et de travail coopératif (PC, souris, entrées/sorties vers des équipements périphériques tels que des tableaux électroniques).

Par rapport aux solutions "console", ces configurations offrent une meilleure qualité sonore car ces transducteurs électro acoustiques sont plus performants et disposent de plus de volume donc de bande passante restituée.

4) Produits proposés sous forme de **solutions en OEM** (Open Electronic Market). Il s'agit de briques élémen-

taires constituées de cartes ou de boîtiers contenant les codecs et les interfaces de ligne, sur lesquels on peut monter des périphériques audio visuels pour constituer un équipement de visioconférence performant.

5) Les salles de visioconférence qui sont connectées à des réseaux comme NUMERIS par plusieurs interfaces de base ou par des liens RNIS T2, ou sur les liens ATM. Elles sont livrées clé en main avec tout leur support et environnement technique. Elles disposent des moyens de prise de vue optimales, de la lecture de document, d'écrans de visualisation des correspondants, d'écrans de contrôle, d'écrans tactiles pour piloter des équipements, etc.

	Dédié	Кіт	CONSOLE SUR TV
Réseau	RNIS RTC	RNIS RTC Internet	RTC (RNIS, intranet)
Usages supplémentaires	services en lignes consultation télématique	Bureautique production (assistance par ordinateur)	
Domaine d'emploi	grand public professionnel	professionnel	grand public jeux, monde de la télévision

Tableau 1 - Equipements de visiophonie

Түре	Visiophone Dédié	Кіт	Meubles et consoles	Studio
Nombre d'utilisateurs	1	1 (ou 2)	3	3 à 8
Débit réseau	128 kbit/s	≈ 64, 128 à 384 kbit/s RNIS Internet	(128) 384 à 768 kbit/s RNIS ATM	384 à 2048 kbit/s RNIS ATM
Applications		Travail coopératif	Travail coopératif	Travail coopératif

Tableau 2 - Systèmes de Visioconférence

# 5. BREF INVENTAIRE DES VISIOPHONIES

Nous donnons une liste de quelques produits qui se détachent sur le marché des terminaux audio visuels. Nous les distinguerons d'après les normes qu'ils respectent.

## 5.1 Terminaux visiophoniques basés sur H320

Ils sont la base des solutions sur réseaux numériques synchrones tel que le RNIS. Ils fournissent une gamme de service qui peut inter communiquer avec la téléphonie dont ils représentent une extension.

Chaque type de terminal dispose de composantes du service fixées par les paramètres de la norme H320 dans les informations dites "capacité du terminal". L'utilisateur a rarement accès aux variables pour modifier la qualité de service offert. La bande passante fournie par le réseau est fixe et dépend du contrat souscrit par le client. En général les normes sont définies pour privilégier la qualité de l'image par rapport au son et on ne peut que rarement fixer, par un menu de configuration, les débits ou les niveaux de qualité à favoriser sachant que l'on ne maîtrise pas les éléments du terminal que l'on souhaite joindre.

Lorsque l'on échange des données, les règles d'usage favorisent celles-ci au détriment de la qualité vidéo.

Le projet VISAGES a abouti en 1991 à un transfert de licence vers MATRA qui mis en oeuvre un terminal de visiophonie sur NUMERIS, son débit était de 128 kbit/s.

Depuis cette phrase d'introduction de la visiophonie beaucoup de terminaux ont vu le jour à la fois en France comme à l'étranger. Sur le réseau NUMERIS, on peut citer des terminaux dédiés, disposant d'un écran à cristaux liquides :

 Le visiophone ABS 2838 d'AL-CATEL fabriqué en 1993. Il servit de produit d'expérimentation pour France TELECOM. Il était vendu à un prix relativement élevé (17000 F). Depuis les coûts ont fortement chuté car ils sont destinés au marché résidentiel.

- Le visiophone **T VIEW** de Deutsche Telekom fabriqué par SIE-MENS. Il offre des fonctions audio visuelles très variées : poste de surveillance, répondeur téléphonique, mode 1B ou 2B Coût promotionnel : 3000 F en novembre 1997.
- Le visiophone PHOENIX de MIT-SUBISHI fabriqué pour le compte de NTT (décembre 1997) au coût de 9000 F la paire.

#### 5.2 Kits de visiophonie

L'ordinateur personnel (PC) peut offrir à moindre coût des fonctions visiophoniques qui permettent l'échange d'images interactives.

On assiste à une profusion de solutions sur PC dont le concept semble s'imposer.

En tant que marché de masse, les produits en kit attendent encore leur épanouissement. Comme tout produit sur PC, ils demandent de la part des fabricants un investissement important en "assistance maintenance" car ils sont parfois assez délicats à installer dans leur environnement. Les difficultés d'installation en relèguent beaucoup dans les placards. D'autre part étant donné la forte concurrence et la surenchère sur ce créneau, on assiste à une profusion de nouvelles versions souvent "boguées".

