

# AUVERGNE

# Sciences

N° 48 - JUIN/JUILLET 2000



LES POLYMÈRES CONDUCTEURS  
LA COULEUR DU LAIT  
LA FORME DES PROTÉINES  
NEWTON  
2000 RAISONS DE FAIRE  
DE L'HISTOIRE DES SCIENCES



**BULLETIN DE L'ADASTA**

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

# Éditorial

Après avoir occupé depuis sa création quelques postes qui participent au fonctionnement d'une association, me voici élu à la présidence de l'A.D.A.S.T.A. depuis avril 2000.

C'est un grand honneur d'être à la tête d'une telle association fondée en juin 1986 ; aussi je mettrai tous les moyens dont je dispose-  
rai pour poursuivre l'œuvre entreprise par Roland JOUANISSON Directeur scientifique fondateur aidé par Monsieur R. VESSIERE puis Monsieur P. SOLE.

Je voudrais remercier tout particulièrement Madame Suzanne GELY qui a accepté à une période difficile la Présidence de l'A.D.A.S.T.A. Grâce à sa pugnacité elle a su porter l'association, tant en interne qu'en externe, au niveau de l'animation scientifique et technique que nous connaissons.



J.C. Capelani

Certes il reste encore beaucoup à faire mais nous pouvons compter sur une nouvelle équipe scientifique de haut niveau dont vous trouverez les noms des membres du Conseil d'Administration et du Bureau en page 26.

Nous sommes encouragés par les 350 adhérents qui payent une cotisation, par les personnalités locales, régionales,

les sponsors qui financent la Revue.

Nous comptons sur votre participation pour nous aider à faire vivre l'A.D.A.S.T.A. en nous adressant vos suggestions, vos critiques et même pourquoi pas vos encouragements... Tout en gardant l'esprit de cette association dont l'objet est de développer la curiosité et l'esprit d'innovation dans le domaine des sciences et techniques par des moyens pédagogiques et de vulgarisation visant à stimuler le goût de la chose scientifique.

## NECROLOGIE

Nous apprenons avec tristesse le décès de Monsieur Robert Leygonie le 28 mai dernier. Polytechnicien, président honoraire du CITEPA (Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique), Monsieur Leygonie avait publié, ces dernières années, dans les colonnes d'Auvergne-Sciences, divers articles très appréciés sur l'effet de serre, le réchauffement climatique et la pollution atmosphérique. L'ADASTA prie la famille de Monsieur Leygonie de trouver ici l'expression de ses sincères condoléances.

## Merci à nos sponsors



MINISTÈRE  
DE LA RECHERCHE  
ET DE LA TECHNOLOGIE



## Sommaire

Les polymères conducteurs.....	3
La couleur du lait.....	13
Visite au conservatoire du pneu.....	17
La forme des protéines.....	21
Bureau de l'ADASTA.....	26
Vie de Newton avant les principes (suite).....	27
2000 raisons de faire de l'histoire des sciences.....	28

Photo de Couverture :  
Lac de Guéry - Puy-de-Dôme (Sandrine Mercier).

## Adhésions et Abonnements

Adhésions à titre individuel.....	150 F - 22,87 €
Adhésions à titre collectif.....	500 F - 76,22 €
Membre bienfaiteur.....	1 000 F - 152,45 €

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

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

Adressez le courrier à

ADASTA, 19, rue de Bien-Assis - 63100 Clermont-Ferrand

Tél. 04 73 92 12 24 - Fax 04 73 92 11 04

E-mail : [adasta@wanadoo.fr](mailto:adasta@wanadoo.fr)

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

# Les polymères conducteurs

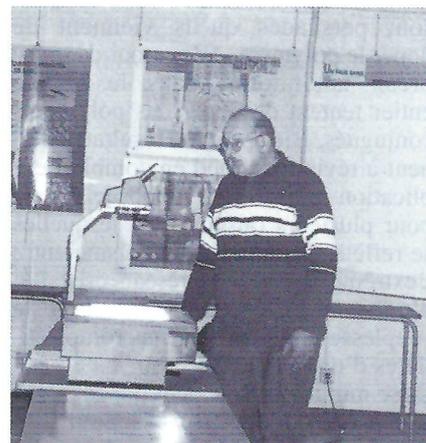
Michel DUGAY

Maître de conférences à l'Université Blaise Pascal

Chercheur au LASMEA

(Laboratoire des Sciences des Matériaux

pour l'Electronique et l'Automatique) Clermont-Ferrand.



Monsieur Dugay a fait une conférence sur les polymères conducteurs dans les locaux de l'ADASTA, le 10 mai 2000.

## I - HISTORIQUE OU QUAND LES POLYMÈRES DÉFIENT LE CUIVRE.....

### 1) introduction

Sous le nom générique de *matières plastiques*, les polymères ont envahi notre existence quotidienne. Leur flexibilité, leur légèreté, leur facilité de mise en œuvre, leur bas prix de revient, ont fait de l'emploi de ces matériaux une des grandes révolutions technologiques de notre siècle. Toutefois dans les domaines de l'électricité et l'électronique, les polymères sont souvent réduits au rôle subalterne d'isolants, les tâches nobles étant assumées par les métaux et les semi-conducteurs. L'idée très séduisante de réunir dans un même matériau les propriétés mécaniques des polymères classiques et les propriétés électriques des métaux a hanté les chercheurs pendant près d'un demi-siècle.

Aujourd'hui il existe enfin des matériaux polymériques capables de conduire le courant électrique. Leur constitution découle d'une remarque élémentaire : tous les systèmes conducteurs doivent cette faculté à la présence d'électrons délocalisés. Dans le domaine de la chimie organique, la délocalisation est le fait des *systèmes conjugués*, composés dont la formule chimique peut, au moins en première approche, s'écrire avec une alternance de simples et de doubles liaisons. Effectivement, tous les polymères conducteurs ont ce trait en commun : en voici quelques exemples (figure 1). Présentés tels quels, ces produits sont

seulement d'assez médiocres semi-conducteurs. En 1977, une découverte fortuite en fait des matériaux vedettes. A la suite d'un banal incident de manipulation, un échantillon de polyacétylène en cours d'étude se trouve exposé à un gaz très oxydant. Résultat: on lui mesure une conductivité électrique presque aussi élevée que celle...du cuivre !

### 2) un peu de physique des solides

Pour l'interprétation de ce phénomène ainsi que pour la bonne compréhension de tout ce qui va suivre, il importe d'avoir parfaitement présentes à l'esprit les notions fondamentales concernant la conduction électrique dans les solides. La quantification fait que les énergies des électrons se répartissent en bandes permises séparées par des bandes interdites. Le degré d'occupation des bandes et leurs différences d'énergie distinguent métaux, isolants et semi-conducteurs.

Pour les métaux, la dernière bande peuplée n'est que partiellement pleine. Un faible apport d'énergie extérieure

permet aux électrons d'accéder à des orbitales supérieures et de participer à la conduction. Les isolants et semi-conducteurs présentent, au zéro absolu, une dernière bande totalement pleine : c'est la bande de valence (BV). Un apport d'énergie extérieure ne peut être accepté que s'il est au moins égal à la largeur de la bande interdite qui la sépare de la bande vide immédiatement supérieure, la bande de conduction (BC).

De la sorte, communiquer de l'énergie cinétique aux électrons est un processus difficile pour les semi-conducteurs et impossible pour les vrais isolants. On peut cependant augmenter très sensiblement la conductivité des semi-conducteurs en y injectant des porteurs de charge électrique par une opération dite de *dopage*. Des *donneurs* permettent d'injecter des électrons supplémentaires. Chimiquement ce sont des réducteurs. Au contraire, des *accepteurs* créent des lacunes électroniques appelées *trous*. Ce sont des agents *oxydants*.

### 3) tout est dans le dopage !

Et maintenant reprenons l'histoire des polymères conducteurs. Nous sommes en 1977, à l'université de Pennsylvanie, dans le laboratoire de HEEGER, physicien des mécanismes du transport électrique dans les composés organiques. Il s'est entouré de la collaboration de deux chimistes, le japonais SHIRAKAWA, polymériste, et le Néo-Zélandais Mac DIARMID, expert en synthèse par électrochimie. A eux trois, ils exposent accidentellement du polyacétylène à des vapeurs de pentafluorure

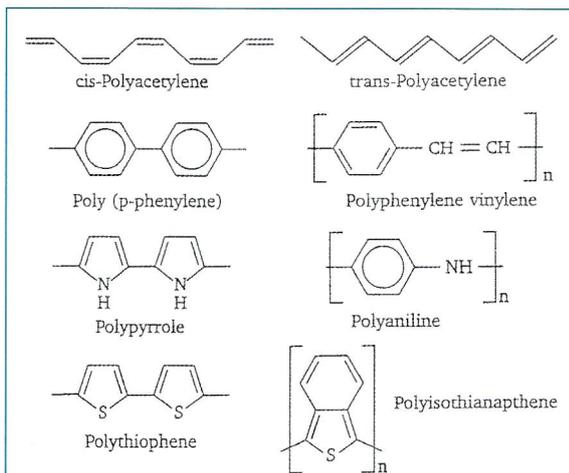


Figure 1 - Exemples de polymères conducteurs

d'arsenic  $AsF_5$ . Le résultat est un accroissement fantastique de la conductivité électrique.

Dans un premier temps, l'interprétation paraît simple. Le polyacétylène est un semi-conducteur et  $AsF_5$  un oxydant énergique. Les trois chercheurs sont persuadés qu'ils viennent de doper le polymère. A leur tour de nombreux laboratoires dans le monde entier tentent de doper des polymères conjugués. Bien vite les résultats amènent à réviser de fond en comble l'explication initialement proposée et cela pour plusieurs raisons dans lesquelles se reflète toujours l'antagonisme entre l'extrême rigidité du réseau cristallin d'un semi-conducteur minéral et la souplesse des chaînes macromoléculaires d'un polymère.

Dose minimale d'élément dopant à utiliser, réversibilité ou irréversibilité du processus, déformations, évolution du diagramme des énergies, il y a beaucoup trop de différences qualitatives pour que fondamentalement le phénomène concernant les polymères puisse être de même nature que le dopage des semi-conducteurs classiques. Malheureusement ce qui s'est passé en 1977 a suffisamment marqué les esprits pour que le mot dopage persiste à être employé pour désigner le traitement qui permet de transformer un polymère conjugué de médiocre en excellent conducteur. On a simplement inventé un terme pour caractériser les polymères capables de donner lieu à cette transformation : ils sont *électro-actifs*. Nous allons maintenant aborder l'essentiel de la physique, très particulière, de ces matériaux.



## II - LA PHYSIQUE DES POLYMÈRES CONDUCTEURS

### 1) distorsion de PEIERLS et effet JAHN-TELLER

Les électro-actifs sont à liaisons conjuguées, juste assez rigides pour les empêcher de s'enrouler en pelotes comme le font les matières plastiques ordinaires. Ils ont une morphologie plutôt fibrillaire et leurs propriétés sont dominées par un comportement de *systèmes quasi unidimensionnels*. On veut dire par-là que les forces de cohésion à l'intérieur d'une chaîne sont considérablement plus grandes que les forces de cohésion entre les chaînes. Il résulte de ce caractère une hypersensibilité des électrons aux effets des couplages avec les vibrations du squelette macromoléculaire. Ces dernières peuvent consister soit en des mouvements des centres de gravité des entités monomères, soit en des mouvements autour des centres de gravité.

Les conséquences des vibrations des liaisons inter-motifs ont été analysées

au plan théorique par PEERLS dès 1956. Considérant de la manière la plus générale possible une chaîne d'atomes identiques, il aboutit à la conclusion que les distances entre atomes ne peuvent pas rester égales. En imaginant de coupler ces atomes par des ressorts, il existe toujours un mode de vibration à ressorts inégalement tendus qui donne au système global, électrons plus noyaux vibrants, une énergie plus basse que la configuration uniforme. En particulier, pour les chaînes à un électron par atome, l'état le plus stable est à inter-distances alternativement plus courtes et plus longues. Vis à vis de la chaîne à atomes équidistants, Peierls la considère comme *distordue*.

Ce résultat nous amène à réviser quelque peu notre chimie organique. Force est de constater que les conclusions de Peierls généralisent un concept trop souvent oublié, connu sous le nom d'effet JAHN-TELLER. Pour analyser l'état d'un système conjugué, il ne faut pas s'en tenir aux seuls électrons  $\pi$  mais aussi prendre en considération les vibrations du squelette  $\sigma$  ces deux contributions varient de façon antagoniste : la délocalisation assurée par des liaisons égales minimise l'énergie  $\pi$  alors que l'alternance des liaisons relaxe les tensions du squelette  $\sigma$  en vibration. Pour les petites molécules type benzène, l'effet  $\pi$  l'emporte largement alors que chez les gros systèmes c'est l'inverse. Ce qu'il faut retenir de toute cette discussion, c'est qu'une *chaîne polymérique conjuguée se présente avec des liaisons alternées*. Bien sûr l'ordre de celles-ci ne les fait ni simples ni doubles mais il en est de plus longues que nous dessinerons avec un seul trait et de plus courtes que nous représenterons par deux traits. En continuant à assimiler la chaîne à un réseau à une dimension, la maille élémentaire contient deux motifs monomères. Un raisonnement assez simple permet de démontrer que, si chacun de ces motifs apporte un électron  $\pi$  à l'édifice global, les bandes d'énergie de ces électrons sont remplies selon une disposition de semi-conducteur alors que la situation à liaisons identiques (un seul motif par maille) aurait donné une disposition de type métallique.

### 2) le dopage des électro-actifs : des défauts localisés mais mobiles

Et maintenant quelques mots sur les conséquences des mouvements autour des centres de gravité. Il s'agit d'un problème de mécanique complexe qui a été résolu par HOLSTEIN. Le principal résultat est que toute charge électrique en excès sur la chaîne polymérique se stabilise en un état localisé appelé *polaron*.

La sensibilité exacerbée des unidimen-

sionnels aux couplages des électrons avec les différents modes de vibration conduit donc à des situations dans lesquelles le gaz électronique est soumis à toutes sortes de forces qui s'opposent à la conduction électrique. Pour les polymères, l'obstacle provient de la distorsion de Peierls qui, en faisant alterner les distances, provoque l'ouverture d'une bande interdite et donne au matériau un modeste statut de semi-conducteur. Cet obstacle, nous l'avons vu, fut levé en 1977 par Heeger, Mac Diarmid et Shirakawa. Reste à comprendre comment le dopage imposé au polymère permet de gagner huit ordres de grandeur sur la conductivité électrique. Doper le polymère, c'est lui injecter des électrons ou lui en retirer. Cela ne supprime en rien les couplages avec les vibrations du squelette. Le nombre d'électrons présents ne faisant que jouer sur la longueur d'onde de la distorsion, on devrait toujours aboutir à une situation n'offrant pas de possibilité de transport électrique facile. Pour que le polymère dopé devienne un excellent conducteur, il faut que les électrons ou les trous apportés par le dopage manifestent un comportement fort différent de celui d'électrons de bandes. Et comme le modèle des bandes est par essence la description de systèmes à électrons non localisés, on en vient assez facilement à l'idée que les porteurs de charge injectés par le dopage subsistent toujours dans des états localisés mais que, parce qu'ils conduisent, ces états sont mobiles. Nous allons examiner de plus près ce qu'ils peuvent être au travers d'une présentation détaillée des grandes familles de polymères conducteurs.



## III - LE POLYACÉTYLÈNE, L'ARCHÉTYPE DES POLYMÈRES CONDUCTEURS

### 1) caractéristiques

A tout seigneur tout honneur, commençons par le polyacétylène. Il est le plus simple des polymères conjugués puisqu'il se réduit à un simple enchaînement de groupes CH avec liaisons alternées. L'isomérisation cis-trans par rapport aux liaisons les plus doubles peut le faire exister sous différentes formes. Seule la variété totalement trans est intéressante pour les applications polymère électro-actif, ce qui ne pose d'ailleurs aucun problème, on maîtrise parfaitement les catalyseurs d'isomérisation.

Ce polyacétylène trans (figure 2) a une géométrie en zig-zag avec alternance des liaisons. Quand il s'agit de lui dessiner une formule développée, on peut placer le double trait sur l'un ou l'autre

des deux flancs du zig-zag. Du point de vue de la mécanique quantique on obtient alors deux systèmes d'énergie rigoureusement identique. On dit qu'ils sont deux formes dégénérées de la même entité. Cet état de fait a pour conséquence que le polyacétylène à température ambiante se présente organisé en *domaines* de l'un ou l'autre type séparés par des parois que l'énergie thermique suffit à stabiliser. On voit facilement que le raccord laisse subsister un électron célibataire. Il s'agit d'un soliton. Statistiquement on dénombre un *soliton* pour 2000 motifs CH.

## 2) le scénario du dopage

Il faut savoir que le polyacétylène manifeste trois régimes redox (figure 2 suite). La forme neutre peu conductrice s'oxyde assez facilement pour donner une chaîne polycationique dopée par des anions. C'est ce qui s'est passé lors de l'attaque historique par  $\text{AsF}_5$ . Avec une facilité égale, on peut au contraire réduire le polyacétylène en une chaîne polyanionique dopée par des cations. Comme on visualise sans doute mieux une injection qu'un enlèvement d'électrons, je vous propose, pour le confort du raisonnement, de suivre un dopage de cette nature, donc par réduction du polymère.

Au tout début les électrons injectés s'associent avec les solitons. Seulement l'expérience enseigne que le dopage ne devient efficace qu'à des concentrations de plusieurs pour cent, donc très largement supérieures aux un pour 2000. Bien vite tous les électrons célibataires se retrouvent appariés et un autre mécanisme doit entrer en jeu pour que le polymère continue à accepter les électrons dopants. Ce ne peut être que la rupture de certaines liaisons et la redistribution des électrons par réarrangement avec les électrons supplémentaires injectés par le dopage.

Cela fait naître sur la chaîne diverses sortes de défauts (figure 2 fin). Ainsi on peut rencontrer des couples charge-électron célibataire appelés *polareons*, des couples de charges ou *bipolarons* ou bien encore des charges isolées appelées *solitons chargés*. La formation de ces différents défauts correspond à l'apparition de niveaux d'énergie discrets dans la bande interdite. L'évolution avec l'augmentation du nombre des électrons injectés est une prolifération de l'espèce solitons chargés, résultat ultime des interactions entre les autres formes. A force de voir leur nombre augmenter fortement, les solitons chargés se mettent eux aussi à interagir, ce qui élargit leur niveau d'énergie commun et le transforme en une bande. Puis à force de s'élargir, la bande solitonique finit par obtenir totalement l'ancienne bande interdite. Du même coup le polymère dopé se

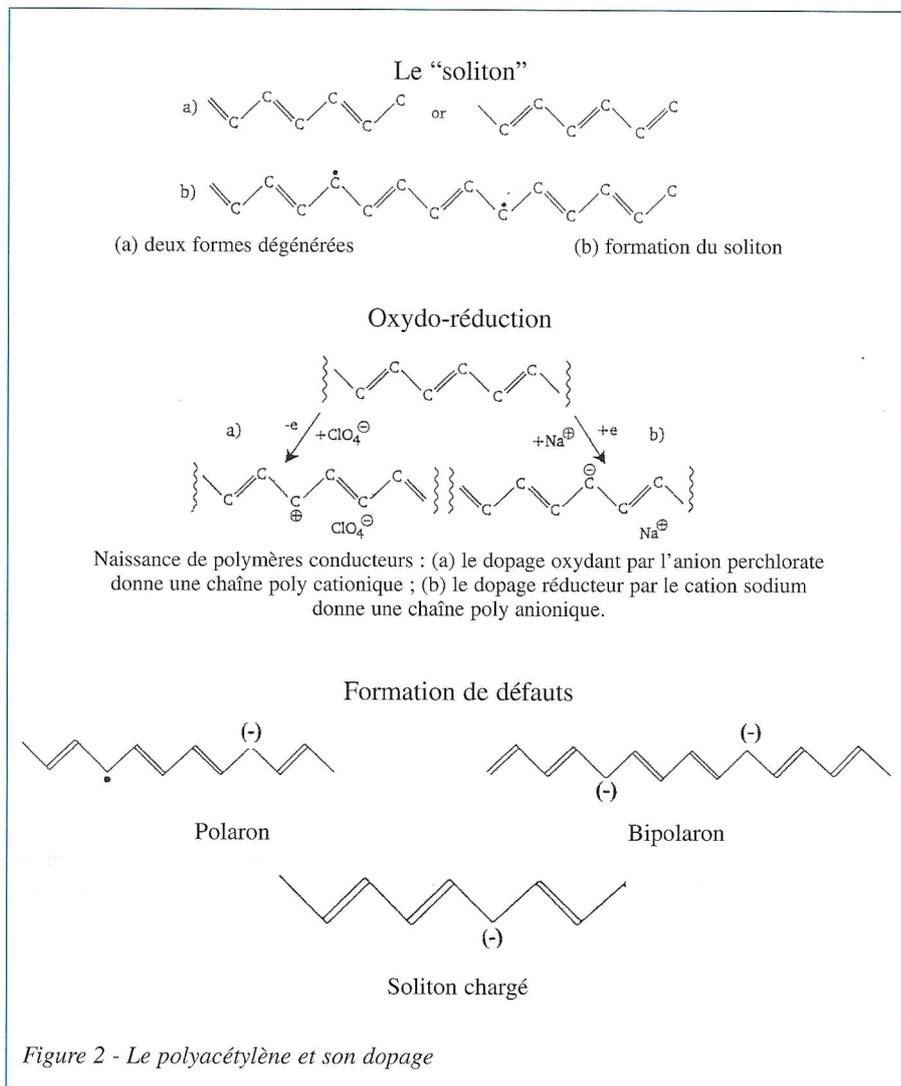


Figure 2 - Le polyacétylène et son dopage

retrouve avec une bande unique incomplètement remplie. Il a pris la structure électronique d'un métal. Il en prend aussi la conductivité électrique ! .....

## IV- D'AUTRES POLYMÈRES ÉLECTRO-ACTIFS

On connaît un certain nombre d'autres polymères électro-actifs. Ils n'ont pas la faculté de pouvoir exister sous deux formes dégénérées mais sont seulement capables de présenter deux formes d'énergies très voisines.

### 1) la première génération : les polyaromatiques

La première génération de polymères conducteurs s'apparente d'assez près au polyacétylène. Ils forment la famille dite des polyaromatiques. Leur prototype en est le polyparaphénylène, en abrégé PPP (figure 3). Il consiste en un enchaînement linéaire de noyaux benzéniques accrochés en position para. Au prix d'un faible apport d'énergie, on passe de la forme fondamentale benzénique à une forme légèrement excitée quinonique. A température ambiante, quelques défauts quinoniques parsèment la structure benzénique.

Le PPP se dope très facilement par oxydation. L'attaque du dopant se fait par transformation de la géométrie benzénique en géométrie quinonique. Elle crée des *polareons* puis des *bipolarons*. Ces derniers deviennent assez nombreux pour interagir et former deux bandes bipolaroniques, symétriques l'une de l'autre par rapport à l'axe de la bande interdite. A force de s'élargir, ces bandes se collent, l'une à l'ancienne BV, l'autre à l'ancienne BC. Lorsque le collage est réalisé, le PPP à qui l'oxydation a retiré des électrons présente une bande d'énergie incomplètement remplie. Cependant, et c'est une différence majeure vis à vis du polyacétylène, l'ancienne bande interdite ne se referme pas.

### 2) des améliorations : la technique des précurseurs

Le polyacétylène est infusible et insoluble, par contre il a encore la flexibilité des polymères ordinaires. La forme dopée perd cette propriété et on peut la travailler. De plus le matériau est instable à l'oxygène qui le dégrade par création de groupements carbonyle. Tout cela limite très fortement les potentialités d'applications technologiques et rend nécessaire la recherche d'améliorations.

Des efforts considérables ont été accomplis en vue de la "formabilité", c'est à dire l'obtention d'un matériau pouvant se travailler. La méthode la plus porteuse consiste à synthétiser des précurseurs stables et pouvant être mis en forme. Il suffit ensuite de les chauffer (Figure 4) pour obtenir le polymère désiré, polyacétylène, PPP ou autre. Le groupe de recherche sur les polymères de Durham a joué un rôle de pionnier dans le domaine. Il faut noter que les polymères obtenus à partir de précurseurs n'ont plus la morphologie fibrillaire des premiers matériaux de Shirakawa ou Mac Diarmid. Leur densité apparente est beaucoup plus grande et ils sont amorphes. Ils sont remarquablement stables à l'air.

### 3) les hétéroaromatiques

Je viens de traiter le polyacétylène et les polyaromatiques de polymères conducteurs de première génération. La seconde, c'est la famille des polyhétéroaromatiques dont le prototype est le polypyrrole, PPy (figure 5). Par oxydation électrochimique, le pyrrole, composé azoté à cycle pentagonal, donne un dépôt noirâtre sur l'électrode de travail. Il se laisse détacher sous forme insoluble, infusible ou encore impossible à travailler mais excellent conducteur de l'électricité. Ce dépôt est du polypyrrole dopé.

En effet l'oxydation anodique permet de réussir *simultanément* la polymérisation du pyrrole en polypyrrole et le dopage oxydant du polymère en cours de croissance. Tous les électro-actifs de seconde génération naissent de cette manière, donc *directement sous forme conductrice*. En outre, en jouant sur le potentiel de l'électrode, on a la maîtrise du taux de dopage. Le mécanisme de ce dopage est en tout point semblable à celui du PPP. il repose sur le fait que, pour le motif monomère, peuvent exister deux géométries aux énergies très voisines.

Le PPy non dopé serait un fort médiocre semi-conducteur. Le dopage, en même temps qu'il induit des changements de géométrie, fait apparaître des bandes bipolaroniques. Le collage de ces bandes aux anciennes BC et BV engendre un système à bande partiellement remplie. La seule différence avec le PPP réside dans le fait que des bandes bipolaroniques ne sont plus symétriques par rapport à l'axe de la bande interdite. Cette perte de symétrie est tout simplement la conséquence de la présence d'un hétéroatome, l'azote en l'occurrence.

La possibilité d'obtenir par électro-oxydation des films conducteurs détachables est un phénomène beaucoup plus répandu qu'on pourrait le penser. Voici quelques exemples de monomères donnant cette production électrochimique de polymères conducteurs (Figure 5 deuxième partie). Pour la plupart ces composés

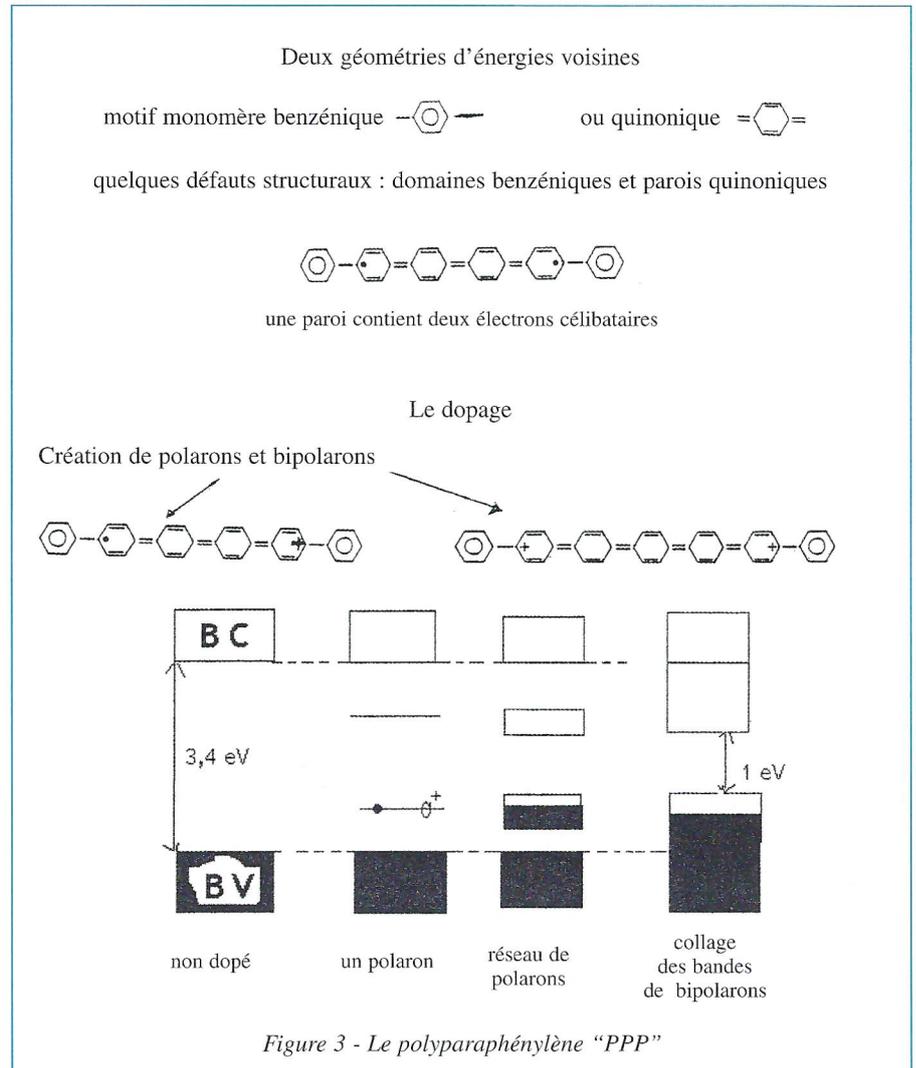
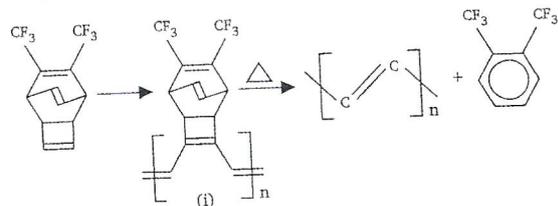


Figure 3 - Le polyparaphénylène "PPP"

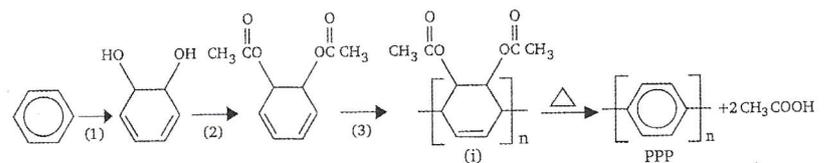
### Polyacétylène

(i) est un précurseur facile à travailler et soluble



### Poly-paraphénylène PPP

(1) oxydation bactérienne ; (2) estérification ; (3) polymérisation : (i) est soluble



### Poly-paraphénylène-vinylène PPV

le sel de sulfonium (i) est soluble

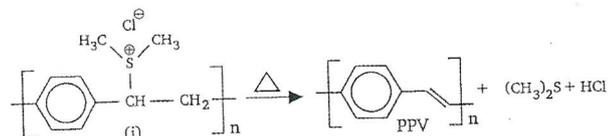


Figure 4 - Les polyaromatiques et leurs précurseurs



conducteur. Encore une fois, nous venons d'assister à un numéro de dopage ! Qu'a donc provoqué l'acidification ?

## 2) comment la polyaniline forme-t-elle un système conducteur ?

La seconde partie de la figure 6 illustre le mécanisme de l'évolution de la polyaniline. Tout d'abord les protons provenant de l'acide se lient de façon hétéropolaire aux atomes d'azote par l'entremise des doublets libres. Ceci concerne des azotes doublement liés à un cycle quinonique. L'attaque acide fait apparaître de chaque côté de ce cycle un ensemble NH porteur d'une charge positive. Selon la terminologie, ces charges se formant par paires sont des *bipolarons*. L'engagement d'une liaison hétéropolaire a pour effet de modifier quelque peu la densité électronique autour de l'azote en allant dans le sens d'un appauvrissement. L'azote cherche à le compenser en s'emparant d'un électron de la double liaison. Celle-ci s'ouvre et un second électron est capturé par le cycle. Le phénomène intervenant des deux côtés du cycle le sextet aromatique est reconstitué et le noyau redevient benzénique.

Chaque ensemble NH porte maintenant une charge positive et un électron célibataire. Selon la terminologie, ce couple doit s'appeler *polaron*. On assiste à la création de défauts altérant la géométrie exactement comme chez les autres polymères conducteurs, seulement le phénomène redox qui leur donne naissance est *intramoléculaire*. Après protonation, la polyaniline se réarrange à *nombre d'électrons constant pour modifier sa structure* en oxydant certaines régions de la macromolécule aux dépens de la réduction de certaines autres. On donne à ce processus le nom d'autodopage. L'évolution vers la forme conductrice s'achève avec la relaxation des contraintes imposées par la trop grande proximité des polarons.

## VI- POLYMÈRES CONDUCTEURS ET INGÉNIERIE MOLÉCULAIRE

À présent que nous connaissons mieux les particularités de la polyaniline, nous pouvons lui redonner sa place parmi la famille des hétéroaromatiques, en vertu du critère polymérisation et dopage au cours de la même oxydation électrochimique. Un autre intérêt de ces polymères est qu'on peut les soumettre à un très grand nombre de traitements pour atteindre des matériaux pouvant se travailler (figure 7).

Une substitution sur un site non affecté par la polymérisation permet de

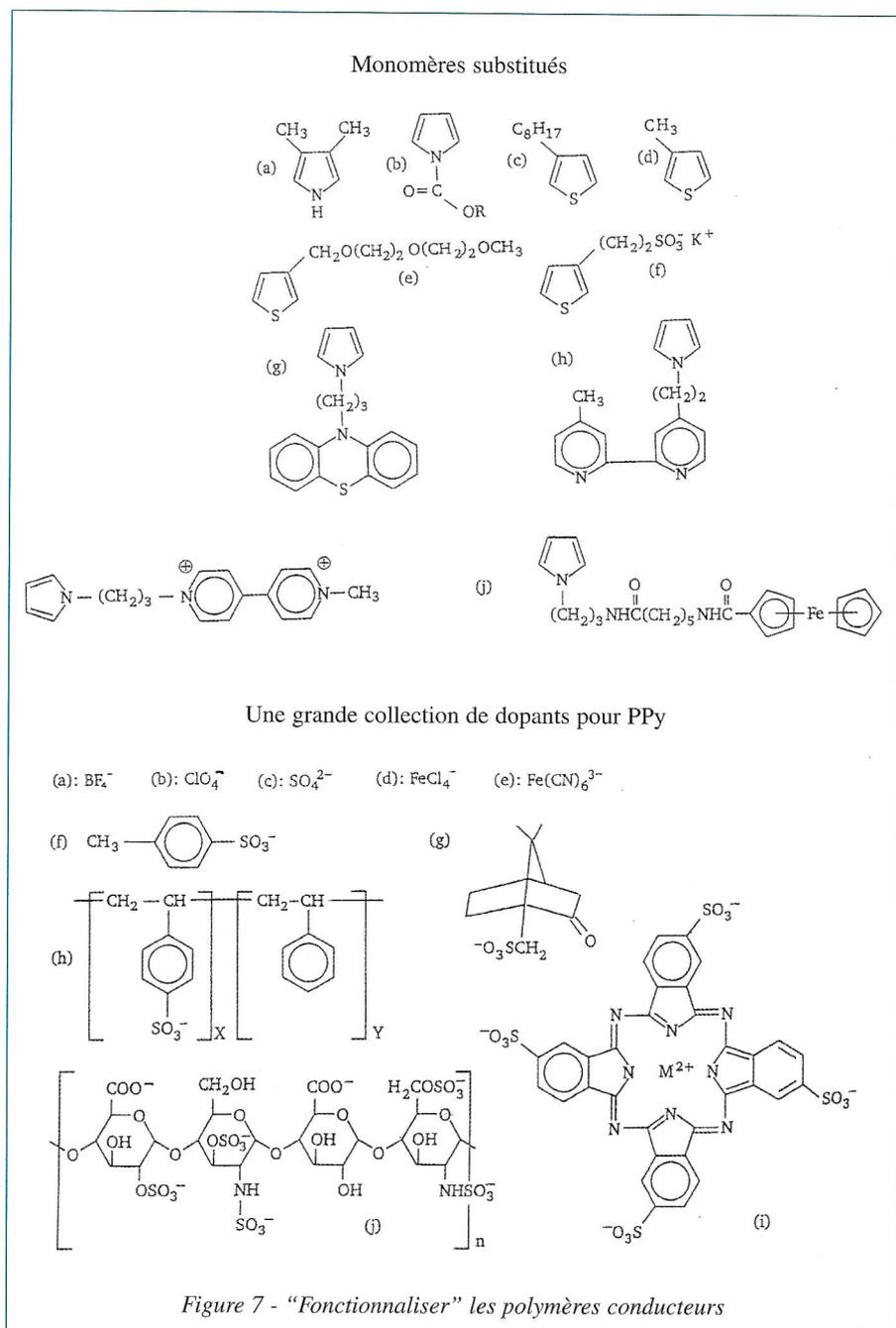


Figure 7 - "Fonctionnaliser" les polymères conducteurs

*fonctionnaliser les monomères*. Le greffage d'une chaîne courte [(a) ou (d)] conduit ainsi à une meilleure solubilité de la forme neutre non dopée dans les solvants organiques. Pour rendre soluble la forme dopée, il vaut mieux au contraire accrocher une chaîne longue (c) ou un groupe alcoxy (e). Un groupe sulfonate (f) donne des polymères solubles dans l'eau sous leur état conducteur. Malheureusement la conductivité de ces substitués est généralement inférieure à celle des non substitués. Il est étonnant de voir à quel point le pyrrole accepte sur l'azote des substituants encombrants et complexes: un colorant phénothiazine (g), un ligand bipyridyle (h), un viologène (i) ou un ferrocène (j).

La *fonctionnalisation des dopants* offre elle aussi des perspectives intéressantes. Elle permet de modifier profondément la conductivité, la stabilité et la morphologie du polymère

conducteur. Le rôle de l'anion dopant n'est pas clairement identifié mais on a su dégager un certain nombre de règles. Pour doper PPy il n'y a aucune raison de se limiter à des anions élémentaires [(a) à (d)]. Des anions sulfonates simples tels le para-toluène sulfonate (f) confèrent une bonne flexibilité et une bonne tenue mécanique sans perte de conductivité électrique. Des espèces à la géométrie tourmentée comme le camphre (g) sont au contraire néfastes pour la conductivité. L'anion polystyrène sulfonate (h) donne un PPy dopé fusible. Les complexes métalliques dopent facilement PPy, aussi bien les plus élémentaires [tétra fluoroborate (a) ou ferricyanure (c)] que les plus compliqués comme les polyphthalocyanines sulfonées (i), ce qui est fascinant, c'est que cet anion (i) est lui-même électro-actif ! Enfin un très ingénieux dopant est l'héparine (j), l'anti coagulant naturel du sang.



## VII- VERS LES APPLICATIONS

### 1) le " surdopage " et la réalisation de capacités énormes

Donc les polymères conducteurs les plus élaborés s'obtiennent par dépôt électrochimique sur une électrode et leur dopage est réalisé par variation du potentiel de cette électrode: on injecte des charges électriques pour provoquer des phénomènes redox. Classiquement, lors d'une oxydoréduction, l'injection de charges ne peut pas se poursuivre au-delà de la valeur critique pour laquelle la forme oxydée est intégralement transformée en forme réduite ou vice-versa.

Chez les polymères électro-actifs au contraire, il est possible de continuer à injecter des charges après avoir dépassé ce potentiel. Le nombre de ces charges en excès varie alors linéairement avec la tension appliquée, donc selon une loi du type  $Q = C V$ . Pour cela on leur donne le nom de charges *capacitives* afin de les distinguer des *charges faradiques* mises en jeu durant le dopage. L'interprétation du phénomène réside dans le fait que, à condition d'en payer le prix en énergie (ce que l'on fait en élevant le potentiel de l'électrode) on peut, une fois que l'oxydoréduction a créé le nombre maximal possible de polarons ou bipolarons, tasser ceux-ci et loger d'autres charges. Le polymère est alors en *surdopage* et se comporte comme un condensateur de capacité gigantesque : plusieurs farads par centimètre cube !

### 2) applications plus courantes

Sans prétendre à l'exhaustivité, voici une revue d'applications possibles des polymères conducteurs.

#### a) catalyse et piles à combustible

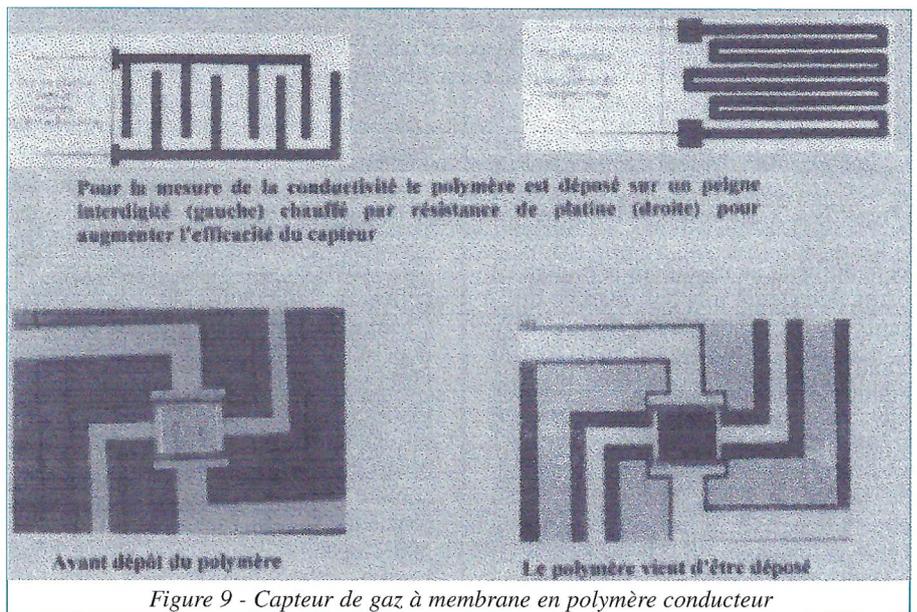
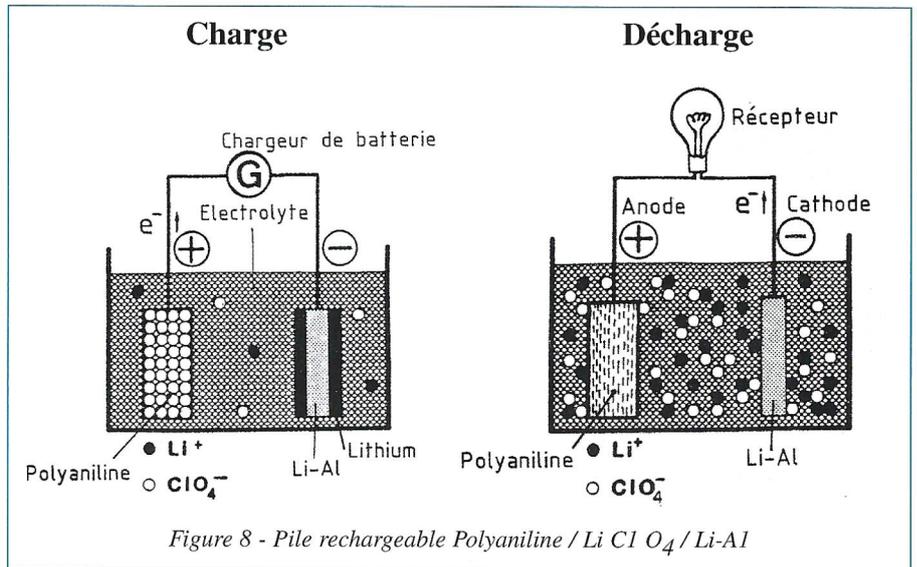
Les polymères offrent une grande surface sous un petit volume. Si, en plus, ils sont électro-actifs, ils autorisent des transferts de charge susceptibles d'initier des réactions entre réactifs et réactants capables de s'approcher de près dans l'espace interfibrillaire.

#### b) bouclier électrostatique

Un revêtement conducteur en polymère électro-actif est beaucoup plus léger et surtout beaucoup moins cher qu'un blindage métallique mais tout aussi efficace pour assurer une mise à la terre ou former une cage de Faraday.

#### c) isolation des câbles haute tension

Un câble traditionnel pose toujours des problèmes en raison de la mauvaise adhérence mutuelle entre les isolants et les conducteurs. Il y a formation de poches et de condensateurs parasites



qui sont autant de facteurs abrégant la vie de la structure. Un remède astucieux serait de gainer le conducteur central par un polymère conducteur avec gradient de dopage de façon à avoir une transition progressive vers l'isolant périphérique.

#### d) application à la biologie

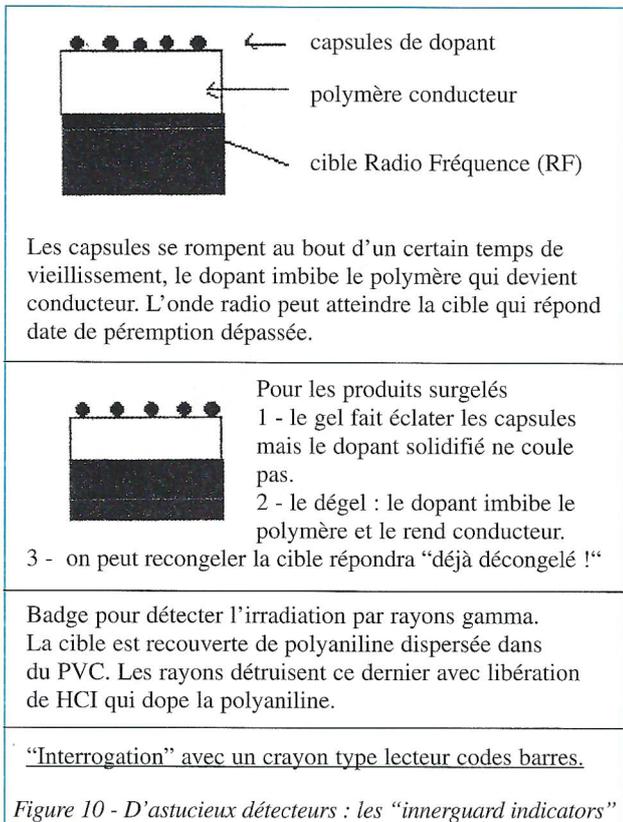
Nous avons effleuré une perspective avec le dopage de PPy par l'héparine. Ce peut être un moyen de masquer des implants pour éviter la formation de caillots ou les phénomènes de rejet.