De nombreux kits fonctionnent sur RNIS ou sur réseaux IP. Certains sont compatibles aussi avec la norme H.263. Citons:

- PLUG and SEE de MATRA (1994)
- CYBERMOD (1997) qui est un produit 6B pour visioconférence de SAGEM
- MEET ME de SAGEM et APPLE (1995)
- AETA, produit 6B pour visioconférence

- ZYDACRON Z 2XX qui a des connexions sur tous type de réseaux (de 2 à 6B)
- PROSHARE IBVC 4.0 de INTEL
- PICTUREL l'un des grands acteurs du marché qui présente des gammes de produits. Ces produits peuvent servir de base pour construire des solutions "meubles" lorsque le débit permet d'atteindre 384 kbit/s. Ils sont alors reconditionnés en tant qu'équipements indépendants.

A l'heure actuelle la tendance est de parvenir à substituer aux coprocesseurs "chips" de traitement des solutions algorithmiques des solutions "tout logiciel". Les nouveaux PC développent une puissance de calcul suffisante pour traiter en temps réel les informations audio et bientôt vidéo H261 ou H263.

#### 5.3 Meuble de visioconférence

Ce sont des produits haut de gamme qui se distinguent à la fois par leur usage mais aussi par leur qualité audio visuelle. Citons:

- SONY TRINICOM 5000 est un meuble avec roulettes qui coûte environ 100 kF. L'une de ses versions présentée en1998 pourra offrir la fonction de pont de conférence pour relier 3 groupes distants. Leur coût est d'environ 80 kF.
- SAT CAMERIS, l'une des premières solutions dans cette catégorie (coût environ 150 kF). Il servit de référence de qualité et peut couvrir toute la gamme de débit de H 320 de 64 kbit/s à 2 Mbit/s.
- PICTURETEL TROPHY meuble haut de gamme (coût 320 kF) ou bien le VENUE 2000, tout équipé peut offrir de la visioconférence de qualité à 12B soit 768 kbit/s. Il est équipé d'énergie d'appel en mode "bonding" permettant la connexion au réseau jusqu'à 6 accès de base. Cette solution n'est pas exploitée en France.

## 5.4 Terminaux sur le réseau téléphonique

Ils sont conformes à la norme ITU H.324. Elle est destinée aux terminaux raccordés sur des interfaces analogiques du réseau téléphonique pour le grand public. Cette solution ne semble pas s'imposer actuellement.

Un exemple est le boîtier VIDEO NET, équipement qui se place au-dessus du téléviseur et dispose de sa caméra intégrée. Prix 3000 F.

### 5.5 Les terminaux conformes à H323

Ils sont destinés à fonctionner sur les réseaux locaux d'entreprise et sont basés sur des solutions Internet (IP). Il s'agit d'équipements principalement destinés aux professionnels et au monde de l'Intranet. Ils représentent une solution relais de H320, voire, sans doute dans le futur, une solution concurrente. L'interopérabilité avec le monde H320 se fera par des passerelles situées aux interfaces entre les réseaux. Certains terminaux offrent le double usage RNIS et réseau local.

#### Par exemple:

- Meeting Point de VCON Inc. est une solution en kit et s'intègre dans un PC.
- PROSHARE 150 de INTEL, solution qui comporte ses propres processeurs de traitement.
- Internet Vidéophone de INTEL solution logicielle (le traitement est effectué par l'unité centrale du PC).
- LIVELAN de PICTURETEL solution mixte matérielle et logicielle.
- NETMEETING de Microsoft, solution logicielle qui tend à devenir un pivot du marché.

#### CONCLUSION

Au cours de cet article nous avons assisté à l'évolution lente d'une technologie audio visuelle qui s'appuie sur différentes approches. La visiophonie, de façon générale, illustre bien les hésitations que l'on peut rencontrer lorsque l'on cherche à promouvoir un nouveau média. Il est certain que même le téléphone a subi les mêmes aléas à ses débuts. Dans notre cas, il s'agit de l'image interactive qui a du mal à faire sa percée. L'historique, qui en a été fait, montre également que l'on a buté sur le coût des terminaux analogiques. Il a fallu attendre le nouveau paradigme créé par les réseaux numériques pour que le problème soit reconsidéré à la base. Les appareils qui offrent la visiophonie ou la visioconférence sont des équipements complexes qui se sont diversifiés sous l'impulsion de nouvelles technologies mais surtout de nouveaux usages. Partant de terminaux dédiés au début, on s'est orienté progressivement vers des terminaux multi fonctionnels de façon à mieux maîtriser les coûts et mieux répondre aux besoins des utilisateurs. Par contre, on peut dire que l'évolution de la visioconférence à été moins hétérogène et plus vite stabilisée que la visiophonie car les usages en étaient mieux cernés.