#### e) piles et batteries

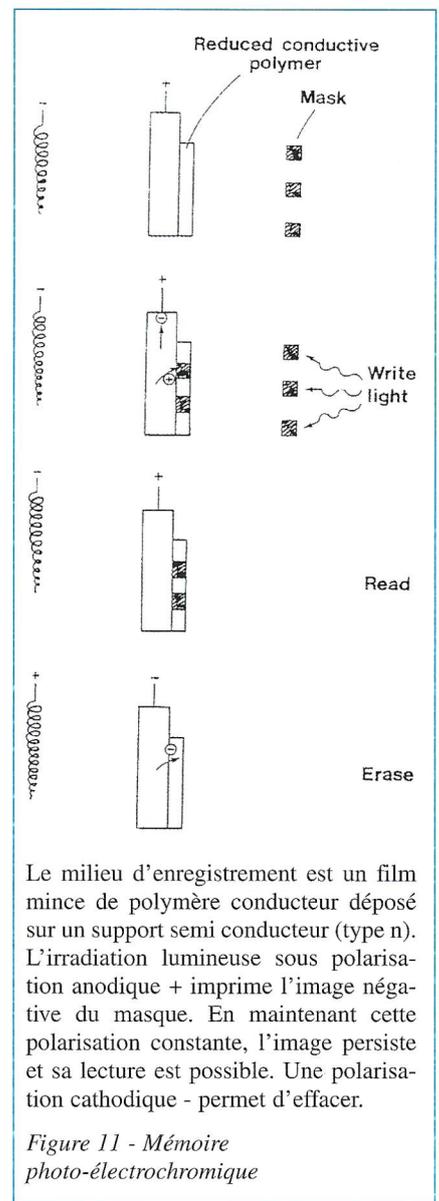
La figure 8 propose une réalisation de batterie polymérique rechargeable. Une électrode est en polymère électro-actif et l'autre en alliage Li-Al. L'électrolyte est du LiClO<sub>4</sub>. Lors de la charge le polymère, fonctionnant en anode, se fait doper par les anions perchlorate qui disparaissent du bain. En même temps il y a transport du lithium vers la cathode qui s'épaissit. La décharge correspond au contraire au dédopage du polymère et à la redissolution du Li déposé sur l'autre électrode.

#### f) capteurs et détecteurs

Dans de nombreux domaines il peut être vital d'identifier la présence d'un élément. Pour ce faire on utilise un *détecteur*. Bien souvent, cette simple reconnaissance ne suffit pas. Il faut aussi mesurer et contrôler la concentration de l'élément détecté. C'est le travail d'un *capteur*. Du fait de leur grande sensibilité à l'oxydoréduction, les électro-actifs offrent d'intéressantes possibilités d'applications comme capteurs de gaz : repérage de toxiques ou de polluants, fuites de gaz domestiques, dosage des oxydes d'azote produits par un moteur à explosion et réglage en retour de la carburation de ce moteur, ... Il suffit de placer le polymère dans l'atmosphère à contrôler et, par un montage approprié, d'observer la variation de conductivité qui résulte de la présence du gaz oxydant ou réducteur cherché (figure 9). Des dispositifs plus évolués mais travaillant toujours par variation de conductivité sont à l'étude pour détecter des molécules d'intérêt biologique par interaction avec les substituants d'électro-actifs fonctionnalisés. Ce sont les *biocapteurs*.



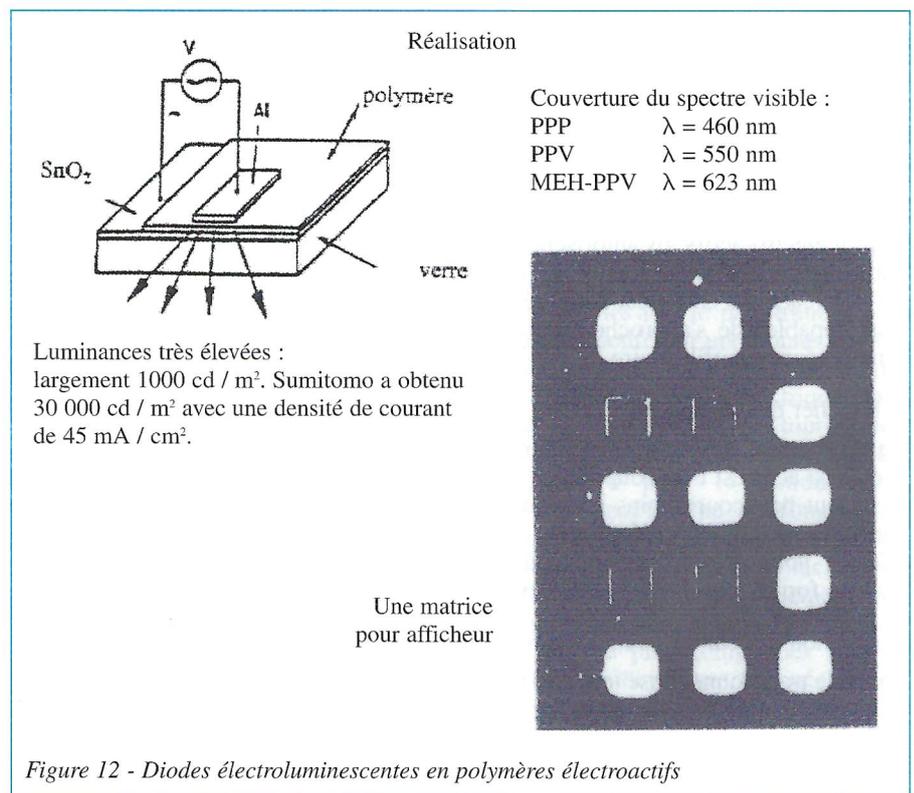
appliquée au polymère le fait commuter d'un état réduit à un état oxydé de couleur franchement différente, donc visible par contraste avec un fond servant de support. Le fonctionnement d'une mémoire est un peu plus subtil (figure 11). Le polymère électroactif est déposé en film mince sur un semi-conducteur. L'ensemble forme une première électrode. Le dispositif complet en possède une seconde et contient un électrolyte inerte. On peut polariser avec l'un ou l'autre signe. Le polymère, polarisé de façon à être réduit, est éclairé par une lumière à laquelle sa couleur le rend transparent. L'irradiation se fait au travers d'un masque. Les photons arrachent



Fonctionnant au moins sur le papier, de petits détecteurs très bon marché utilisent un autre principe (figure 10). Selon que le polymère est quasi isolant ou quasi métal, il masque ou démasque une cible susceptible d'émettre un signal quand elle reçoit une onde radio. Et on pourrait même faire l'économie de la cible : si le polymère est en couche épaisse, il réfléchit l'onde à l'état conducteur et l'absorbe à l'état isolant. De la sorte il donne ou ne donne pas un écho en réponse à une interrogation destinée à effectuer un contrôle. L'avenir nous dira si ces astucieux petits systèmes demeureront des gadgets bons à peupler des rêves de chercheurs ou s'ils trouveront quelque emploi dans la vie courante comme détecteurs d'humidité, d'échauffement, d'exposition aux radiations.... Tout phénomène capable de faire passer le polymère à l'état conducteur peut être décelé. Un dopant fusible à point de fusion déterminé montrera le franchissement d'une limite de température, un dopant enfermé dans des capsules se brisant sous l'effort révélera une limite de contrainte mécanique, un dopant mélangé à un sel hygroscopique fera un bon détecteur d'humidité.... Avec ce que montre la figure 10, cela donne à ces mini-détecteurs d'innombrables possibilités !

des charges au semi-conducteur et celles-ci oxydent le polymère. Changeant vigoureusement de couleur, il perd sa transparence et on a gravé l'image négative du masque. Cette image reste fixée jusqu'au moment où on décide de l'effacer en renversant la polarité de la tension appliquée. En somme dans l'afficheur on réduit ou on oxyde par tout ou rien alors que dans la mémoire on a trouvé une astuce pour graver sélectivement une certaine région du polymère.

g) électrochromie, photo-électrochromie  
L'application la plus immédiate du changement de couleur par oxydoréduction est la réalisation d'afficheurs. On peut aussi utiliser l'effet électrochrome pour faire fonctionner des mémoires. Dans l'afficheur, la tension



#### h) électroluminescence

En 1989, le laboratoire Cavendish, à Cambridge, a fait fonctionner les premières diodes électroluminescentes utilisant pour matériau actif des polymères conducteurs de très grande pureté. Le fait d'injecter un courant dans la jonction, dont on voit la constitution figure 12, revient à injecter dans le polymère des électrons excités qui se désexcitent selon un processus radiatif. En jouant sur la structure chimique du polymère on couvre une bonne partie du spectre visible. Le principal intérêt des électro-actifs pour ce type de composants est la possibilité d'atteindre des luminances très élevées, très recherchées dans le domaine des afficheurs de toutes petites dimensions. Aux USA on peut aussi acheter des diodes électroluminescentes *souples* formées d'un film mince de polyaniline sur support de matière plastique.

#### i) structures à effet de champ

L'effet de champ est très largement utilisé dans le domaine de la microélectronique. Il est en particulier à la base des transistors à effet de champ (les TEC en français ou FET en anglais) et des circuits intégrés MOS. Un TEC est essentiellement un composant à trois électrodes permettant d'établir à volonté une conduction plus ou moins grande entre une source émettrice de charges et un drain chargé de les collecter. La modulation de conduction se fait par action sur une grille qui injecte des charges dans un canal ou lui en retire. Cette grille peut parfaitement être constituée par un polymère électro-actif baignant dans un électrolyte.

#### j) composants pour l'optique non linéaire (ONL)

Les phénomènes optiques classiques, réflexion, réfraction, absorption et diffusion correspondent à des effets linéaires. La matière répond de façon proportionnelle à l'excitation que lui fait subir la lumière, ce qui a pour conséquence de ne pas modifier la fréquence de l'onde lumineuse. Depuis l'avènement des sources très puissantes que sont les lasers, on a observé des effets optiques non linéaires.

Leur origine se trouve dans l'aspect microscopique de la propagation de la lumière dans un milieu matériel. Le champ électrique  $E$  de l'onde lumineuse modifie la distribution des charges électriques, ce qui conduit à une polarisation du matériau irradié. Celle-ci peut s'écrire sous la forme d'un développement en série des puissances de  $E$ . En optique classique, seule la contribution du premier terme est décelable mais avec des sources très intenses on observe les effets de termes d'ordre supérieur.  $E$  étant une grandeur vibratoire, les effets de ses puissances sont les mêmes que ceux des harmoniques de la fréquence de l'onde incidente.

A cause de la présence d'un nuage d'électrons  $\pi$  plus ou moins unidimensionnel, les électro-actifs ont la propriété de produire une génération intense de l'harmonique trois, ce qui pourrait leur valoir une place particulière parmi les matériaux pour l'ONL. Et place à part ou non, il y a aussi un défi à relever: celui d'enregistrer encore plus d'information sur les CD. La largeur minimale d'une piste étant en  $\lambda^2$  on la divise par 4 en doublant la fréquence du faisceau de lecture. Un ONL polymérique permettrait le doublement de fréquence par un simple film autour de la diode laser de lecture.

#### 3) Composites, mélanges et laminés

En dépit des efforts les propriétés mécaniques et la tractabilité des polymères électro-actifs laissent encore à désirer si on les compare aux polymères ordinaires. Pour améliorer les choses il n'y a guère d'autre solution que de les mélanger à des polymères usuels. La polymérisation électro-oxdative, en effet, ne permet pas d'espérer une co-polymérisation.

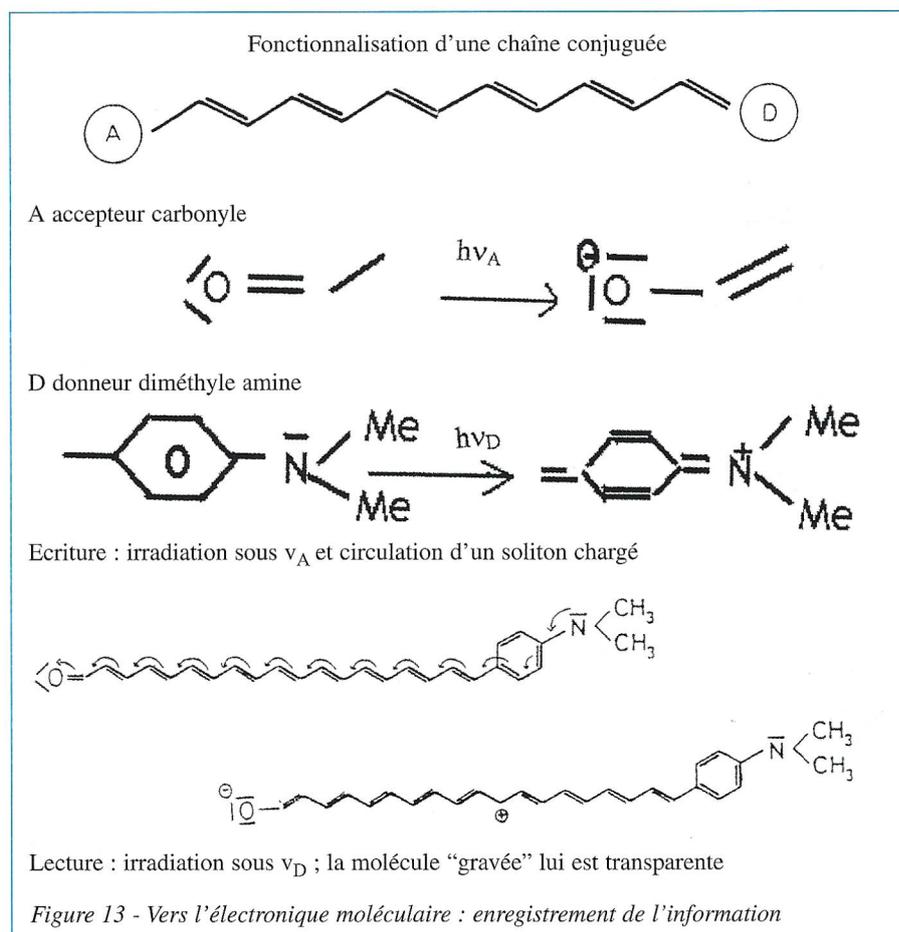
Ces techniques de mélange atteignent une efficacité certaine. On peut par exemple tresser un film de PVC ou d'acétate de polyvinyle autour de l'électrode destinée à recevoir un dépôt de PPy. On obtient alors une *composite*. On peut aussi remplacer l'oxydation électrolytique par une oxydation chimique. Pour cela on imbibe de pyrrole ou d'aniline un film de polyester et on

expose à un oxydant gazeux. On peut tout aussi bien imprégner d'un oxydant liquide et exposer aux vapeurs du monomère. Il est également possible d'obtenir la croissance de polymères électro-actifs dans des alvéoles de polymères classiques de remplissage ou même dans des particules de latex. Un bel avenir semble promis à ces composites.

En exposant un papier imbibé de  $FeCl_3$  à des vapeurs de pyrrole on provoque à la fois la polymérisation et le dopage oxydant de ce dernier. On obtient alors un papier conducteur qu'il est très facile de conserver en le déshydratant Le PPy donne aussi avec l'oxyde de polyéthylène PEO un très bon matériau pour électrodes de batteries. La pile est alors le système  $Li / PEO + LiClO_4 / PEO + PPy$ . Le composite PEO-PPy s'obtient au départ de cellulose qui a le grand avantage d'être soluble dans l'eau.

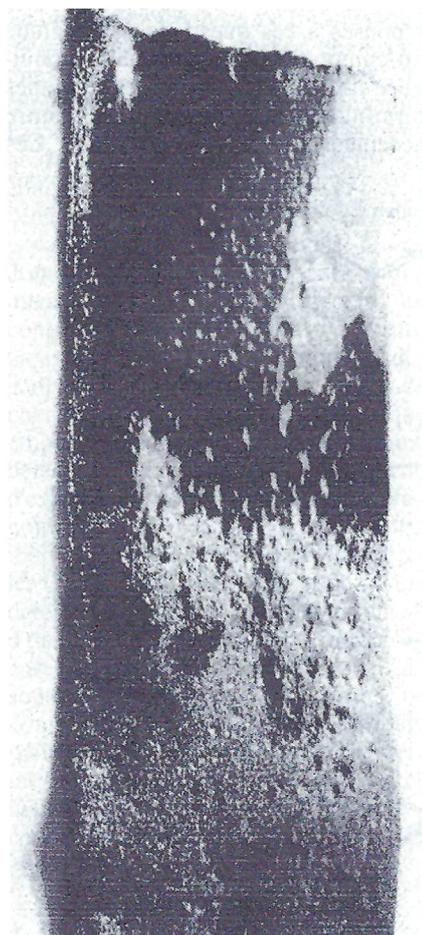
#### 4) L' électronique moléculaire

Pour terminer, pourquoi ne pas rêver un peu ? Si la course à la miniaturisation des composants électroniques se poursuit au rythme effréné qui est le sien, les composants auront d'ici peu la taille des molécules. Comment pourront-ils fonctionner, comment se feront les connexions ? On peut trouver des réponses à ces questions dans l'étude du comportement d'une chaîne conjuguée fonctionnalisée par deux groupes terminaux, l'un donneur et l'autre accepteur d'électrons (figure 13). Ces

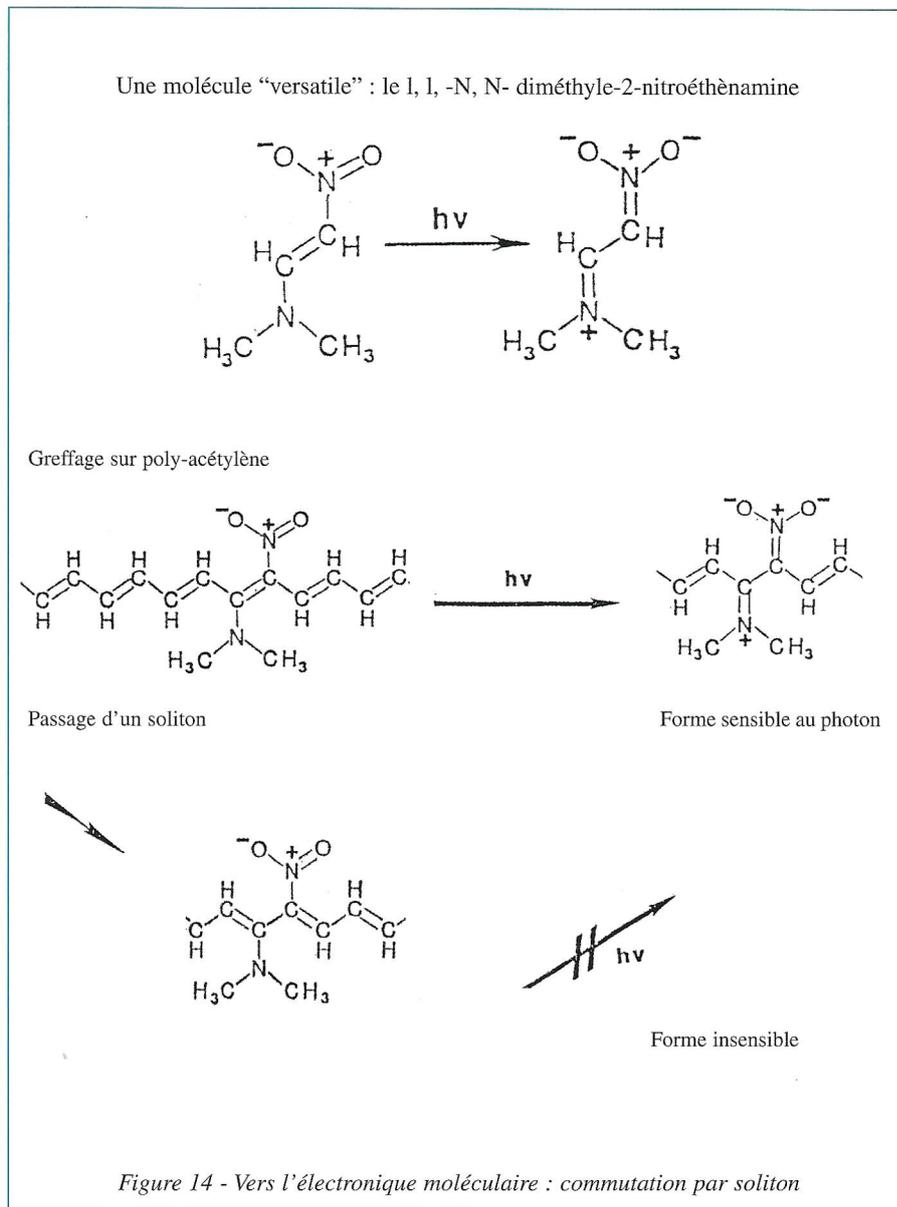


deux groupes existent sous deux formes: une neutre D ou A et une ionisée D<sup>+</sup> ou A<sup>+</sup>. En absorbant un photon de fréquence caractéristique  $\nu_D$  ou  $\nu_A$  la forme neutre reçoit l'énergie nécessaire à son ionisation. La forme ionisée n'est plus sensible au photon excitateur et elle lui devient transparente.

Considérons alors une molécule ayant pour partie centrale une chaîne conjuguée assez longue et terminée à une extrémité par un groupe accepteur carbonyle et à l'autre par un groupe donneur diméthylamine. L'irradiation par un photon de fréquence  $\nu_A$ , en mettant la tête A sous forme A<sup>+</sup> pousse une charge positive le long de la chaîne conjuguée en faisant basculer les doubles liaisons comme un château de cartes. On est en train d'écrire une information. La charge plus migrante, qui mérite de s'appeler soliton chargé finit par atteindre la terminaison D et provoque sa mise à l'état D<sup>+</sup>. Du coup la molécule devient transparente à  $\nu_D$ . En éclairant sous cette fréquence, on lit le message.



Film de polyaniline obtenu par synthèse électrochimique. La partie basse est conductrice. La partie haute, lavée à l'ammoniaque, est isolante.



Considérons pour finir (figure 14) la molécule " versatile " suivante. Il s'agit d'une amine nitrée à liaison éthylénique. Sous excitation lumineuse, ce composé peut changer de structure par transfert électronique interne. Greffons cette molécule sur une chaîne de poly-acétylène. Le polymère devient sensible au photon induisant le réarrangement du bloc nitroamine. Mais si un soliton parcourt la chaîne et fait basculer les doubles liaisons, il rompt la conjugaison du greffon et ferme la route au transfert électronique. Du coup la chaîne polymérique devient insensible au photon inducteur de ce transfert. Avec le passage du soliton on a donc le moyen de faire commuter la chaîne d'un état à son contraire logique. La construction des booléens macromoléculaires est envisageable ! Tout cela est du rêve, n'est-ce pas ? Pas si sûr ! Avec onze doubles liaisons la chaîne conjuguée qui m'a servi de premier exemple est celle du  $\beta$ -carotène le pigment des carottes. Et si nous avons du mal à y accrocher à un bout un accepteur et à l'autre un donneur, des

bactéries fort sympathiques pourraient faire le travail à notre place. La biochimie, puisque j'ose m'aventurer dans cette discipline, s'intéresse de très près à l'élaboration de fils capables d'assurer le passage des électrons à l'échelle moléculaire. Au début des années 1990, on a pu synthétiser des molécules composées d'un tronçon poly-énique conjugué reliant une tête et une queue capables d'exister sous deux régimes redox. Ce sont les caroviologènes. Ensuite on a inséré ces molécules dans la membrane qui limite certaines cavités naturelles, les vésicules phospho-lipidiques. Et en mettant un réducteur dans la cavité et un oxydant dehors le transport d'électrons a été mis en évidence. Le fil moléculaire existe ! Physique fondamentale, dynamique moléculaire, électronique, chimie voire biochimie, le monde passionnant des polymères conducteurs embrasse vraiment un ensemble de disciplines scientifiques qui fait de ces matériaux des sujets de choix, tant pour la recherche fondamentale que pour des applications technologiques nouvelles.

# La couleur du lait

Michel HENRY

Université PIERRE ET MARIE CURIE  
PARIS



## INTRODUCTION

D'une longue lignée d'ancêtres hantant les forêts équatoriales, l'homme a reçu, entre autres legs, un sens particulièrement développé de la vision et surtout la faculté de distinguer les couleurs, privilège que seules quelques autres espèces partagent avec lui. Il s'agit là d'une sensation très fine, l'œil étant capable de discerner une énorme variété de nuances, de l'ordre de 10 millions, selon Judd et Wyszecki, ce dont témoigne la richesse du vocabulaire consacré à la couleur dans nos sociétés. Selon le Professeur GUIART, du Musée de l'Homme, les peuplades "primitives" n'ont pas toujours des vocables spécifiques pour désigner les couleurs : le même mot désigne le charbon et le noir, la mer et le bleu... Le cas extrême est celui où il n'existe que deux termes, correspondant à "clair" et "sombre". Viennent ensuite, et dans cet ordre, le rouge, puis le vert ou le jaune, puis le bleu et le marron. Il existe d'ailleurs chez nous des survivances, ainsi lilas ou orange; il est curieux de noter, pour ce dernier exemple, qu'orange (nom de couleur) apparaît dans la langue française au XVIII<sup>e</sup> siècle, bien après que les Européens eurent découvert le fruit au Moyen Orient, lors des Croisades. Dans les chroniques antérieures, et aussi dans le langage héraldique, la couleur est appelée "aurore"

Tenter de répondre à la question "pourquoi voyons-nous les couleurs ?" dépasserait très largement nos compétences. Chercher "comment voyons-nous les couleurs ?" nous contraint également à beaucoup d'humilité, tant sont mêlés les aspects physique, physiologique et psychologique. En fait, nos ambitions sont ici beaucoup plus modestes : nous allons tenter de discerner ce qui fait naître la sensation de couleur, et tenter de fournir les premiers éléments de réponse à la question : "Pourquoi le lait est-il blanc ?"



## LA SENSATION DE COULEUR

A première vue - si j'ose dire - la couleur apparaît comme une propriété particulière des objets, ou de la lumière, selon le cas. Ainsi, nous savons parfaitement faire la différence entre deux objets, disons deux foulards pour fixer les idées, parfaitement identiques à tous points de vue: taille, texture, tissu... sauf un, que nous appelons précisément la couleur. Pareillement, tout un chacun sait reconnaître dans la rue un feu rouge d'un feu vert.

Il est facile de s'assurer et nous n'insistons pas sur ce point que la propriété "couleur" est exclusivement liée au sens de la vision quoi que puissent prétendre certains adeptes de la parapsychologie: les yeux fermés, vous pouvez peut-être acheter, mais certainement pas faire la différence entre une cravate bleue et une cravate rouge. De là à attribuer l'origine de la couleur à la lumière, il n'y a qu'un pas, que nous franchirons certes, mais sur la pointe des pieds. Il n'y a rien, en effet, dans la lumière, à quoi nous puissions accrocher une étiquette du genre "vert" ou "orange".

La couleur est bien provoquée par la lumière que captent nos yeux, mais elle naît - et ne naît que - dans notre cerveau, au niveau de l'hypothalamus, pour être plus précis, s'il faut en croire des travaux récents. En conséquence, parler comme tout le monde de lumière rouge ou bleue est à proprement parler un abus de langage. Des expressions telles que "cette lumière constitue un stimulus érythroène (éritros, rouge) ou cérulogène (xerulos, bleu)" seraient mieux apprivoisées...

Foin de pédantisme. Il est tout aussi efficace d'utiliser les expressions habituelles, d'autant plus qu'attribuer une couleur aux objets se révèle en fait très utile dans la vie quotidienne. Dans le même ordre d'idées, il est très difficile de convaincre quiconque a observé un

laser He-Ne que la lumière émise n'est pas rouge.

Soit. Mais alors qu'est-ce qui, dans la lumière, fait naître la sensation de couleur ?

Depuis les célèbres expériences de Newton, nous connaissons une partie de la réponse à cette question : la sensation de couleur est intimement liée à la composition spectrale de la lumière, c'est à dire à la manière dont l'énergie est répartie entre les diverses radiations monochromatiques qui la constituent.

## Couleurs spectrales

Nous représentons la lumière comme une onde, comme une ride à la surface de l'eau. Mis en présence d'une lumière quelconque, nous savons la "démonter", la décomposer - un peu comme un mélomane averti isole à l'oreille les instruments de l'orchestre - en éléments que nous jugeons plus simples. Nous les nommons ondes monochromatiques et les caractérisons par leur longueur d'onde : de l'ordre de cinquante millionsièmes de millimètre (500 nm) pour celles auxquelles est sensible l'œil. Nous savons aussi produire directement de telles ondes, par exemple à l'aide d'un laser : ainsi, la lumière émise par le laser hélium-néon dont nous parlions tout à l'heure a pour longueur d'onde 633 nm.

Le point important est que chaque onde monochromatique produit une sensation colorée particulière, du violet pour les plus courtes longueurs d'onde (400 nm) au rouge pour les plus grandes (800 nm) en passant par toutes les nuances de l'arc-en-ciel.

Qui plus est cette sensation est directement liée à la longueur d'onde: si nous savons qu'une radiation est monochromatique et si nous voyons qu'elle est jaune, alors nous savons qu'elle est associée à une longueur d'onde de l'ordre de 550 nm.

## Couleurs polychromatiques

Mélangeons plusieurs ondes monochromatiques. Il en résulte une nouvelle sensation colorée, dont la nuance dépend des constituants du mélange et de leur proportion relative : l'association du bleu et du rouge donne toute la gamme des pourpres, du magenta au carmin. Quand les constituants sont en proportions convenables - grosso modo de même importance - et recouvrant une très large gamme de longueurs d'onde, la sensation produite est le blanc.

Voilà une des clefs de notre mystère. La lumière du Soleil ou de l'éclairage artificiel, est modifiée lors de sa rencontre avec les objets, et c'est la lumière ainsi altérée qui provoque une sensation de couleur.

Nous disons bien une partie de la réponse. En effet, si nous savons prévoir la sensation produite par une répartition spectrale connue, c'est ainsi que nous "mesurons" la couleur, nous ne pouvons pas, sauf exception, effectuer l'opération inverse, c'est à dire déterminer la composition spectrale à partir de la sensation produite, pour la bonne raison que plusieurs répartitions peuvent produire la même sensation.

### Le blanc

Nous devons faire une place à part au blanc. La lumière du Soleil ou des lampes à incandescence, contient à peu près toutes les radiations visibles, et en proportions sensiblement équivalentes. C'est elle que nous nommons lumière blanche.

Il est possible d'obtenir une sensation équivalente par divers mélanges, mais, dans tous les cas, la lumière doit contenir un échantillonnage assez complet de radiations visibles. Une conséquence, assez paradoxale, de cet état de choses est qu'il n'existe pas de colorant blanc. Tous les objets blancs (peintures, craie, papiers, cheveux...) sont blancs parce qu'ils diffusent la lumière blanche, émise par la plupart des sources lumineuses usuelles.

## L'ORIGINE DES COULEURS

La couleur des corps, avons nous dit, résulte d'une modification de la composition de la lumière réémise par rapport à celle de la lumière incidente. Que ce soit par transmission ou par réflexion, le corps favorise certaines radiations au détriment des autres.

Nous allons examiner à présent les principaux mécanismes jouant ce rôle.

Nous excluons toutefois les corps qui réémettent de la lumière, comme les substances fluorescentes.

### Absorption

Le mécanisme le plus courant est probablement l'absorption. Certaines molécules ont la propriété de prélever dans la lumière qu'elles reçoivent des radiations assez bien définies pour en utiliser l'énergie à des fins diverses : changement de structure, échauffement... Ces radiations ne sont bien entendu plus disponibles, et font défaut à la lumière réémise.

Citons, juste pour illustrer ce point, quelques exemples.

L'hémoglobine absorbe fortement les radiations de courte longueur d'onde, le bleu et le vert. Ne restent disponibles que les radiations rouges, d'où la couleur du sang.

La chlorophylle a une structure chimique très voisine de celle de l'hémoglobine. Le remplacement d'un atome de fer par un atome de magnésium modifie l'absorption et celle-ci glisse vers le rouge. La chlorophylle est verte.

Bien que sa structure soit très différente, le carotène, (ou plutôt les carotènes, car il en existe une grande variété) absorbe fortement les radiations bleues et un peu moins les vertes, aussi est-il orangé ou rouge. Nous retrouverons le carotène parmi les composants du lait et précisons son influence à ce moment là.

Les molécules colorées sont pour l'essentiel des molécules où existent des groupements à liaisons multiples, dits groupements chromophores, permettant une délocalisation des électrons de liaison et une diminution de leur énergie d'excitation. Dans les molécules les plus simples, comme le naphthalène ou le benzène, cette énergie est assez forte, si bien que seules les radiations ultraviolettes peuvent être absorbées. L'augmentation du nombre des liaisons multiples diminue cette énergie d'excitation et autorise l'absorption de radiations visibles.

### Diffusion

L'absorption est un mécanisme "chimique", en ce sens qu'il fait directement appel aux liaisons intramoléculaires. Parallèlement, existent divers processus "physiques", ainsi nommés parce qu'ils ne font pas intervenir la structure propre de la molécule. Ils sont regroupés sous le nom générique de diffusion.

Nous pouvons les décrire comme l'absorption de la totalité du rayonnement par l'atome ou la molécule, puis sa réémission, toujours en totalité, dans diverses directions de l'espace. C'est là, en fait, la différence essentielle entre les deux mécanismes: la chlorophylle ou le carotène sont colorés parce qu'ils soustraient des radiations à la lumière incidente, tandis qu'une tache d'huile sur le goudron nous paraît irisée parce qu'elle redistribue ces mêmes radiations dans l'espace. Celles qui ne pénètrent pas dans notre œil existent toujours, mais de l'autre côté de la pellicule d'huile.

## EXPERIENCE

*L'effet est aisé à observer grâce à une lame de détergent ménager (liquide à vaisselle) tendue sur un petit cercle de fil rigide. Une région bleue par réflexion apparaît jaune par transmission.*

Deux points sont importants pour définir la lumière diffusée: sa répartition spatiale, et sa répartition spectrale. Leur étude est assez complexe, aussi divers modèles ont-ils été établis, dont nous ne retenons que les deux principaux.

### Diffusion de Rayleigh

Les particules sensibles à l'action de la lumière sont en fait les électrons gravitant autour des noyaux. Ceux-ci, beaucoup plus massifs, ne sont pratiquement pas affectés.

Quand les atomes, ou groupes d'atomes (molécules, particules) sont répartis dans un volume de dimensions petites devant la longueur d'onde de la lumière, les électrons sont soumis à la même excitation, et réémettent en phase. La particule se comporte comme un électron isolé, sauf en ce qui concerne l'intensité lumineuse, beaucoup plus intense en raison du plus grand nombre d'électrons.

Ce modèle simple est dit de Rayleigh. Il est caractérisé par une répartition spatiale sensiblement isotrope et par une répartition spectrale à forte dominante bleue.

Les radiations de courte longueur d'onde sont aussi celles de haute fréquence. Les électrons soumis à ces radiations acquièrent un mouvement plus rapide que ceux soumis aux radiations de

grande longueur d'onde. Il en résulte qu'ils diffusent davantage de lumière. La mise en équations conduit à la relation caractéristique de la diffusion de Rayleigh: l'intensité lumineuse diffusée varie comme la quatrième puissance de la fréquence. Les radiations bleues, dont la fréquence est double de celle des radiations rouges sont seize ( $2^4$ ) fois plus diffusées.

A contrario, la lumière directement transmise comporte un défaut de radiations bleues, et paraît orangée ou rouge. Ce sont là des phénomènes d'observation courante, ainsi le bleu du ciel, accompagné des ors du soleil couchant.

### Diffusion de Mie

Quand la taille de la particule devient comparable à, ou plus grande que, la longueur d'onde, les électrons ne sont plus soumis à la même excitation et leurs réponses sont différentes. Le modèle simple de Rayleigh ne permet plus de rendre compte des phénomènes observés, et doit être remplacé par une théorie plus complexe, celle de Mie.

Encore de nos jours, malgré les efforts des chercheurs, cette théorie ne donne que les grandes lignes, certains détails restant à préciser.

Le point important, pour nous, est que les particules de "grande" taille, au-delà de quelques micromètres, soit une dizaine de fois la longueur d'onde de la lumière, diffusent une lumière de répartition spatiale assez homogène, et aussi de répartition spectrale "plate", variant très peu avec la longueur d'onde. En d'autres termes, ces particules diffusent une lumière de même couleur que la lumière incidente, blanche si la lumière incidente est blanche.

Par ailleurs, les grosses particules contiennent beaucoup plus d'électrons que les petites, aussi diffusent-elles beaucoup plus de lumière. Si leur concentration est suffisante, elles peuvent redistribuer la quasi-totalité de la lumière incidente, et le corps paraît opaque.

Il est noter que la théorie de Mie admet pour cas limites, lorsque la taille des particules est suffisante, les phénomènes de réfraction et de réflexion.

Ainsi, les nuages, le brouillard, sont formés de gouttelettes d'eau transparentes, de diamètres variant de 10  $\mu\text{m}$  (pour le brouillard) à 300  $\mu\text{m}$  (pour les nuages). Tous deux paraissent blancs.

Sur l'exemple du brouillard, nous pouvons estimer l'opacité d'un milieu diffusant. Ce calcul est assez rudimentaire mais nous ne cherchons que des ordres de grandeur.

Soit V le volume d'eau par mètre cube d'air, l'eau étant rassemblée en gouttelettes de diamètre d. Le volume des gouttes est de l'ordre de  $d^3$  et leur surface de l'ordre de  $d^2$ . La surface occultée par les gouttes est à peu près  $V/d$ , c'est à dire le nombre de gouttes par unité de volume,  $V/d^3$ , multiplié par la surface  $d^2$  d'une goutte.

Le paramètre V est d'environ  $5 \text{ cm}^3$  par  $\text{m}^3$ , soit  $5 \cdot 10^{-6}$ , ce qui donne un rapport  $V/d$  de l'ordre de  $0,5 \text{ m}^{-1}$ .

Nous pouvons estimer la visibilité par la distance l telle que  $Vl/d = 1$ , auquel cas toute la surface est occultée par les gouttes. Nous trouvons sans peine  $l = 2 \text{ m}$ . Il s'agit d'une véritable "purée de pois", si vous nous permettez l'expression.

### Diffusion par une émulsion

Si les particules diffusantes sont en suspension dans un milieu plus dense que l'air, l'eau par exemple, les phénomènes observés sont très voisins. La théorie de Mie ne fait aucune différence entre les deux cas, l'important étant que les particules en suspension aient un indice de réfraction différent de celui de la phase homogène, faute de quoi le milieu est optiquement homogène, et la diffusion disparaît.

Un point intéressant est à signaler. Qu'en est-il si les particules sont colorées, c'est à dire absorbent sélectivement les radiations lumineuses ?

Bien entendu, la lumière diffusée est aussi colorée (c'est le principe de la peinture). Toutefois, la couleur est d'autant moins saturée que la taille des particules est plus petite.

### EXPERIENCE

*L'effet est commodément observable avec du sulfate de cuivre.*

*Les gros cristaux sont bleus.*

*Broyés en poudre très fine ils paraissent blancs.*

Ce phénomène est bien connu des peintres depuis la nuit des temps. Les peintures sont des suspensions de granules pigmentés dans un liant incolore : blanc d'œuf, huile, eau (aquarelle ou peinture acrylique), gomme arabique (gouache), pour ne citer que les principaux. Les broyats grossiers donnent des couleurs saturées, mais des peintures

couvrant mal, à l'inverse des broyats fins, qui donnent des peintures couvrant bien, mais des couleurs peu saturées. De là l'importance du broyage, qui était souvent l'apanage du maître, les assistants étant tenus à l'écart d'une opération aussi fondamentale.

La clef de l'énigme réside effectivement dans la taille des grains. A chaque interface entre un grain et le liant, la lumière est pour partie diffusée et pour partie transmise. Seule la lumière transmise, qui traverse le grain, voit sa composition spectrale modifiée par absorption.

Les grains assez gros sont peu nombreux, il y a donc beaucoup de lumière transmise et peu de lumière diffusée, la composition spectrale est fortement modifiée.

Les petits grains sont plus nombreux, ce qui accroît l'importance de la lumière diffusée et diminue celle de la lumière transmise. La composition spectrale est peu modifiée, et d'autant moins que les premiers grains rencontrés font plus barrage à la lumière.

Nous venons de décrire rapidement les principaux effets donnant naissance à la couleur des corps. Nous pouvons les appliquer au lait, mais il nous faut tout d'abord en connaître la composition. Fort heureusement pour nous, c'est un aliment de première importance, tant directement que par ses produits dérivés, et les études à ce sujet sont légion...

## LA COMPOSITION DU LAIT

Le lait est un liquide, comme chacun sait, de composition éminemment variable en fonction de l'espèce animale, de la nourriture, de l'époque de l'année... Toutefois, cette variabilité concerne davantage les proportions relatives des principaux constituants que leur nature.

A la base, le lait est de l'eau (90 % environ) contenant des substances dissoutes et des substances en suspension. Le tableau suivant donne, d'après Mathieu, les principales et leurs dimensions moyennes.

Particules	Taille moyenne	Etat
Ions (Na+, Cl-)	0,3 nm	Solution
Molécules (lactose, urée...)	0,5 nm	Solution
Agrégats de protéines	5 nm	Solution
Micelles (caséine)	150 nm	Colloïde
Cellules (bactéries, leucocytes)	1 $\mu\text{m}$	Suspension
Globules gras	10 $\mu\text{m}$	Emulsion

Nous avons souligné les micelles de caséine et les globules gras, dont nous verrons qu'ils sont, pour l'essentiel, responsables de la couleur du lait. Il convient d'ajouter deux colorants :

Le carotène, dissous dans les globules gras, qui donne sa couleur jaune au beurre.

La riboflavine (ou lactoflavine), en solution dans l'eau, qui donne une couleur jaune verdâtre à la solution obtenue en éliminant du lait tous les composants non solubles, c'est à dire les micelles, les cellules diverses et les globules gras.



## LA COULEUR DU LAIT

### L'opacité du lait

Les concentrations des micelles, et surtout des globules gras sont telles que toute la lumière est diffusée, et une fraction négligeable transmise. Sauf sous très faible épaisseur, de l'ordre d'une fraction de millimètre, le lait est opaque.

Reprenons le modèle rudimentaire défini pour le brouillard (cf. supra). La concentration en globules gras est de l'ordre de 30 g.l<sup>-1</sup>, soit un paramètre  $V$  voisin de 0,03. Pour un diamètre  $d$  de l'ordre de grandeur de 10  $\mu$ m, nous trouvons une limite de visibilité de 0,3 mm, ce qui correspond à peu près aux résultats expérimentaux.

### EXPERIENCE

*Vous pouvez observer cet effet avec une lame de verre ou de plastique transparent et une cuve aussi transparente posée sur un journal. La plaque vous permet de faire varier l'épaisseur du lait dans la cuve, le texte imprimé de déterminer la limite de transparence.*

### La diffusion de Rayleigh

La taille des micelles est très inférieure à la longueur d'onde des radiations visibles (elles vont, rappelons-le, de 400 nm à 800 nm), si bien qu'ils diffusent selon le mode de Rayleigh où l'intensité de la lumière diffusée varie comme l'inverse de la quatrième puissance de la longueur d'onde.

### EXPERIENCE

*Cet effet est aisément observable, à l'aide d'une cuve et d'une lampe de poche ou d'un projecteur de diapositives, dans le lait écrémé, d'où ont disparu les globules gras, et dans une solution diluée de lait, pour la même raison.*

### La diffusion de Mie

Les globules gras, à l'inverse, ont des dimensions très supérieures aux longueurs d'onde de la lumière visible. La théorie de Rayleigh n'est plus utilisable dans ce cas, et doit être remplacée par la théorie de Mie. Celle ci montre que, pour des particules de taille comparable à celle des globules gras, la diffusion est très sensiblement indépendante de la longueur d'onde. La lumière diffusée a, dans ces conditions, la même composition spectrale que la lumière incidente. Eclairé en lumière blanche, le lait paraît blanc, mais prend en fait la couleur de la lumière qui l'éclaire.

### EXPERIENCE

*Là encore, ce phénomène est facile à mettre en évidence, à l'aide d'un prisme ou, plus simplement, de filtres colorés.*

### Les colorants

Nous avons noté ci-dessus la présence de deux colorants, le carotène et la riboflavine.