Si nous faisons une projection sur l'avenir immédiat, on voit se dessiner des facteurs d'entraînement assez forts

Les solutions d'intégration "tout logiciel" seront sans doute déterminantes. On pourra s'offrir l'image inter-personnelle comme on peut se procurer un logiciel standard éventuellement téléchargeable. Si l'on pensait, il y a encore peu de temps, que la visiophonie avait un avenir dans le futur, les différents produits qui apparaissent sur le marché montrent bien que la période de développement est amorque la dynamique terminal/réseau/besoins/ et usages est coopérative.



# le Mercredi 28 Avril 1999

# ADASTA en visite aux eaux de Volvic

Rassemblement à l'Espace information, rue des Sources à Volvic.

Vingt-six personnes sont venues, non seulement de la région clermontoise mais aussi de VICHY (Allier) et du PUY (Haute Loire).

I ) La visite commence au CHA-LET DES SOURCES par une dégustation très appréciée, particulièrement des nouvelles boissons à l'eau minérale aux extraits naturels d'écorces de fruits, "Volvic citron", "Volvic orange" ainsi que "Volvic menthe".

Ensuite nous assistons aux projections - de diaporamas

- sur l'Auvergne,
- sur Volvic,
- d'un film vidéo "la Source" où une fillette (genre Petit Prince) découvre avec émerveillement le monde de Volvic grâce à un vieux savant, bougon mais enthousiaste, qui se laisse peu à peu séduire par la spontanéité et la curiosité de l'enfant.

II ) La visite se poursuit à l'usine du CHANCET à la sortie de Volvic en direction de RIOM.

Nous assistons d'abord à une présentation du site et toutes les précautions garantissant la pureté de l'embouteillage : l'eau prélevée à partir de la nappe souterraine par plusieurs forages, à 90 m de profondeur est transportée au centre d'embouteillage du CHANCET par une conduite spéciale en acier inoxydable puis elle est directement conditionnée.

Le groupe des visiteurs photographié par J.C. Capelani, organisateur de la visite.

MAPEO

L'embouteillage. (Documents Volvic)

V L'usine du Chancet.

Après cette présentation c'est la visite proprement dite des différentes parties de l'usine : chacun des visiteurs se coiffe d'une "charlotte" pour éviter toute contamination et toute poussière qui pourraient être transportées par les cheveux :

Fabrication des bouteilles plastiques en PET (Polyéthylène téréphtalate) par injection-soufflage à partir d'un composé de granulés PET mis en oeuvre dans une presse à injection. La matière chauffée à 280°C, passe dans des moules qui produisent des "préformes". Celles-ci reprises dans une deuxième série de moules, sont chauffées à 100° C, insufflées d'air filtré sous pression pour leur donner la forme définitive de la bouteille.

Emplissage et bouchage dans des salles sous atmosphère et hygiène contrôlées. A l'abri de tout contact extérieur depuis son captage, l'eau est distribuée sur plusieurs soutireuses dans des salles d'embouteillage en atmosphère filtrée et surpressée afin de préserver la Qualité bactériologique de l'eau.

Ensuite les bouteilles sont bouchées, étiquetées et regroupées pour leur conditionnement.

A chaque stade de la fabrication, une surveillance continue est assurée par le laboratoire qualité de la société Volvic.

Nous assistons à la mise en packs, en cartons, en casiers, des bouteilles qui partent dans le monde entier. Plus de deux millions et demi de bouteilles sont produites chaque jour et vont porter un peu partout, dans 60 pays, l'image de notre Auvergne, source de pureté et de santé.

Tous les visiteurs ont été émerveillés par la haute technologie et la recherche de qualité dont ils ont été les témoins privilégiés.

Merci à la société des eaux de Volvic qui a permis cette visite et à notre Vice Président Jean-Claude CAPE-LANI qui l'a si bien organisée.



**EXPOSOLEIL:** 

une exposition réalisée à l'occasion de l'éclipse

La future éclipse de soleil du 11 août 1999 a inspiré la couverture du présent numéro d'Auvergne-Sciences. A ce sujet, nous informons nos lecteurs que l'ADASTA vient d'acquérir l'exposition EXPOSOLEIL proposée par la Société Astronomique de France. Cette exposition, composée de 20 panneaux, que l'ADASTA a fait plastifier, s'adresse à un large public. Les thèmes principaux sont le soleil (aspect historique et mécanisme interne) et les éclipses. Un panneau est consacré à la sécurité visuelle : rappelons que, pour observer sans danger pour la vue, une éclipse de soleil, il faut porter des lunettes spéciales.

- Pour la location de l'exposition, contacter l'ADASTA.
- Pour l'achat de lunettes, s'adresser à la Société Astronomique de France, 3 rue Beethoven 75016 Paris.

Tel: 01 42 15 19 99

http://www.iap.fr/eclipse99/lunette.htm