Le premier est contenu dans les globules gras, en assez faible concentration, aussi ne participe-t-il pas à la couleur du lait, pour les raisons exposées plus haut. De fait, il ne manifeste sa présence que si les globules gras sont assez concentrés et si l'eau d'interposition a disparu, c'est à dire dans le beurre. La crème est une solution encore trop diluée pour avoir une autre couleur que le blanc.

La riboflavine est en solution dans l'eau et n'a pas plus d'effet que le carotène, puisque la quasi-totalité de la lumière est diffusée en surface. Elle n'apparaît que si le lait est débarrassé

des globules gras par écrémage et des micelles par coagulation.

### EXPERIENCE

*Le liquide qui exsude des fromages frais "à 0%" répond à ces conditions, et il est très légèrement jaunâtre.*

### Le blanc du lait

La combinaison des deux effets donne au lait sa couleur particulière, un blanc "éclatant". De fait, c'est là une observation classique en colorimétrie. Des observateurs à qui l'on demande de comparer visuellement divers blancs préfèrent invariablement une couleur contenant un peu plus de bleu que le mélange équi-énergétique des normes internationales. Rappelons que cet effet est mis à profit depuis fort longtemps par les lavandières, azurant au bleu de méthylène leur dernière eau de rinçage et, plus récemment, par les fabricants de produits lessiviels.

## POUR EN SAVOIR PLUS

P. CALLET *Couleur lumière – Couleur matière* Diderot Paris 1998

G. CHARTIER *Manuel d'Optique* Hermès Paris 1997

M. HENRY *Les réseaux colorés* La Recherche janvier 1981 p.24

M. HENRY *Les couleurs de l'invisible* Auvergne Sciences n°11 p.3 (1989)

J. MATHIEU *Initiation à la physico-chimie du lait* Tec et Doc Paris (1998)

H.C. Van de HULST *Light scattering by small particles* Dover New York (1981)

## Visite au conservatoire du pneu



*Cette intéressante visite organisée par l'ADASTA, se déroula le mercredi 17 mai 2000, et fut suivie par deux petits groupes, l'un pendant la matinée, le second l'après-midi. Nos adhérents se sont donc retrouvés rue Montlosier à Clermont-Ferrand, dans les spacieux locaux appartenant à la Manufacture Michelin et abritant le Conservatoire du Pneu.*

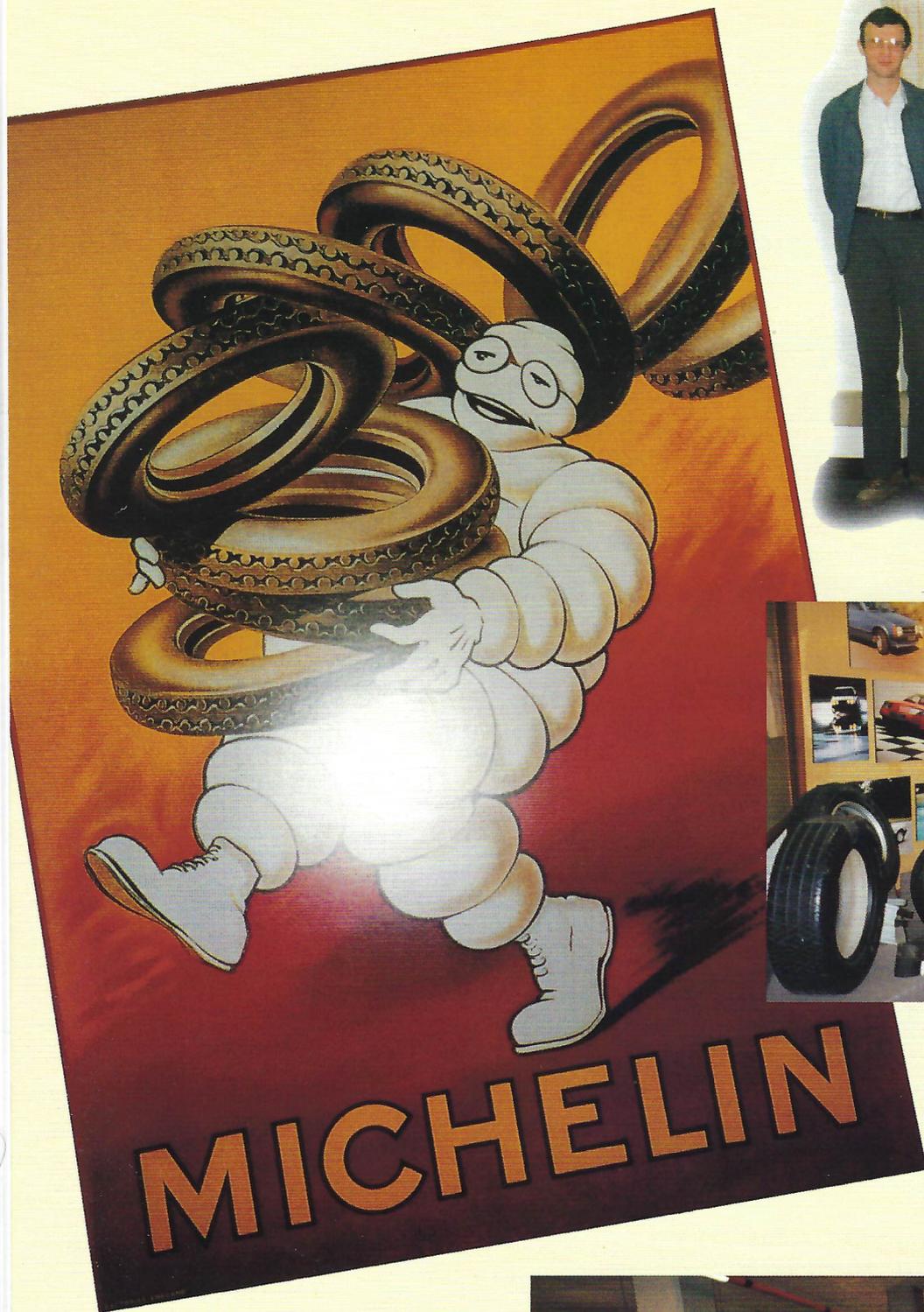
*Nous découvrons d'abord tout un étage consacré à l'évocation historique de plus d'un siècle de recherche et d'innovations. Après avoir contemplé les photographies des familles Barbier, Daubrée et Michelin, nous apprenons que c'est en 1891 que les deux frères André et Edouard Michelin inventent le pneumatique démontable pour bicyclette. En 1895 ils présentent au public l'Eclair, la première voiture qui roule sur pneumatiques. De nombreuses photographies de courses illustrent la supériorité des véhicules équipés de pneus. Ces pneus, nous pouvons en voir toute une collection qui met en lumière l'évolution des techniques et les progrès considérables réalisés au cours des décennies. Ils équipent bicyclettes et voitures, michelines et avions, métros et génie civil. N'oublions pas parmi ces produits si divers le domaine des cartes et guides, et celui des bornes routières.*

*Après ce voyage dans le temps les visiteurs eurent plaisir à poser, pour une traditionnelle photographie, devant la 2 CV Citroën Sahara à deux moteurs (1962).*

*Un autre étage concerne la période actuelle et plus spécialement la fabrication du pneumatique. Une vitrine présente les nombreux matériaux qui entrent dans la composition des pneus : caoutchouc naturel, élastomères, carbone, silice, soufre, etc.... Puis notre guide détaille pour nous les étapes de la confection d'un pneu jusqu'au montage, à la cuisson ou vulcanisation. La projection d'un film vidéo précise ces connaissances, de même qu'une séquence sur le pneu vert.*

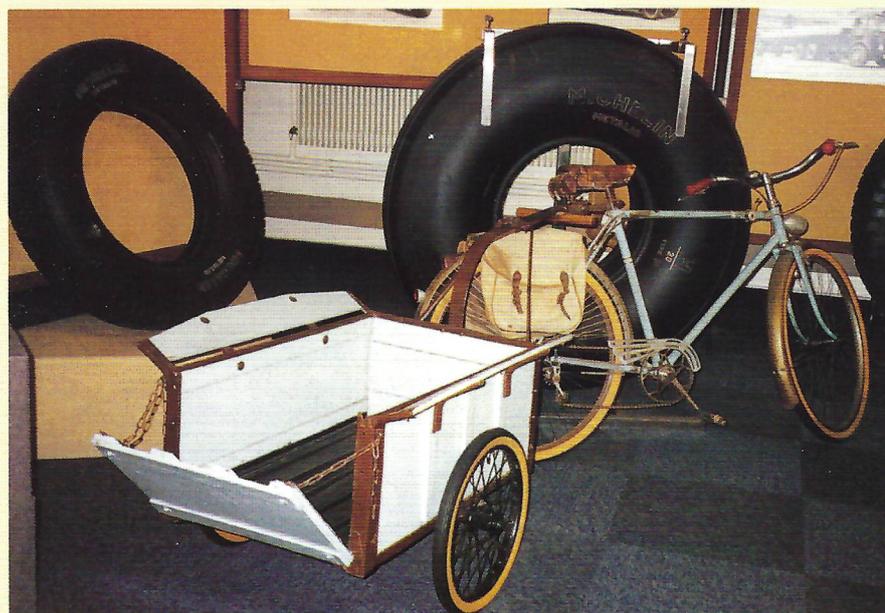
*Avant de partir, nous faisons un clin d'œil à Bibendum, le petit bonhomme éternellement jeune qui symbolise la grande entreprise clermontoise, toujours présent sur les affiches d'aujourd'hui comme sur celle de 1898, année de sa naissance, sous le crayon du dessinateur Marius Rossillon, dit O galop. Puis les visiteurs se séparent visiblement enchantés d'avoir appris tant de choses sur le pneumatique.*

J. ALLÉE





*Sur nos photos :  
Bibendum hier et aujourd'hui,  
un petit groupe devant  
la Renault modèle EK (1913),  
et la 2CV Sahara  
à 2 moteurs (1962).*





*Le groupe de visiteurs  
écoute l'exposé du guide.*

*Et encore des pneus,  
et Bibendum.*

Photos : B. Ragoût, J.-C. Capelani, J. Allée.

# La forme des protéines

Alain FIGUREAU

Chercheur à l'Institut de Physique Nucléaire de Lyon (IPNL)  
Université Claude Bernard – Villeurbanne.



● ● ● ● ●  
**PROTEINE :**  
**“POLYMÈRE COMPOSÉ**  
**D'ACIDES AMINÉS,**  
**DE MASSE**  
**MOLÉCULAIRE ÉLEVÉE”.**

(Dictionnaire Hachette)

Cette définition présente la grande famille des protéines comme un ensemble homogène de macromolécules, en faisant référence à leur composition chimique. Elle est donc une formulation à la fois très simple et très efficace, puisque des millions de molécules différentes sont ainsi classifiées par une seule phrase.

● ● ● ● ●  
**1 DIVERSITÉ**  
**DES PROTÉINES**

La définition ci-dessus passe cependant sous silence l'immense variété des molécules qu'elle décrit. En effet la propriété la plus remarquable de cet ensemble de molécules est sa diversité extrême.

Diversité de masse d'abord, puisque la masse moléculaire d'une protéine peut se situer entre 6000 daltons et plusieurs millions (un dalton est une unité de masse très proche de celle de l'atome d'hydrogène). Diversité de masse, donc diversité de taille et de forme aussi.

Diversité des fonctions biologiques surtout : tout d'abord les protéines jouent un rôle déterminant dans la constitution même de nos organismes : par exemple le collagène pour la peau, les cartilages, les os. Rôle déterminant dans les mouvements: les deux types de filaments qui constituent les muscles sont des protéines et, à une autre échelle, la propulsion des spermatozoïdes est due à des structures contractiles formées de protéines. Rôle

déterminant enfin dans la production et la transmission des influx nerveux, etc...

Une seconde fonction importante des protéines réside dans le transport et la mise en réserve des molécules nécessaires au bon fonctionnement de l'usine chimique que constitue une cellule. L'exemple le plus connu est sans doute celui de l'hémoglobine, qui transporte l'oxygène dans le sang, mais d'autres protéines ont un rôle équivalent pour le fer (la ferritine), le cuivre (la ceruloplasmine), les acides aminés (la caséine, que l'on trouve dans le lait), etc...

Citons encore leur rôle essentiel dans chacune de nos cellules : presque toutes les réactions chimiques des systèmes biologiques sont catalysées par des enzymes, qui sont une famille particulière de protéines. Ces réactions elles-mêmes sont extrêmement diverses, allant d'hydrolyses, qui utilisent l'eau pour couper des liaisons covalentes, à des oxydoréductions ou des synthèses de macromolécules nécessitant un apport d'énergie chimique. Des milliers de réactions sont actives dans un système biologique, et dans une seule cellule on peut donc trouver des milliers d'enzymes différentes.

D'autres protéines enfin jouent un rôle important dans la plupart des systèmes de traitement de l'information qui entrent en jeu dans un organisme vivant, que ce soit pour la reconnaissance de soi (les anticorps, qui fixent les substances étrangères telles que les virus, les bactéries et les cellules d'autres organismes), le fonctionnement et le contrôle de l'expression des gènes : de nombreuses protéines sont nécessaires pour la duplication même de l'ADN tandis que d'autres, les répresseurs, réduisent au silence des segments spécifiques de ce même ADN. Les exemples sont trop nombreux pour les citer tous.

● ● ● ● ●  
**2 UNITÉ DES PROTÉINES**

Revenons maintenant à la propriété essentielle, relevée par la définition lexicale, qui est la composition chimique commune à toutes ces molécules : les protéines sont, à quelques relativement rares modifications près, formées entièrement de petites molécules biologiques, les acides aminés, liées entre elles toujours de la même façon en une chaîne dite polypeptidique. Plus remarquable encore, toutes les protéines de toutes les espèces connues, de l'homme aux bactéries les plus simples, sont construites ainsi à partir des mêmes 20 acides aminés, alors que l'on trouve dans la nature plus de 100 membres de cette famille de molécules. Notons enfin que tous ces acides aminés (sauf un, le plus simple) sont des molécules non symétriques et existent donc en deux versions, tout à fait comme il y a deux versions d'une main : la gauche et la droite. Et bien, dans tous les organismes vivants, seules les versions “gauches” de ces molécules sont utilisées et synthétisées, un peu comme si un être humain ne pouvait être construit que de mains gauches, bras gauches, pieds gauches, etc.

Sans entrer dans trop de détails, essayons de décrire cette famille essentielle de molécules qui constituent les éléments de base de toutes les protéines : un acide aminé est constitué d'une fonction amine ( $\text{NH}_2$ ) d'un groupe carboxyle ( $\text{COOH}$ ), d'un atome d'hydrogène (H) et d'un groupe caractéristique (R), qui sont liés à un atome de carbone appelé carbone alpha. Ainsi, la formule chimique commune aux acides aminés est présentée dans la Figure 1.

Donc, non seulement les éléments de base des protéines sont peu nombreux au regard de la variabilité décrite au début de cet article, mais ces 20 éléments eux-mêmes ont une unité remar-

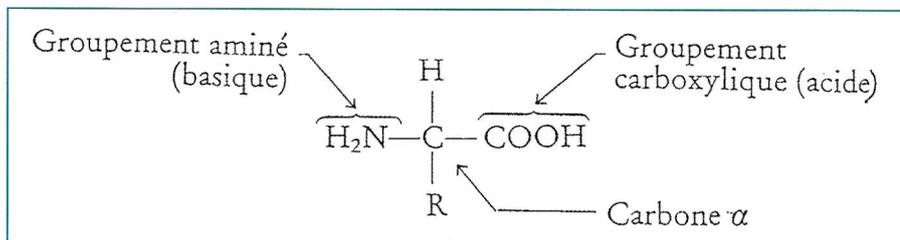


Figure 1 - Structure de la forme non ionisée des acides aminés.

quable, puisqu'ils ne diffèrent que dans le groupement R, qui varie d'un simple atome d'hydrogène H (pour la glycine) à un double cycle indole pour le tryptophane ! Ces éléments latéraux ont donc des propriétés physiques et chimiques très variées : certains acides aminés sont acides, et d'autres basiques, certains ont tendance à interagir avec les molécules d'eau environnantes et d'autres non, etc... Notons cependant des ressemblances entre plusieurs de ces éléments R qui se traduiront par des propriétés voisines de plusieurs de ces acides aminés. C'est donc par le jeu de multiples combinaisons d'un assez petit nombre d'éléments fondamentaux que se constitue la grande variété des protéines.

Nous avons dit en effet que ces acides aminés formaient une chaîne, comme les perles forment un collier : la liaison covalente qui relie entre eux 2 acides aminés est appelée un lien peptidique, et est formée entre le groupement amine de l'un et le groupement carboxylique de l'autre, avec perte d'une molécule d'eau. De nombreux acides aminés peuvent être ainsi unis par ces liaisons peptidiques pour former une structure non ramifiée, dont un exemple schématique est montré en Figure 2.

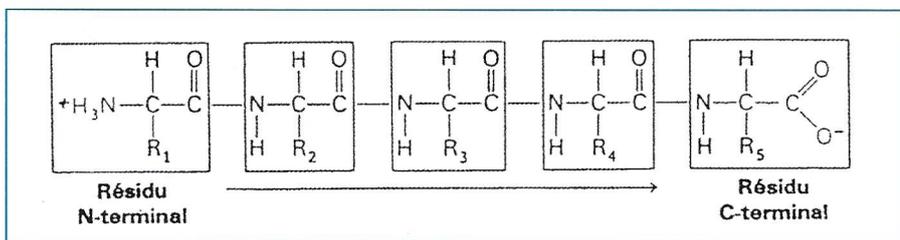


Figure 2 - Une chaîne polypeptidique de 5 acides aminés (les résidus consécutifs sont encadrés).

Une protéine est ainsi formée de une à plusieurs centaines de résidus (les acides aminés ayant perdu leurs "extrémités" au moment de l'établissement du lien peptidique : comparer les Figures 1 et 2). La séquence de ces résidus, écrite à partir du résidu N-terminal, constitue un résumé simple de la formule chimique de la protéine correspondante. Elle est appelée "séquence primaire". Son équivalent serait la description d'un collier de perles de

différentes formes et couleurs par la simple liste de ces caractéristiques rencontrées à partir du fermoir. L'analogie peut même être poussée plus loin : la chaîne polypeptidique formée d'une partie répétitive et commune à toutes les protéines (N-C-C-N-C-C-N-C-...), dite chaîne principale, serait le fil du collier, et les parties variables (R1, R2, R3, ...), dans la chaîne latérale, en seraient les perles. Il devient clair ainsi que le nombre de colliers que l'on peut construire avec 20 perles différentes est immense, malgré le nombre relativement limité d'éléments distincts. Pour donner un ordre de grandeur, il pourrait exister  $20^{100}$  protéines différentes de 100 résidus, ce qui est un chiffre bien supérieur au nombre d'atomes de notre univers. Et il existe des chaînes protéiniques bien plus longues !

### 3 LA FORME DES PROTÉINES

L'analogie précédente est simple, mais elle se heurte vite à une difficulté si nous voulons aller plus loin : la forme que prend le collier de perles dépend du support sur lequel on le pose, que ce soit un cou, une table ou un écrin. Ce n'est pas le cas des protéines, qui ont dans leur état normal une forme parfaitement définie.

Or c'est cette forme qui détermine les propriétés de ces molécules : une protéine n'est active biologiquement que si chaque site réactionnel est bien positionné vis à vis des sites de chaque molécule avec laquelle il doit y avoir interaction. L'analogie a souvent été faite avec un problème de clé et de serrure qui doivent être adaptées l'une à l'autre pour être utiles. Bien sûr, cette condition de géométrie à trois dimensions ne peut être réalisée que si la chaîne des acides aminés se replie dans l'espace toujours de la même façon et très précisément. Il est donc bien com-

préhensible que la forme des protéines et la façon dont elle est réalisée constituent l'un des problèmes les plus importants de la Biologie Moléculaire.

### 3.1 DES ASSEMBLAGES ELEMENTAIRES

La conformation de molécules aussi complexes reflète un équilibre délicat entre toutes les forces d'interaction qui agissent entre les atomes de la molécule, mais aussi entre ces atomes et le solvant qui les entoure. En particulier ces forces sont différentes pour chaque type d'élément R dans la chaîne latérale et pour chaque type d'environnement autour de la molécule, si bien que l'état d'une protéine dépend parfois de façon très sensible des conditions dans lesquelles elle a été observée. Si son environnement est perturbé, la conformation naturelle d'une protéine peut être modifiée (bien sûr, ceci est vrai aussi pour le collier de perles), mais le résultat en est une perte partielle ou totale de ses propriétés et de ses fonctions; au contraire, le collier reste un collier.

La dénaturation d'une protéine a d'ailleurs été bien utile, il y a presque 40 ans, pour démontrer que la conformation était une caractéristique liée à la nature même de la protéine, c'est à dire à la séquence d'acides aminés qui la compose: une fois dénaturées, mais non détruites, des molécules de ribonucléase pancréatique de bovin perdaient toute activité enzymatique. Lors du rétablissement de l'équilibre chimique de leur milieu, toutes les liaisons intramoléculaires se rétablirent, et le produit "renaturé" était identique à la molécule originale.

Ainsi, il est maintenant admis que l'information structurale est en général équivalente à l'information contenue dans la séquence primaire. Il devrait donc être possible de remonter à la forme des protéines dont on connaît la formule chimique exacte. En effet nous connaissons, grâce aux récents et gigantesques programmes de séquençage, des dizaines de milliers de séquences d'acides aminés, déterminées à partir de la séquence des gènes qui les codent.

Malheureusement, il n'existe aucun modèle qui permette de remonter de façon vraiment fiable d'une séquence d'acides aminés à la structure tridimensionnelle de la protéine qui lui correspond. En effet, la chaîne principale n'est pas rigide et adopte une conformation qui dépend des atomes des résidus R1, R2, ... Alors que le lien peptidique entre le carbone du groupement carboxyle COOH et l'atome d'azote du groupe aminé  $NH_2$  est rigide et main-

tient la totalité du groupe peptidique dans un plan, les autres liaisons de la chaîne principale sont des liaisons simples et permettent une rotation autour du carbone alpha (Figure 3).

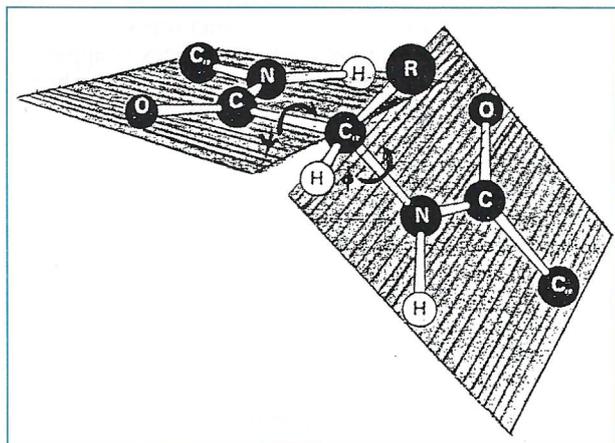


Figure 3 - Les rotations possibles autour du carbone  $\alpha$  de 2 groupes peptidiques rigides, paramétrées par les angles  $\psi$  et  $\phi$ . Noter que les groupements dans un plan ne sont pas les mêmes que ceux encadrés dans la Figure 2.

On peut donc voir la protéine comme une succession d'unités peptidiques planes reliées entre elles par des carbones alpha qui jouent le rôle d'articulations. Les rotations autour de ces carbones sont limitées uniquement par l'encombrement stérique et les propriétés chimiques des atomes des chaînes latérales, mais il reste encore beaucoup de liberté pour le repliement, qui peut être caractérisé par la succession des angles  $\psi$  et  $\phi$  le long de la chaîne polypeptidique (Figure 2). Cependant, il a été prouvé dès 1952, puis observé, que certains angles de rotation étaient favorisés et correspondaient à des structures régulières dans l'espace : les hélices  $\alpha$  et les feuillets plissés  $\beta$ .

Dans une hélice  $\alpha$  (à ne pas confondre avec la double hélice de l'ADN), la chaîne principale est enroulée en une spirale étroite qui forme la partie interne de l'hélice, comme le noyau d'un escalier à vis. Les chaînes latérales se disposent à l'extérieur, comme les marches de l'escalier, en un arrangement hélicoïdal. Les deux vues de la Figure 4 donnent une idée des proportions et dimensions de cette hélice. Son sens d'enroulement dans les protéines est droit, c'est à dire dans le sens des aiguilles d'une montre, et le pas de vis a une longueur de 0,54nm

Un tour d'hélice correspond donc à 3,6 résidus, si bien que les acides aminés distants de 3 ou 4 résidus dans la séquence sont très proches l'un de l'autre : cette proximité est "utilisée" pour stabiliser l'hélice par des liaisons hydrogène entre le groupement CO de

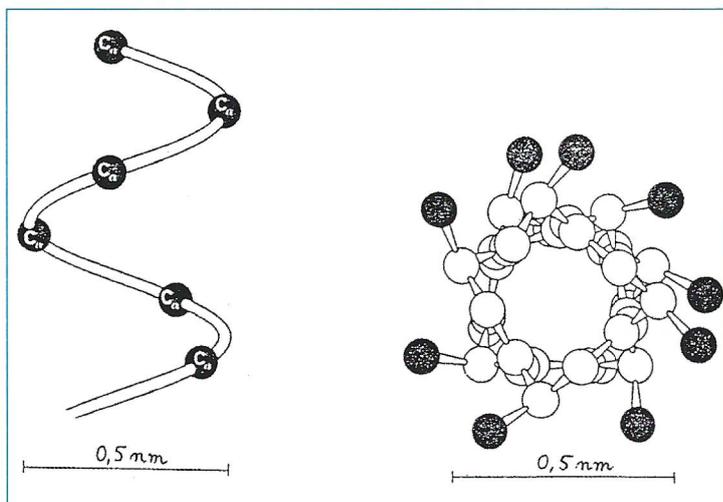


Figure 4 - Vues de profil et de dessus d'une hélice  $\alpha$ .

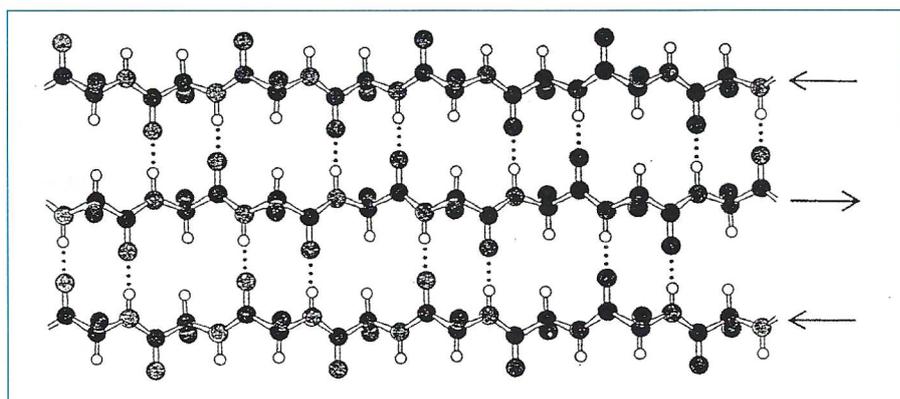


Figure 5 - Feuille plissé  $\beta$  antiparallèle. Les éléments R sont en dehors du "plan" du feuillet.

chaque acide aminé et le groupement NH de son plus proche voisin dans l'espace, qui est en fait à 4 positions le long de la chaîne. Grosso modo, l'hélice se présente donc comme un bâtonnet assez rigide, dont la longueur peut atteindre jusqu'à 4 nm.

FIG 4 Vues de profil et de dessus d'une hélice  $\alpha$ .

Contrairement à la structure précédente, un feuillet  $\beta$  est constitué par plusieurs brins de protéine ou plus exactement par plusieurs parties du brin unique, qui sont au voisinage les uns des autres dans l'espace mais pas forcément dans la séquence polypeptidique. La structure ainsi formée est un feuillet plissé, stabilisé par des liaisons hydrogène entre les groupes CO et NH de brins voisins. Deux cas de figure sont trouvés dans les protéines : les feuillets  $\beta$  parallèles, dans lesquels les brins liés entre eux sont de même sens, et les feuillets antiparallèles dans le cas contraire (illustré en Figure 5).

Les proportions d'hélices et de feuillets dans les protéines sont très variables, allant jusqu'à une prépondérance presque totale de l'un ou de

l'autre de ces motifs. Deux exemples opposés sont ceux de la kératine de la peau et des cheveux, où les hélices  $\alpha$  dominent, et la fibroïne de la soie presque entièrement constituée de feuillets  $\beta$  antiparallèles.

A partir de ces structures élémentaires, la nature a construit des superstructures plus grosses encore, mais qui sont loin d'avoir la même universalité que les précédentes. Par exemple, des hélices  $\alpha$  peuvent s'enrouler les unes autour des autres pour former des enroulements super hélicoïdaux. Ou bien plusieurs feuillets  $\beta$  sont entassés en une sorte de mille-feuilles. Il existe même, entre autres, des domaines appelés barrières  $\alpha / \beta$  que l'on a identifiés assez souvent et qui sont formés de 8 séquences  $\beta\alpha$ .

Mais laissons là ces ensembles relativement petits par rapport à la totalité d'une protéine et intéressons-nous maintenant à la forme globale de ces molécules et à leur détermination. Actuellement, il n'est pas question de décrire un ensemble aussi énorme en termes de ses constituants connus les plus petits, les atomes : quoique l'on dispose de leur formule chimique exacte (essentiellement la séquence de ses acides aminés), et des équations de base de la Mécanique Quantique, la

détermination même approximative de la forme des protéines est complètement hors de notre portée. Nous verrons que les modèles théoriques sont obligés de s'appuyer sur les données expérimentales concernant le plus grand nombre de protéines possible, ce qui représente une somme colossale de travail, de patience et d'ingéniosité.

### 3.2 DES STRUCTURES COMPLÈTES

Commençons donc par le commencement : nous parlons ici de la forme des protéines, mais ces objets sont des molécules. Très grosses pour des molécules, mais des molécules tout de même. Leur taille est en général inférieure à une dizaine de nanomètres c'est à dire un cent millième de millimètre ! Comment peut-on donc observer leur forme ? Les physiciens connaissent déjà la réponse, la diffraction de rayons X, mais cette réponse n'a pas été simple à mettre en œuvre.

En effet, la protéine que l'on veut étudier doit d'abord être séparée de toutes celles qui se trouvent dans le même environnement. Ce n'est pas chose facile, et diverses méthodes doivent être parfois utilisées successivement. Dans chacune de ces méthodes, une caractéristique différente de la molécule est utilisée : par exemple la taille dans une séparation par dialyse à travers une membrane semi-perméable, dont les pores ont un diamètre prédéterminé, ou la charge globale, qui conditionne la vitesse de migration dans un champ électrique (électrophorèse). La solubilité, ainsi que les affinités pour divers groupes chimiques, sont souvent utilisées aussi. Evidemment, après séparation, il faut aussi vérifier que deux protéines ne sont pas encore mélangées parce qu'elles avaient la même réponse au processus de tri.

Une fois séparées de leurs congénères, les molécules de la protéine étudiée doivent être cristallisées afin de diminuer le bruit de fond (les régularités du cristal font que les amplitudes de diffraction pour chaque atome aligné s'ajoutent) et de réduire l'effet des dommages causés par les rayons X eux-mêmes. Or les protéines sont en général en solution, et c'est tout un art d'obtenir des cristaux de taille suffisante pour l'analyse aux rayons X (il suffit pourtant d'une fraction de millimètre cube). En choisissant convenablement les conditions expérimentales, il s'agit de développer, par sursaturation, des germes de cristaux qui croissent lentement et donnent des cristaux de bonne qualité. Il faut éviter de sécher trop ou

trop fort la solution contenant la protéine, mais cristalliser tout de même. Notons ici que les cristaux obtenus sont constitués à parts à peu près égales de protéines et d'eau interstitielle, où l'on peut faire diffuser diverses petites molécules : l'interprétation des diagrammes de diffraction sera alors facilitée par des comparaisons multiples. En effet, dernière difficulté, et non des moindres, ces diagrammes sont extrêmement complexes : ils recèlent les informations sur les positions de milliers d'atomes, sans compter ceux d'hydrogène, et une détermination directe des phases des amplitudes de diffraction est impossible.

Il faut encore disposer d'une source de rayons X intense et dans des longueurs d'onde adaptées. Jusqu'à ces dernières années, on utilisait des sources monochromatiques, qui donnaient des résultats très précis, mais demandaient une très longue exposition. On fait maintenant appel à des sources bien plus puissantes et qui émettent un rayonnement contenant toutes les longueurs d'onde utiles : les sources de rayonnement synchrotron. Le temps d'exposition est réduit à quelques secondes, au lieu de plusieurs mois.

Une fois obtenu le spectre de diffraction, il faut interpréter cette image, qui présente des milliers de taches, en termes de positions des atomes de la molécule, qui sont aussi des milliers. En fait, par synthèse de Fourier, c'est la densité des électrons qui peut être calculée à partir des caractéristiques de la lumière diffusée et enregistrée. Mais même cette étape n'est pas simple, à cause du manque d'informations sur les phases dans chaque tache : celles-ci ne peuvent être estimées que par compa-

raison avec les diagrammes obtenus sur des cristaux "dérivés", c'est à dire où chaque protéine a été marquée par des atomes lourds interstitiels, dont on doit par ailleurs déterminer la position dans la maille cristalline.

Les éléments structuraux les plus importants, tels les hélices  $\alpha$  apparaissent dès les calculs à faible résolution (0,5nm) qui correspondent à la prise en compte d'un nombre limité de taches. Par contre, si l'on veut suivre la chaîne polypeptidique entière, il faut pousser la résolution jusqu'à 0,3nm même 0,2nm (ordre de grandeur des liaisons chimiques). Cela est possible lorsque les cristaux sont de très bonne qualité : il faut alors considérer 15 fois plus de termes !

Une dernière difficulté se dresse encore sur notre chemin : la densité électronique est entachée d'erreurs, en particulier dues à la détermination des phases des amplitudes de diffusion. Le modèle atomique construit sur ces données est donc très imprécis, et il faut l'améliorer en procédant à un "affinement", qui revient à comparer (par ordinateur) les intensités des taches mesurées à celles calculées pour le modèle le plus réaliste possible. Celui-ci inclut l'information de la séquence de la protéine ainsi que les connaissances chimiques sur les liaisons entre chaque atome. Cette optimisation doit être itérée plusieurs fois, ce qui représente un volume de calculs très important.

En général, le modèle final est de bonne qualité et sa précision n'est limitée que par la résolution des mesures. Ainsi, dans les meilleurs cas, l'incertitude sur les positions atomiques est inférieure à 0,01 nm-0,02 nm. Un résultat caractéristique est présenté en

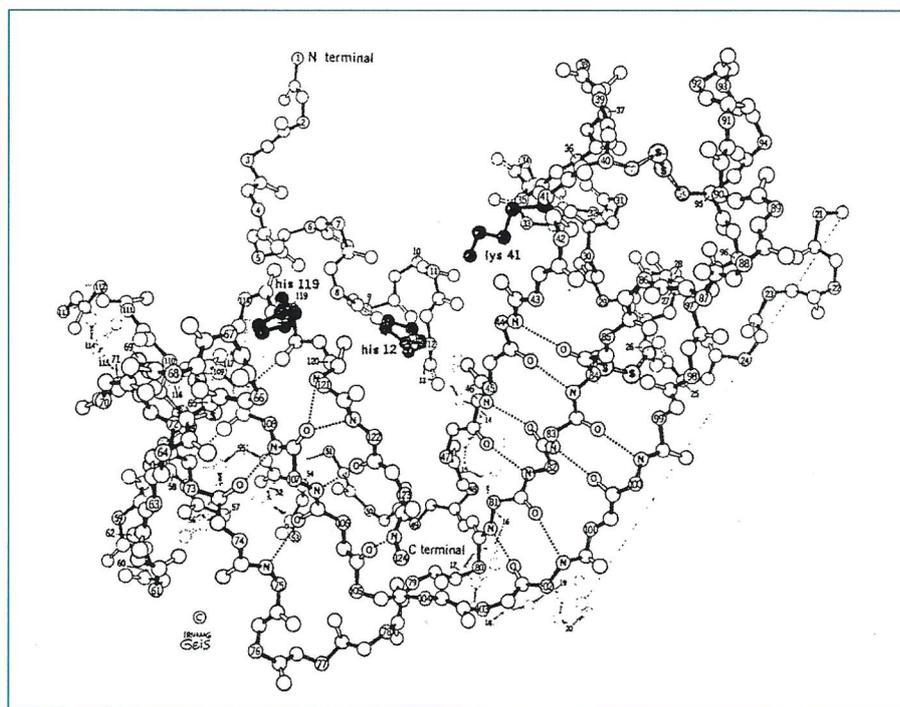


Figure 6 - Structure atomique de la ribonucléase.

Figure 6, où l'on peut suivre la chaîne primaire de la ribonucléase.

Quoique cette représentation soit bidimensionnelle, elle met en évidence les caractéristiques générales de la forme des protéines : on voit que la chaîne est repliée sur elle-même de manière à occuper un volume de forme globulaire. De plus, ce volume est rempli de façon très compacte, laissant en particulier peu de place pour des molécules d'eau.

La répartition en hélices  $\alpha$  et feuillets  $\beta$  pour cette même protéine a été explicitée dans la Figure 7. Cette approximation dans laquelle chaque résidu se voit attribuer le caractère  $\alpha$ ,  $\beta$ , ou autre, est appelée structure secondaire de la protéine (la Figure 6 représentant la structure tertiaire). On voit que la plus grande partie des résidus fait partie d'une sous-structure régulière, et que la forme de la protéine est construite à partir de ces éléments de base reliés entre eux par des coudes ou des boucles moins faciles à caractériser. Contrairement au jeu de Meccano, où la diversité des modèles est assurée par la variété des pièces de construction, il existe ici des assemblages flexibles de pièces qui apportent une grande souplesse d'adaptation et relient les assemblages rigides constitués par les hélices et les feuillets.

Une dernière propriété importante des protéines, liée à la compacité mais peu visible sur ces figures à petite échelle, est la répartition des résidus selon leurs propriétés: à l'intérieur, on trouve plus souvent des acides aminés hydrophobes, tandis qu'à la surface apparaissent plutôt des résidus chargés, en contact avec l'eau du milieu extérieur.

Enfin, on observe à la surface de la protéine une sorte de dépression où 3 résidus ont été distingués : le site actif est constitué par des acides aminés voisins dans l'espace mais très éloignés dans la séquence primaire, laissant penser que toute la structure est construite de façon à présenter ces 3 pièces et leur environnement dans des positions relatives très précises.

Ces caractéristiques sont assez générales, mais certaines classes de protéines présentent des structures et des formes plus particulières. Par exemple, les protéines fibreuses se présentent plutôt sous la forme de bâtons très allongés; dans les protéines membranaires, une partie constituée surtout d'hélices  $\alpha$  est souvent insérée dans l'épaisseur de la membrane cellulaire et sépare une partie intérieure d'une partie extérieure très dissemblable; enfin, certaines protéines sont constituées de plusieurs domaines différents dont l'arrangement peut donner une forme plus

sophistiquée : c'est le cas bien connu des immunoglobulines qui sont à la base du système immunitaire, et qui ont une structure en Y très caractéristique (quand la protéine est formée de plusieurs chaînes polypeptidiques, on a une structure quaternaire).

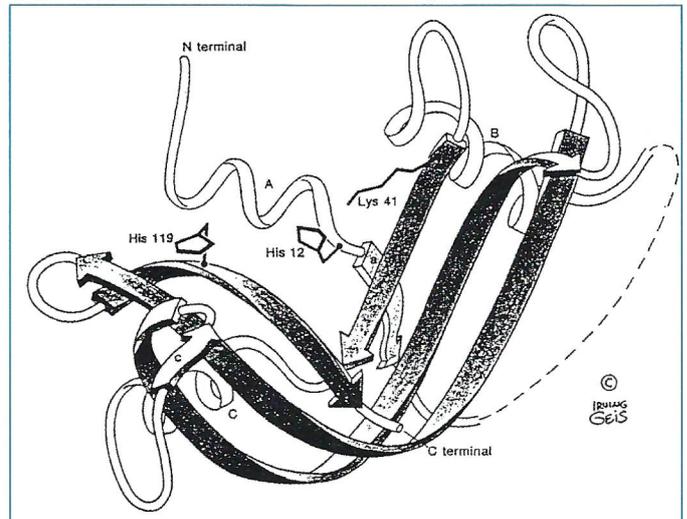


Figure 7 - Structure secondaire de la ribonucléase. Les hélices  $\alpha$  sont représentées par des rubans torsadés et les feuillets  $\beta$  par des rubans plats.

● ● ● ● ●  
**4 CONCLUSION :**

**LE REPLIEMENT DES PROTÉINES**

Les Figures 6 et 7 synthétisent le travail de toute une équipe de spécialistes pendant des mois, et il n'est pas toujours possible d'obtenir leur équivalent pour une protéine quelconque. Les techniques pour avoir de meilleures images aux rayons X se sont développées et affinées, de nouvelles méthodes de détection ont été utilisées, telle la Résonance Magnétique Nucléaire (RMN), mais il reste que la détermination expérimentale de la forme des protéines est encore un sujet difficile qui nécessite beaucoup de travail et d'énergie.

Aussi, il n'est pas étonnant que de nombreux travaux théoriques aient essayé de fournir un raccourci qui permette d'obtenir des informations équivalentes directement à partir de la séquence d'une protéine. Nous avons déjà dit que ce n'était pas encore possible par des calculs atomiques, mais l'idée d'utiliser les résultats expérimentaux existants comme base de données et de les extrapoler à des protéines de structure inconnue a été explorée de nombreuses façons. L'hypothèse ici est que des sous-séquences analogues dans des protéines différentes doivent avoir des configurations analogues, puisque la structure est déterminée par les propriétés physico-chimiques des acides aminés.

Bien sûr, cela est vrai sur un plan général, mais c'est sans compter sur les interactions entre résidus éloignés dans la séquence, mais proches physiquement à cause du repliement de la chaîne. Rien ne nous dit non plus ce que sont des sous-séquences analogues : il faut bien voir que la probabilité de trouver dans la banque une suite sélectionnée de 6 résidus ou plus est faible

(il en existe a priori  $20^6=3.200.000$  différentes, nombre bien supérieur au nombre total de résidus dans toutes les protéines élucidées), et par conséquent il faut trouver dans la banque de données une séquence voisine sans être sûr qu'elle ait la même configuration. Si l'on s'occupe de séquences plus courtes encore, le danger provient de la souplesse de la chaîne polypeptidique : la configuration d'aucune séquence courte n'est parfaitement définie, et à la limite des résidus individuels on ne peut qu'évaluer leur probabilité d'être dans une hélice  $\alpha$ , un feuillet  $\beta$  ou une structure moins bien définie. On a même trouvé des séquences de 8 acides aminés dont la structure était tantôt  $\alpha$  tantôt  $\beta$ .

Les résultats sont encore un peu décevants : globalement, seuls 3/4 des résidus sont prédits dans leur configuration réelle, ce qui rend difficile la reconstitution de la forme de la protéine inconnue. Une bonne partie de l'erreur réside dans la difficulté à situer exactement le début et la fin des structures secondaires régulières que l'on a pu prévoir : la longueur de ces pièces rigides est un peu imprécise, mais surtout cela a une influence importante sur la torsion de la chaîne à leur extrémité (par exemple dans une hélice  $\alpha$ , le dernier résidu est à un quart de tour du précédent : la suite de la chaîne est donc décalée d'autant si l'hélice est prédite plus longue ou plus courte d'un acide aminé).

Actuellement, un but plus modeste est donc de pouvoir disposer bientôt d'un échantillonnage suffisant de tous les types de protéines, de façon à comparer toute protéine inconnue à une chaîne semblable, qui aurait donc une forme semblable. Cette approche laisse

bien sûr de côté les cas pour lesquels la méthode expérimentale ne peut être appliquée, mais surtout elle n'est malheureusement pas adaptée à l'étude de la forme détaillée des protéines nouvelles, qui dépend de la structure primaire exacte.

Un autre inconvénient d'une méthode trop globale est qu'elle ne prend pas en compte l'histoire du repliement de la protéine, et ne peut donc permettre d'étudier ce phénomène. En effet, le mécanisme qui fait passer de la chaîne polypeptidique au moment de sa synthèse à la protéine en état de fonctionnement est complexe, mais semble complètement déterminé. Le nombre de configurations possible pour une protéine est immense, bien trop grand pour que la configuration finale soit atteinte par hasard : il faut donc admettre qu'il existe une suite limitée, peut-être unique, d'états intermédiaires par lesquels passe la chaîne polypeptidique avant d'atteindre sa configuration définitive. Leur détermination n'est pas simple, d'autant plus que certaines

sous-structures formées au cours du processus disparaissent ensuite, avant la fin du repliement. Il semble cependant que les structures secondaires soient parmi les premières formées, et qu'ensuite leur regroupement en domaines plus grands soit l'objet de réarrangements successifs. Ceci justifie bien d'ailleurs la recherche de la structure secondaire comme une première étape du repliement.

Ainsi, si le nombre de protéines dont on connaît bien la forme est en constante augmentation (actuellement, les banques de données en contiennent plusieurs milliers), il reste beaucoup de progrès à faire pour comprendre les principaux problèmes qui se posent. Nous aimerions savoir d'abord comment cette forme est atteinte, avec à la clé la possibilité de faire se replier correctement les protéines synthétiques, ce qu'elles ne font généralement pas. Nous aimerions aussi pouvoir suivre les changements de structure d'une protéine au cours de l'évolution afin de comprendre celle-ci : d'un organisme à

l'autre, les différences de détail peuvent apporter énormément d'information, que ce soit sur la classification des organismes ou sur la sophistication progressive des sites d'interactions. Enfin, nous aimerions comprendre aussi les changements de conformations des protéines au cours de leurs interactions : en effet il existe de nombreux systèmes de contrôle dans une cellule, qui activent ou inactivent des réactions en changeant la forme des protéines qui y participent.

Ces problèmes sont centraux pour la biologie moderne, ils n'ont encore été qu'effleurés. Nous avons vu dans cet article que les difficultés à vaincre sont immenses, mais aussi que les obstacles cèdent peu à peu le pas devant la patience et l'ingéniosité des scientifiques de notre temps : biologistes, bien sûr, mais aussi physiciens et informaticiens ont uni leurs efforts pour trouver la forme des protéines, et la solution des questions restantes dépendra certainement encore de la conjonction de plusieurs domaines de la science.

### BUREAU DE L'A.D.A.S.T.A.

Président	Jean-Claude CAPELANI
Premier Vice-Président	Paul AVAN
Second Vice-Président	Alain COULOMBEAU
Troisième Vice-Président	Marcelle PROFIT
Secrétaire Générale	Pierrette TOURREIX
Secrétaire adjoint	Guy ROBERT
Trésorier	André PROFIT
Chargée de la communication et de la Vidéo	Marcelle PROFIT
Rédactrice en chef de la Revue	Jocelyne ALLEE
Chargé de l'informatique	Bernard RAGOUT
Chargée de la communication avec les établissements scolaires	Suzanne GELY
Chargé de la communication avec les universités	Paul-Louis HENNEQUIN
Chargé des relations avec les professeurs des Sciences de la Vie et de la Terre	Guy ROBERT
Chargé de l'Astronomie	Jean CHAPELLE

### DIRECTEUR SCIENTIFIQUE

Michel NARANJO

### PRESIDENTE D'HONNEUR

Suzanne GELY

### CONSEIL D'ADMINISTRATION

Tous les membres du bureau

Le Directeur Scientifique

Jean-Pierre CARROUE	Marie-Colette MORENAS
Michel DOLY	Maryse POINTUD
Guy DURAND	Dominique TURPIN
Roland JOUANISSON	Elyane YACINE

# Vie de Newton avant les principes

Traduction de Madame Suzanne Gély

(Suite aux numéros 46 et 47 d'Auvergne Sciences)

Né le jour de Noël 1642, dans un hameau du comté de Lincoln, Colsterworth et élevé non loin de là à Grantham, Isaac Newton entra au collège de la Trinité à Cambridge en 1661. Après l'obtention de ses diplômes, il devint membre de la Trinité qui fut sa résidence pendant 35 ans et le lieu de toutes ses magistrales réalisations. Tandis qu'il était encore étudiant, Newton abandonna le cursus prévu afin de poursuivre ses propres aspirations pour les mathématiques et la physique. Sans bénéficier de préparation, il maîtrisa rapidement les nouvelles mathématiques analytiques du 17<sup>ème</sup> siècle et alla même au-delà en inventant la méthode des fluxions que nous appelons le calcul infinitésimal.

Tandis qu'il étudiait l'optique, il développa l'idée que la lumière blanche est un mélange hétérogène de différentes radiations, idée qu'il étendit bientôt dans une investigation expérimentale détaillée du phénomène des couleurs. Il se consacra aussi attentivement à l'étude de la Mécanique et en examinant la dynamique du mouvement orbital, il envisagea des idées rudimentaires qui se développeraient plus tard dans le concept de gravitation universelle.

A cause de ces remarquables découvertes, 1665 est reconnue comme "annus mirabilis" de Newton, sa merveilleuse année.

Isaac Barrow, eut connaissance de ce travail en mathématiques, s'arrangea pour que Newton lui succéda comme professeur à la chaire "Lucasienne" de mathématiques en 1669. Déjà, il avait commencé à se lasser de ses premières études, en quelque sorte, et vers 1670 il les avait largement abandonnées pour explorer deux autres thèmes qui occupèrent le plus son esprit pendant les quinze années suivantes. Il développa un intérêt passionné pour l'alchimie qu'il poursuivit à la fois dans de nombreuses publications et dans son laboratoire. Il devint aussi très absorbé par la théologie, y compris

l'interprétation des prophéties et il adopta la position connue sous le nom d'Arianisme que sa propre génération considérait comme hérétique et dangereuse. Cependant une partie de ses premiers travaux était devenue connue.

Certains de ses écrits mathématiques circulaient et il envoya à la "Royal

Society" à la fois son télescope par réflexion et un bref exposé de sa théorie des couleurs. Les autres savants ne l'oubliaient pas et à l'occasion, ils sollicitaient son avis. Ainsi, une visite en 1684 de Edmond Halley qui avait une question au sujet de la mécanique orbitale ne fut pas complètement une surprise.

## NEWTON'S LIFE BEFORE PRINCIPIA

Born in the Lincolnshire hamlet of Colsterworth on Christmas Day, 1642, and educated in nearby Grantham, Isaac Newton entered Trinity College, Cambridge, in 1661.

After graduating, he became a Fellow of Trinity, which was his home for thirty-five years and the scene of all of his major achievements. While he was still an undergraduate, Newton abandoned the prescribed curriculum in order to pursue his own interests in mathematics and natural philosophy. Without benefit of instruction, he quickly mastered the new analysis of 17th-century mathematics and went beyond it to invent the fluxional method, which we call the calculus. While studying optics, he developed the idea that white light is a heterogeneous mixture of different rays, which he soon extended into an elaborate experimental investigation of the phenomena of colours. He also devoted attention to the science of mechanics, and in examining the dynamics of orbital motion entertained rudimentary ideas that would later expand

into the concept of universal gravitation. Because of these remarkable discoveries, 1665 is known as Newton's *annus mirabilis*, his marvellous year.

Isaac Barrow, who learned of the work in mathematics, arranged for Newton to succeed him as Lucasian Professor of Mathematics in 1669. Already he had begun to tire of his early studies, however, and by 1670 he had largely abandoned them to explore two other fields that occupied most of his attention for the following fifteen years. He developed a passionate interest in alchemy, which he pursued both in its voluminous literature and in his laboratory. He also became absorbed in theology, including the interpretation of the prophecies, and adopted the position known as Arianism, which his own age considered both heretical and dangerous. However, something of his earlier work had become known. Some of his mathematical papers circulated, and he sent both his reflecting telescope and a short exposition of his theory of colours to the Royal Society. Other scientists did not forget him, and on occasion they sought his opinion. Thus a visit in 1684 from Edmond Halley, who had a question about orbital mechanics, was not completely a surprise.



## 2000 raisons de faire de l'histoire des sciences

**Eric Sartori**

Ingénieur de l'Ecole Supérieure de Physique et Chimie,  
Docteur ès-Sciences, Chercheur en Industrie Pharmaceutique,  
Auteur d'une "Histoire des Grands Scientifiques Français".

Pourquoi, après quelques années de mathématiques supérieures et spéciales, dont certains semblent croire qu'elles peuvent faire disparaître tout goût pour la réflexion et la culture, avoir envie de lire, voire d'écrire, des livres d'histoire des sciences, ce qui implique un certain nombre de sacrifices et de journées studieuses passées dans des bibliothèques pas toujours très accessibles ou agréables. Est-ce que l'histoire des sciences peut apporter quelque chose à leur enseignement ou à leur diffusion ?

D'abord, la curiosité

Une des premières raisons de s'intéresser à l'histoire des sciences est, me semble-t-il, ce qui constitue aussi le premier moteur du chercheur, la curiosité. Comme beaucoup, j'ai croisé, au cours de mes études scientifiques, sous forme de loi physique ou de théorème, un grand nombre de personnages, originaux ou désespérément banals, mais qui ont tous fait des découvertes extraordinaires. On ne me disait pas grand chose sur eux, et enfin, sous cette forme, ils étaient un peu désincarnés. J'ai voulu en savoir plus sur eux, et je me suis aperçu qu'il existait d'excellentes histoires des mathématiques, de la physique, de la chimie, de la biologie, mais qui étaient essentiellement des histoires des idées. Les pauvres savants y apparaissent démembrés selon les découpages actuels des disciplines scientifiques, qui ne sont pas généralement ceux de leur époque. En tous cas, ce démembrement ne permet pas de bien comprendre qui étaient ces hommes, ce qu'ils ont fait, et pourquoi et comment ils l'ont fait.

Quand l'histoire des sciences ne servirait qu'à faire surgir, stimuler ou satisfaire une élémentaire curiosité intellectuelle, elle apporterait déjà beaucoup à leur enseignement.



### SCIENCE ET HUMANISME

Une deuxième raison de faire de l'histoire des sciences se rapporte à quelque chose d'aussi vague, mais d'aussi essentiel que l'humanisme. Aussi dégradé que soit l'enseignement secondaire ou que l'on prétende un peu facilement qu'il le soit, il me semble que les élèves qui sortent des lycées connaissent assez bien les grands écrivains, poètes, artistes, hommes d'Etat français, mais ils connaissent bien mal les grands savants. Il y a sans doute de multiples raisons à cela, dont la princi-

pale tient, à mon avis, à cette coupure encore trop profonde entre culture scientifique et littéraire, et, au fond, un certain mépris, une certaine méfiance de la science qui perdure depuis la réaction romantique contre la volonté napoléonienne d'imposer un enseignement scientifique fort dans les lycées. Tout se passe comme si résonnaient encore les anathèmes de Chateaubriand : la science appauvrit la nature, les mathématiques dessèchent l'imagination. Des attaques qui étaient d'ailleurs parfois contradictoires. Tantôt Chateaubriand reproche aux scientifiques d'être subversifs, de s'at-



Auguste-Louis CAUCHY (1789 - 1857)

taquer à la religion et à l'ordre traditionnel, tantôt il leur reproche leur indifférence, voire leur servilité à l'égard des pouvoirs politiques : "Sous Napoléon, la littérature fut libre, la science fut servile". Comme d'habitude, avec Chateaubriand, la phrase est superbe, et superbement fautive. Chateaubriand oublie son cher ami Fontanes, chef du parti catholique sous l'Empire, Grand Maître de l'Université Impériale, et si flagorneur que Napoléon, qui n'avait pourtant pas l'odorat très fin en ce domaine, en était affecté...

Ces conceptions diffuses imprègnent encore trop les mentalités. Ainsi, lorsque l'on parle d'humanisme, c'est presque toujours aux "humanités", à la littérature qu'on se réfère. Comme si l'humanisme de la Renaissance n'avait pas d'abord été un mouvement scientifique ! Comme si la science n'était pas, elle aussi, une construction humaine, une humanité ! Raconter la vie des grands scientifiques permet aussi de montrer à quel point la science est une activité humaine, bien humaine, soumise à fantaisies, humeurs, jalousies, extravagances et entêtements divers, mais évidemment transcendés chez les plus grands par le génie et la soif de savoir.

● ● ● ● ●

## HUMANISER LA SCIENCE : L'APPROCHE BIOGRAPHIQUE

Mieux connaître les savants, leur vie, leur œuvre permet donc d'humaniser la science. Mais comment faut-il le faire ? L'approche biographique possède de grandes qualités, mais la biographie des savants ne paraît pas aujourd'hui un genre très considéré. Il semble parfois que l'on ne puisse parler d'un savant qu'en dénichant, comme pour Einstein, une circonstance dans laquelle il ne se serait pas très bien conduit avec sa femme. Ou, comme pour Pasteur, on s'échine à découvrir une circonstance dans laquelle il n'aurait pas exactement respecté certains critères éthiques d'aujourd'hui (lorsqu'il émit l'idée, qui ne fut pas réalisée, de faire tester des vaccins sur des condamnés à mort brésiliens) ; ou bien encore, on s'acharne à trouver des précurseurs inconnus, des travaux obscurs qui antérioriseraient ceux du grand homme, en oubliant ce précepte de Laplace : "Une vérité scientifique appartient à celui qui le premier, la démontre". Il est vrai qu'Attali prétend presque que Giordano Bruno aurait inventé la relativité...

Cette mode de démolition systématique des grands hommes de l'histoire scientifique a quelque chose d'agaçant, et même de bas. Avons-nous, comme le développe Finkelkraut dans l'un de ses



Louis Pasteur (1822 - 1895)

derniers ouvrages, perdu la faculté d'admirer ? Il est vrai qu'elle succède à la tradition des hagiographies du XIXème siècle, qui transformaient la vie des savants en "légende dorée". Je crois qu'il faut s'efforcer de maintenir un cap moyen entre ces deux récifs. Ainsi, dans le cas de Pierre et Marie Curie, on peut, derrière la légende, retrouver la figure un peu ignorée de Pierre Curie, qui fut, avant l'aventure atomique, un très grand physicien, découvreur de la piézoélectricité et pionnier de l'utilisation des considérations de symétrie dans les phénomènes physiques. Derrière les clichés misérabilistes sur Marie Curie, on peut montrer, comment après avoir failli être détruite par les médias, elle avait appris à très bien s'en servir, avec l'aide d'une journaliste américaine, et comment, loin du hangar de la rue Lhomond, elle a fondé puis est devenue la patronne un peu autocratique de la recherche atomique française.

● ● ● ● ●

## LA FRANCE : UNE GRANDE NATION SCIENTIFIQUE, QUI DOIT LE RESTER

Une autre raison de faire de l'histoire des sciences, c'est qu'ignorer les grands scientifiques français a pour conséquence que les Français ne savent pas

assez, ne se rendent pas compte que la France est une grande nation scientifique. Je crois qu'on peut même dire qu'il existe une vocation scientifique de la France, qui remonte haut dans notre histoire. On en trouve par exemple la trace dans le superbe livre de Le Goff sur Saint-Louis, avec ce thème développé par les clercs de Saint-Louis, celui de la *translatio studii*. On considérerait alors qu'il y avait un triple héritage de l'Empire romain, religieux, politique et intellectuel. Le pape avait la légitimité religieuse, le Saint Empire Romain germanique revendiquait l'héritage politique, et la France avait l'héritage intellectuel. Au fond, dès le début de son histoire, la France s'est voulue, s'est rêvée comme l'héritière des savants de la Grèce antique. Un des premiers actes politiques de Saint-Louis, rappelle Le Goff, fut de rétablir l'Université de Paris, qui en avait été chassée à la suite de rixes multiples entre étudiants et bourgeois. Un chroniqueur a alors écrit cette phrase superbe : "Le Roi ne voulait pas que Dieu lui reprochât : "Parce que tu as éloigné science de ton royaume, sache que tu t'es éloigné de moi".

Il me semble donc que la France a autant de motif d'être fière de son passé scientifique que de sa gastronomie, de sa littérature ou de son football. Pour ne citer que quelques-uns des héros de l'histoire scientifique française, avec l'humaniste Paré commence la médecine moderne, après les excès un peu sté-

riles, les provocations de Paracelse. Viète, le premier, dépasse l'héritage mathématique grec et en extrait l'or algébrique : "Le métal que je produis a l'aspect de l'or si longtemps désiré". Sur sa lancée, le chevalier Descartes annonce ce qui deviendra le programme, le rêve occidental : "Nous rendre comme maître et possesseur du monde". Entre Descartes, Pascal, Fermat et les mathématiciens parisiens, dont Roberval, se joue une brillante et parfois hilarante comédie, dont l'enjeu est la maîtrise de l'espace physique par l'analyse mathématique. Il faudrait aussi parler du grand XVIIIème siècle français ou plutôt de la période 1750 - 1850, siècle d'or de la science française, avec Laplace, Lavoisier (à toute histoire, il faut ses martyrs, et la science française a le sien en la personne de Lavoisier), Buffon, Lamarck, Cuvier, pour l'histoire naturelle, et toute la postérité scientifique de Lavoisier, regroupée autour de Laplace et Berthollet dans l'Ecole d'Arcueil : Arago, Malus, Poisson, Biot, Thenard, Gay-Lussac, et encore Cauchy et Ampère (la France a aussi inventé, en quelque sorte, l'analyse moderne et l'électrodynamique) et, plus récemment, Pasteur, Claude Bernard, Poincaré...

Une anecdote, qui laisse aujourd'hui rêveur, sur ce siècle d'or. Lorsque, vers 1820, Mary Sommerville rend visite à Laplace et Berthollet à Arcueil, elle y rencontre toute l'élite scientifique française et est complètement éblouie par Poisson. Elle note dans son journal : "J'avais quelque difficulté à suivre la conversation générale, mais lorsqu'on parlait de science, c'était beaucoup plus facile, car tous mes livres de science étaient en français".

Le bilan scientifique de la France est donc formidable, et le constater, le rappeler n'est pas neutre. Quand on connaît son passé, on peut mieux assurer son avenir. Car, bien sûr, être fier du passé scientifique français n'est légitime que si existe la volonté de le continuer. L'histoire des sciences peut donc, doit donc aussi servir à défendre la place de la science et de la recherche scientifique dans la société française. Ce n'est évidemment pas le moindre des services qu'elle peut rendre.

## ● ● ● ● ● ECRIRE

### SA PROPRE HISTOIRE

Il en va de l'histoire des sciences comme de l'histoire en général, il est fort imprudent, pour un pays, de ne pas écrire sa propre histoire et de laisser ce soin à d'autres. C'est ce qui se passe un peu trop en histoire des sciences. Il me

paraît anormal que Laplace ne soit pas aussi mondialement célèbre que Newton, compte-tenu de son rôle dans la théorie de la gravitation; il est pour le moins étrange d'attribuer la théorie atomique davantage à Dalton qu'à Gay-Lussac; il est très, très contestable d'affirmer, comme on le lit parfois, que la France aurait ignoré la Révolution Darwinienne en raison de l'influence de Cuvier. En revanche, ce qu'il faut bien reconnaître, c'est la prédominance anglo-saxonne en histoire des sciences, le nombre et la qualité des travaux anglais et américains, la reconnaissance universitaire dont cette discipline bénéficie dans le monde anglo-saxon. Certains travaux, tels ceux de Crosland sur l'Ecole d'Arcueil ou Gay-Lussac sont d'ailleurs remarquables et pleins de réelle sympathie; mais, tout de même, on ne peut s'empêcher de penser que ne pas écrire sa propre histoire est la marque des pays colonisés. Si l'on veut que la France reste un grand pays scientifique, il vaut mieux que les Français connaissent et estiment son passé scientifique à l'égal de son passé littéraire.

Je souhaiterais toutefois préciser qu'il ne faudrait évidemment pas retomber dans les pénibles et absurdes querelles de priorité sur la nationalité de telle ou telle découverte, qui ont trop marqué le siècle précédent. L'histoire des sciences peut aussi y aider. Il suffit par exemple de rappeler quelle volée de bois Lavoisier envoya à Fourcroy lorsque celui-ci présenta la "nouvelle chimie" comme "la théorie des chimistes français" : "Cette théorie n'est pas celle des chimistes français, elle est la mienne." Et Lavoisier de rappeler la longue période (11 ans) durant laquelle il dut se battre seul : "Fourcroy n'a commencé à enseigner cette théorie qu'en 1786; elle n'a été acceptée par Guyton de Morveau qu'à une époque postérieure; en 1785, Berthollet écrivait encore dans le système du phlogistique...". Ce qui amène d'ailleurs à s'interroger sur le terme de "Révolution Chimique", souvent employé pour caractériser cette période.

## ● ● ● ● ● L'HISTOIRE DES SCIENCES, C'EST DE L'HISTOIRE !

L'histoire des sciences, c'est de l'histoire, et on y retrouve toutes les questions que pose l'histoire. On m'a, par exemple, souvent demandé si je ne défendais pas l'idée qu'il existerait une science française ou une manière française de faire de la science ? Est-ce que ça n'est pas une idée absurde, voire dangereuse, la science n'est-elle pas universelle ?

Evidemment, la science, une vérité scientifique une fois établie, positive au sens Comtien, est universelle, vraie au-delà comme en deçà des Pyrénées, et même bien plus loin. Mais, ce que l'enseignement scientifique ne met peut-être pas suffisamment en évidence, c'est que les vérités scientifiques ne s'établissent pas toutes seules, et que les voies pour y arriver peuvent être extrêmement variées. Et là, il y a place pour des différences liées à la culture, à l'esprit, au génie propre des individus, des cultures, des nations.

Ainsi, même de l'étrange et atypique Fermat, son principal biographe, Mahoney, a joliment écrit : "C'était un mathématicien français des deux premiers tiers du XVIIIème siècle. Sa pensée, quelque originale et nouvelle qu'elle fût, opérait dans un champ de possibilité limité par l'espace et par l'endroit. Son odyssée avait ses frontières, son tambour battait dans le rythme du temps. Et Mahoney insiste sur l'héritage de Viète, dont il dit qu'il a montré à Fermat quels problèmes étudier et comment les étudier.

Alors existe-t-il, en matière de recherche scientifique comme en art ou en littérature, des traditions, des filiations nationales ? Lorsque j'ai écrit "l'histoire des grands scientifiques français", j'ai procédé, pour le choix de mes sujets, au hasard de mes goûts et de mes curiosités, sans plan défini, sans idée préconçue. Je me suis alors aperçu qu'il existait des filiations incontestables, plus ou moins connues. Ainsi, je crois qu'il existe incontestablement une grande tradition physico-mathématique française, qui passe par Descartes, Laplace, Poincaré et bien d'autres. Il est fascinant de voir Poincaré reprendre exactement, en le citant, des problèmes étudiés par Laplace (stabilité des masses fluides en rotation, stabilité de l'univers), et, avec des mathématiques d'un niveau supérieur, arriver à la conception du chaos déterministe là où Laplace avait une vision résolument déterministe. Autre filiation, encore assez connue : celle qui relie Laplace à Pasteur via Malus et Jean-Baptiste Biot. Sous l'impulsion de Laplace, l'Ecole d'Arcueil s'intéressa à la lumière, et l'un de ses grands succès fut la découverte par Malus de la lumière polarisée. Biot montra que la déviation du plan de polarisation de la lumière était une propriété caractéristique de certaines molécules, et non, comme on pouvait le penser, de l'état cristallin. On sait comment Pasteur commença son étonnante carrière en résolvant le mystère de l'acide paratartrique. Devant qui Pasteur fait-il la preuve de sa découverte en séparant les acides tartriques droit et gauche ? Devant Biot, un des rares survivants de l'Ecole d'Arcueil. On sait aussi, com-

ment à partir de l'idée que l'asymétrie optique était un phénomène caractéristique du vivant, Pasteur en arriva à l'étude des fermentations, des microbes, puis des maladies.

Autre filiation, moins connue, plus surprenante, celle qui relie Laplace à Claude Bernard via Magendie. Lorsque Laplace, en tant que ministre de l'Intérieur (on doit d'ailleurs à Napoléon la démonstration qu'on peut parfaitement nommer un scientifique au ministère de l'Intérieur, mais qu'il vaut mieux choisir un chimiste qu'un mathématicien, Chaptal, au contraire

Laplacien, en biologie. En biologie comme dans les autres sciences, des conditions expérimentales identiques conduisent aux mêmes résultats. Cela peut nous paraître évident aujourd'hui; cela ne l'était pas à l'époque et cette idée ne s'est pas imposée facilement.



## DÉTRUIRE LA "TOUR D'IVOIRE"

L'existence de filiations, d'Ecoles scientifiques me paraît donc certaine, mais il existe aussi évidemment une



*François ARAGO (1786 - 1853)*

de Laplace, ayant été un très grand ministre du Consulat) fut chargé de la réorganisation de l'Institut, il réserva quelques fauteuils aux médecins. Cela surprit et même indigna certains de ses collègues qui protestèrent : Comment ! Les médecins, ces empiristes vulgaires et mal assurés qui n'ont rien de scientifiques à l'Académie des Sciences ! A quoi Laplace répondit : "Oui, mais ainsi, ils se trouveront au milieu des scientifiques et en prendront les habitudes et les méthodes". Or Magendie, nommé par Laplace, fut le professeur et directeur de thèse de Claude Bernard, qui, avec l'Introduction à la médecine expérimentale, construisit enfin une médecine scientifique, par le développement de la physiologie et de l'expérimentation, et surtout en imposant le déterminisme, héritage

mais il existe aussi évidemment une influence nationale, historique sur les scientifiques, tout simplement parce que ceux-ci ne sont pas des abstractions, mais des êtres de chair et de sang, qui vivent dans un pays donné à une période donnée. Si l'histoire des sciences pouvait nous débarrasser, définitivement, de cette image du scientifique réfugié, isolé du monde extérieur dans sa tour d'ivoire, elle rendrait un grand service aux sciences. Dès le début de notre histoire scientifique, on trouve Paré, mêlé aux batailles et aux guerres civiles de son siècle, dans la chambre de l'Amiral de Coligny le soir de la Saint-Barthélemy; on trouve Viète, juriste chargé de délicates missions d'arbitrage entre les familles de Rohan et de Guise; Palissy, leader plus ou moins clandestin de la

communauté protestante et qui en subit toutes les vicissitudes. En matière d'implication des scientifiques dans la vie économique et politique, il ne faudrait pas oublier un modèle que nous gagnerions à retrouver, celui de la vie académique du XVIIIème siècle. Les Académiciens sont sans cesse sollicités par divers pouvoirs pour résoudre des questions pratiques. Cela passe souvent par un concours. Lavoisier commença sa carrière scientifique en répondant à une question sur l'éclairage des villes, question intéressée posée par le lieutenant de police Sartine, et à une question sur le gâchage du ciment, dans laquelle il montre déjà les qualités qui en feront un grand savant. A cette époque, on considère que, pour un académicien, pour un savant, rien de ce qui intéresse la société ne doit lui être étranger. Laplace et Lavoisier sont mobilisés pour étudier la mortalité à l'Hôtel-Dieu; Laplace teste les méthodes statistiques qu'on retrouvera plus tard dans ses traités sur les probabilités, d'où il ressort qu'un séjour à l'Hôtel-Dieu n'est, en effet, pas à recommander. Lavoisier, tout à sa découverte de l'Air respirable", s'intéresse à la circulation de l'air dans les salles. Il y aurait aussi toute une thèse à faire sur le rôle des scientifiques dans la question des rapports dans la cité entre morts et vivants, de l'inhumation, avec, par exemple, la mobilisation de savants de toutes spécialités pour étudier le problème du cimetière des Saints-Innocents, qui empoisonnait depuis plusieurs siècles la vie des Parisiens, et réaliser son transfert. Comme beaucoup de réformes, de "grands chantiers" entamés sous la monarchie, ce problème de l'inhumation sera finalement réglé par Napoléon, avec la loi sur les cimetières, signée, et ce n'est pas un hasard, du chimiste Chaptal. En terme d'implication des scientifiques dans la vie économique, il ne faut surtout pas oublier l'action extraordinaire de Pasteur, son rôle de pompier des crises industrielles lorsqu'il sauve les fermentations alcooliques d'un industriel lillois, puis les vinaigriers d'Orléans, puis l'industrie de la soie, et crée une industrie française de la bière. Même Poincaré, qui peut passer pour le plus "éthéré" des grands scientifiques français, intervient, et de quelle manière, dans l'industrie naissante des télécommunications en établissant ce qu'on appela l'équation des télégraphistes (propagation d'une perturbation électrique) et en inventant des notions nouvelles adaptées au phénomène (ondes entretenues, ondes dirigées etc...).

Une des grandes utilités de l'histoire des sciences serait donc de détruire cette fameuse tour d'ivoire : "pour un scientifique, rien de ce qui intéresse la société ne doit lui être étranger".

En ce qui concerne le point plus mineur de l'engagement politique des scientifiques, j'avoue aimer assez cette formule très utilitariste de Poincaré : "S'il y a des savants dans la politique, il faut qu'il y en ait dans tous les partis... La science a besoin d'argent, et il ne faut pas que les gens au pouvoir puissent se dire : la Science c'est l'ennemi !". Dès les premières promotions de Polytechniciens, on comptait un légitimiste, Cauchy, un républicain, Arago, et un orléaniste, Gay-Lussac...

Ajoutons que, comme pour toute histoire, la connaissance de l'histoire des sciences doit permettre d'éviter la répétition de certaines erreurs. Lorsqu'on voit aujourd'hui se bousculer les publications sur la découverte de tel ou tel gène du comportement (de la violence, de la dépression, de la prise de risque, de l'homosexualité, de l'intelligence), on ne peut qu'avoir envie de conseiller aux découvreurs forcenés de gènes comportementaux de se plonger dans l'histoire de la phrénologie, dans la période où l'on découvrait, à flot continu, la bosse de la violence, de l'ambition, de la criminalité, de l'autorité, sans compter la célèbre bosse des maths. Ce n'est pas parce que l'on remplace le mot bosse par le mot gène que l'on est forcément plus pertinent.



## HISTOIRE DES SCIENCES ET ENSEIGNEMENT

N'étant ni un enseignant, ni un professionnel de l'histoire des sciences, je ne peux avoir, sur ce sujet, qu'un point de vue très modeste. Je suis cependant un admirateur et un bon connaisseur d'un des plus grands historiens et philosophe des sciences, auteur aussi d'un système philosophique complet extrêmement intéressant, le positivisme; il s'agit évidemment d'Auguste Comte.

Dès la deuxième leçon du Cours de Philosophie Positive, Auguste Comte consacre cinq pages au sujet. Et il écrit cette phrase, souvent citée : "On ne connaît pas complètement une science tant qu'on n'en sait pas l'histoire". Et encore ceci, plus général : "Une conception quelconque ne peut être bien connue que par son histoire".

Mais il ne faut pas, comme on le fait généralement, s'arrêter là, car on trahit alors complètement Comte. Comte connaît trop bien les sciences, il est bien plus nuancé qu'on ne le pense généralement. Voici exactement ce qu'il écrit :

*"Toute science peut être exposée suivant deux marches essentiellement distinctes, dont tout autre mode d'exposition ne saurait être qu'une combinaison, la marche historique et la marche dogmatique.*



Claude-Louis BERTHOLLET  
(1748 - 1822)

*Par le premier procédé, on expose successivement les connaissances dans le même ordre effectif suivant lequel l'esprit humain les a réellement obtenues, et en adoptant, autant que possible, les mêmes voies.*

*Par le second procédé, on présente le système des idées tel qu'il pourrait être conçu aujourd'hui par un seul esprit, qui, placé du point de vue convenable, et pourvu des connaissances suffisantes, s'occuperait de refaire la science dans son ensemble.*

*A mesure que la science fait des progrès, l'ordre historique d'exposition devient de plus en plus impraticable, par la trop longue suite d'intermédiaires qu'il obligerait l'esprit à parcourir; tandis que l'ordre dogmatique devient de plus en plus possible, en même temps que nécessaire, parce que de nouvelles conceptions permettent de présenter les découvertes antérieures sous un point de vue plus direct. La tendance constante de l'esprit humain, quant à l'exposition des connaissances, est donc de substituer de plus en plus à l'ordre historique l'ordre dogmatique.*

*Le problème général de l'éducation intellectuelle consiste à faire parvenir, en peu d'années, un seul entendement, le plus souvent médiocre, au même point de développement qui a été atteint, dans une longue suite de siècles, par un grand nombre de génies supérieurs... Il serait certainement*

*impossible d'atteindre le but proposé, si l'on voulait assujettir chaque esprit individuel à passer successivement par les mêmes intermédiaires qu'a dû suivre nécessairement le génie collectif de l'espèce humaine. De là, l'indispensable besoin de l'ordre dogmatique.*

*Ainsi, nous sommes certainement convaincus que la connaissance de l'histoire des sciences est de la plus haute importance. Je pense même qu'on ne connaît pas complètement une science tant qu'on n'en sait pas l'histoire. Mais cette étude doit être conçue comme entièrement séparée de l'étude propre et dogmatique de la science, sans laquelle même cette histoire ne serait pas intelligible."*

Comte a dit, à son habitude, clairement et superbement, l'essentiel. C'est-à-dire qu'il ne faut pas rêver ou cauchemarder, qu'on ne révolutionnera pas l'enseignement scientifique à partir de l'histoire des sciences, que l'exposé dogmatique restera nécessairement le mode principal d'enseignement. Mais pour stimuler ou satisfaire la curiosité intellectuelle, pour ceux qui veulent approfondir une science, pour ceux simplement qui veulent être des "honnêtes hommes", soucieux de comprendre le monde dans lequel ils vivent, pour ceux qui veulent faire de la recherche, l'histoire des sciences constitue un adjuvant indispensable.



Antoine-François de FOURCROY  
(1755 - 1809)

On ne connaît pas bien une science tant qu'on n'en sait pas l'histoire. Le monde dans lequel nous vivons a été façonné par l'aventure scientifique et technique de l'Occident; on ne le connaît pas, on ne peut le comprendre si l'on apprend pas un peu d'histoire des sciences.

Le grand biologiste et historien de la biologie qu'est Ernst Mayr a bien décrit, dans sa préface à l'histoire de la biologie, comment l'histoire des sciences doit naviguer entre les approches "progressistoides" (whiggish) et historicistes. Les premiers, explique-t-il, "jugent les scientifiques du passé à la lumière de leur contribution à la science telle que nous la connaissons aujourd'hui". Ils s'évitent ainsi d'avoir à rappeler beaucoup d'errements aujourd'hui peu compréhensibles, et incontestablement, la clarté de leur exposé y gagne beaucoup : il est facile de redécouvrir ce que l'on sait déjà. Les "historicistes" s'efforcent de ne faire appel qu'aux concepts de l'époque et veulent s'interdire les éclaircissements ultérieurs". Cette dernière approche exige trop d'efforts, et surtout, elle est tout simplement impossible, tellement prétentieuse. Nous ne pouvons tout simplement plus imaginer l'espace physique de la même façon qu'avant Descartes, ni réellement comprendre la chimie avant Lavoisier ou l'électricité avant Ampère. C'est justement ce qui fait leur grandeur ! Je crois donc qu'il faut s'efforcer de

rendre compte de l'environnement intellectuel, social, historique des savants, de faire ressortir ce qui dans leur démarche, s'inscrit dans la continuité ou, au contraire, introduit une rupture. Il est difficile de comprendre qui fut Paré sans évoquer si brièvement que ce soit, la médecine de son temps et les conflits corporatistes entre chirurgiens, barbiers et médecins, et cela peut nous permettre aussi de réfléchir sur la société actuelle.

### ● ● ● ● ● HISTOIRE DES SCIENCES ET RECHERCHE SCIENTIFIQUE

J'ai certainement eu tort de placer ce point presque à la fin de mon exposé, car c'est l'un de ceux que je considère comme très importants. Je crois que l'enseignement des sciences, tel qu'il est, possède un défaut important, celui de mal faire comprendre, de ne pas suffisamment expliquer ce qu'est cette activité bizarre qui a façonné notre civilisation, la recherche scientifique. La science en train de se faire n'a que peu de rapports avec celle que l'on enseigne. Là où le professeur se promène dans un jardin à la française structuré par des lois impeccablement taillées et de larges allées pavées d'irréfutables équations, le chercheur, lui, doit se déplacer dans un univers beau-

coup plus incertain ("à tâtons et parmi les ténèbres" disait Fermat, ce qui mettait Descartes en furie !). Ce que le bon professeur rend évident, naturel, compréhensible par tous, il a bien fallu que quelqu'un le découvre, et sa démarche a rarement été aussi rectiligne que dans les programmes et les livres scolaires".

Comme l'écrit Pierre-Gilles de Gennes, "ce monde ne s'est pas construit sans erreurs ni combats. Les lois physiques ne sont pas apparues tout à coup à tel ou tel chercheur". Il y aurait d'ailleurs beaucoup à dire, sur la notion, l'expression, le tic de langage si souvent utilisé de "révolution scientifique", expression trompeuse qui suggère une vérité brutalement révélée et fait oublier le caractère essentiellement continu du progrès scientifique : "Si le progrès n'est pas une accumulation historique, alors il est une forme absurde de miracle perpétuel". (Auguste Comte)

La recherche scientifique ne consiste pas à appliquer des théorèmes mathématiques ou des lois physiques, et cela n'est pas suffisamment expliqué dans notre enseignement. Un des atouts majeurs de l'histoire des sciences et de l'approche biographique, est précisément de permettre de mieux expliquer, de manière accessible à tous ce qu'est la recherche scientifique.

### ● ● ● ● ● HISTOIRE DES SCIENCES ET VULGARISATION SCIENTIFIQUE

J'en viens au dernier point de cet exposé, celui du lien entre vulgarisation scientifique et histoire des sciences.

Si je devais tirer une leçon de l'histoire des scientifiques français, c'est celle de l'importance de la vulgarisation scientifique. Le grand XVIII<sup>ème</sup> siècle français a été une époque durant laquelle la culture scientifique a connu une diffusion extraordinaire. La société s'est passionnée pour les sciences comme à aucune autre époque de notre histoire. Les philosophes étaient capables de discuter avec pertinence avec les savants des dernières recherches scientifiques. Ce siècle d'or de la science française a été ouvert par d'immenses savants, qui étaient en même temps de très grands vulgarisateurs. C'est, entre autres, Réaumur et Buffon pour l'histoire naturelle, Rouelle pour la chimie, Fontenelle et le très pittoresque abbé Nollet pour la physique. Est-ce un hasard si la France a ensuite connu une telle floraison de grands savants ? Et si, après la réaction contre l'enseignement napoléonien, la culture scientifique a été ensuite dévalorisée et la domination

française s'est progressivement évanouie ?

Il faut aussi noter que ces grands vulgarisateurs se sont tous appliqués à intéresser les femmes à l'aventure scientifique. Par exemple, le premier cours de chimie intégralement rédigé selon les principes de Lavoisier fut un cours de Fourcroy écrit pour la collection "la Bibliothèque des Dames", manuel fort sérieux qu'il utilisa également pour son cours à l'École vétérinaire. Il faudrait citer Mme du Châtelet, Mme Lavoisier, qui joua un rôle très important auprès de son mari, Sophie Germain, dans la génération suivante. Quelque chose a commencé, qui aurait pu changer, sinon la face de la science, du moins ses rapports avec la société : l'implication des femmes dans la vie scientifique. Malheureusement, cela s'est en partie arrêté.

Je suis persuadé que l'histoire des sciences peut beaucoup aider à la diffusion de la culture scientifique. Un de mes maîtres en matière d'histoire et de vulgarisation scientifique, c'est François Arago. Il existe sans doute des centaines de récits racontant l'invention de la pile électrique à partir des observations de Galvani et des travaux de Volta, qui sont parfois rébarbatifs, J'en connais un qui commence par "Mme Galvani était malade", et l'on nous raconte que Mme Galvani avait pris froid en se promenant dans des marais, que, comme l'on soignait le mal par son semblable, on lui avait administré des bouillons de grenouille, animal humide s'il en est. La maison était donc pleine de grenouilles démembrées; au milieu de ces grenouilles, M. Galvani pratiquait des expériences avec l'étincelle électrique. Et c'est parti, le lecteur est pris, embarqué dans les querelles sur l'électricité animale, et tout le reste coule facilement, sans complication excessive. Ça, c'est Arago.

Au nom de cette mission de vulgarisation scientifique, je défends même l'idée que, en histoire des sciences comme en histoire générale, on a le droit de raconter des histoires, de romancer. Pourquoi pas des Alexandre Dumas de l'histoire des sciences ? Dans un superbe livre, finalement très peu romancé, "La tentation de Vénus", l'astronome Jean-Pierre Luminet a narré un épisode de la vie de Lalande. Arago a fait bien pire lorsqu'il raconte que, lors de la première ascension en ballon à but scientifique, Gay-Lussac, pour grimper plus haut (il atteignit 8000 mètres environ), jeta une chaise en bois blanc hors de son ballon. Sous le ballon, il y avait une couverture nuageuse, et sous la couverture nuageuse, des bergers. Ceux-ci virent avec stupéfaction descendre du ciel cette modeste chaise et se demandèrent avec per-

plexité comment le paradis était meublé ? Le peu de confort de l'exemplaire qu'ils avaient sous les yeux leur aurait fait douter des descriptions qu'on leur avait faites... Anecdote vraie ou fausse ? Peu importe, je pense qu'on a le droit de l'écrire dans un livre d'histoire des sciences si elle rend le récit plus intéressant. Pourquoi l'histoire des sciences n'aurait-elle pas le droit d'amuser, pourquoi devrait-elle être plus sérieuse, plus ennuyeuse que l'histoire générale ?

Cette vulgarisation de la culture scientifique par l'histoire des sciences me paraît essentielle. Elle permet de faire connaître leur histoire à des scientifiques qui l'ignorent trop souvent, et aussi d'intéresser à la culture scientifique ceux à qui le mot de sciences fait peur, ceux que l'enseignement actuel

ont tellement marqué le paysage ? Les polémiques entre Pascal et Descartes peuvent-elle être absentes des cours de philosophie, alors qu'elles développent déjà toutes les interrogations sur la nature de la science et la complémentarité des approches théoriques et empiriques ?

● ● ● ● ●  
**DÉFENDRE LE PROGRÈS  
CONTINUER  
NOTRE HISTOIRE**

Ainsi que l'a écrit Pierre-Gilles De Gennes, nous vivons des temps délicats où l'esprit scientifique est contesté, voire en régression. Les adversaires de l'esprit scientifique ne sont d'ailleurs pas forcément les plus bruyants. Je suis



Louis Bernard GUYTON de MORVEAU (1737 - 1816)

des sciences n'a pas séduits, voire a effrayés. En ce sens, l'histoire des sciences est une excellente discipline plurielle, pour reprendre une expression à la mode. Il ne faudrait pas que l'histoire des sciences soit réservée aux scientifiques. Peut-on imaginer, alors que l'histoire de l'Occident est avant tout une extraordinaire aventure scientifique et technique, que l'histoire des sciences soit absente des cours d'histoire ? Peut-on imaginer qu'elle soit absente des cours de géographie alors que, surtout dans notre vieille Europe, la succession, l'évolution des tech-

par exemple frappé de la montée en puissance de la classe des juristes. C'est une voie sur laquelle l'Amérique nous a précédés, et qui rappelle d'ailleurs la France de l'Ancien Régime. Même dans le domaine qui est le mien, celui de la recherche pharmaceutique, on voit les géants américains, notamment à partir des brevets sur la génomique, tenter de dynamiter complètement le système des brevets de façon à créer une insécurité juridique totale, qui ne profitera qu'aux firmes qui pourront mobiliser le plus d'avocats pendant le plus longtemps. Il n'est pas

absurde qu'un lawyer dirige un jour un centre de recherche pharmaceutique.

Nous avons en France une situation un peu particulière, dans laquelle pendant longtemps, même si c'est peut-être moins le cas aujourd'hui, les sciences, et singulièrement les mathématiques ont servi d'instruments privilégiés de sélection. Cette situation n'avait pas que des désavantages. Les élites françaises recevaient ainsi presque toutes une bonne formation scientifique de base.

Mais elle est extrêmement fragile. Une de ses conséquences, c'est que la plupart des élèves des sections scientifiques font des sciences parce qu'on leur assure que c'est bon pour leur avenir, et non par goût. Puisque de toute façon, les meilleurs élèves venaient

dans les sections scientifiques, on n'avait guère besoin de convaincre que la science, c'est intéressant, passionnant, utile, indispensable. Nous avons oublié de rendre la science séduisante

Or l'aventure scientifique et technique, le progrès, dont la notion même est aujourd'hui contestée, tout ce qui constitue le destin caractéristique de l'Occident ("Nous rendre comme maître et possesseur du monde"), tout cela est aujourd'hui en péril. Et tout cela ne pourra continuer que si la science et les scientifiques retrouvent le soutien, un soutien enthousiaste de l'ensemble de la société. Si nous ne sommes pas capables de dire à quel point la science, le progrès, c'est bon, c'est bien, c'est utile, c'est excitant, personne ne le fera à notre place.

J'ai la conviction que dans cette reconquête, dans cette nouvelle Renaissance, qu'il nous faudra accomplir, cette passion de toute une société pour la science qu'il nous faudra retrouver, comme à la Renaissance, comme au XVIIIème siècle, l'histoire des sciences et la vulgarisation scientifique peuvent apporter une aide déterminante. Faire de l'histoire des sciences, faire de la vulgarisation scientifique n'est pas neutre, n'est pas innocent. C'est affirmer notre volonté de continuer sur la voie du progrès scientifique et technique, de continuer ce qui constitue le destin caractéristique de l'Occident, de continuer notre histoire, celle d'un grand pays scientifique.

*Illustrations tirées du Bulletin de la Société des Amis de la Bibliothèque de l'Ecole Polytechnique (n° 4 - 5 - 23).*

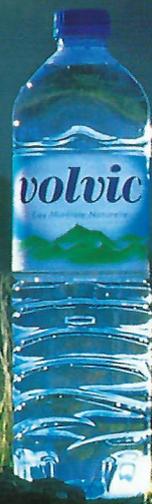
## Création du réseau ALFA

(Auvergne, Logistique, Formation, Action)

le 25 janvier 2000



*Photo : Bernard Saint-Girons, Recteur de l'Académie de Clermont-Ferrand  
Madame Monique Durantin, Proviseur du lycée Piere Boulanger  
Jean-Marc Bayer, Directeur logistique de la CCI  
Xavier Muller, Délégué Régional de l'AFT-IFTIM  
Bernard Promongeau, Président de l'AFT-IFTIM  
Michel Troquet, Directeur du CUST.  
(Voir notre supplément pédagogique)*



**VOLVIC,  
LA NATURE  
VOUS AIME  
DE TOUTES  
SES FORCES.**