

AUVERGNE

Sciences

N° 49 - DÉCEMBRE 2000

LA MÉCANIQUE DU CHAOS

LES ORGANISMES

GÉNÉTIQUEMENT MODIFIÉS

SCIENCE INTERNALISTE

SCIENCE EXTERNALISTE

BULLETIN DE L'ADASTA

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

Éditorial

Voici la dernière revue du XX^e siècle et du 2^e millénaire. La nouvelle équipe d'animateurs scientifiques qualifiés, bénévoles, issus du milieu associatif, industriel, du secteur bancaire, de l'Université, etc.. contribuent à la poursuite du développement culturel scientifique de notre région grâce à la persévérance et au volontarisme des équipes précédentes.

Tout cela est largement diffusé dans la revue Auvergne-Sciences dont la rédaction est assurée par notre éminente collègue Jocelyne Allée qui sait rendre très attractifs des articles spécifiques tels que "la mécanique du chaos" par Charles Ruhla ou des sujets d'actualité sur les OGM par exemple.

L'écho de l'A.D.A.S.T.A. résonne dans toute la région, des Combrailles au Forez et dans les administrations : Rectorat, Préfecture et Mairie.

A l'occasion de la Fête de la Science, à l'initiative du Ministère de la Recherche et du Ministère de l'Éducation Nationale, l'A.D.A.S.T.A. par son empreinte régionale et nationale fut sollicitée par les lycées et les



J.C. Capelani

collèges : elle sait répondre présent grâce à ses bénévoles.

En effet tous ses membres sans exception œuvrent avec enthousiasme afin de mieux faire connaître et aimer la culture scientifique. Ils organisent des visites, des conférences, des expériences et bientôt

un développement informatique en réseau, à l'attention des enfants, des adolescents et des enseignants sera mis en place au siège de l'association.

La presse écrite, la radio et maintenant la télévision, nous sollicitent pour des interviews. Madame Suzanne Gély responsable des relations avec l'enseignement du second degré, de la Fête de la Science et prochainement d'Expo Science fut accueillie dans les studios de Clermont 1 ère à cette occasion.

Et pour clore cet éditorial, je reprends la pensée d'Ampère citée par Madame Gély lors de l'émission sur Clermont 1 ère : "Le but de la Science ne doit pas être de rendre les hommes heureux mais de les rendre meilleurs".

Le Président de l'A.D.A.S.T.A.,
J.C. CAPELANI

NECROLOGIE

Un ami nous a quittés...

C'est avec tristesse et émotion que nous avons appris le décès brutal de Henri Millon : c'était pour nous un collègue sûr et fidèle toujours prêt à collaborer, à rendre service. Ses obsèques ont été célébrées le 23 septembre 2000 en présence d'une nombreuse assistance. Nous présentons à sa famille nos très sincères condoléances.

Merci à nos sponsors



MINISTÈRE
DE LA RECHERCHE
ET DE LA TECHNOLOGIE



Comité de rédaction de la Revue Auvergne-Sciences

Président : Paul Avan - Rédactrice : Jocelyne Allée
Membres : Jean-Claude Capelani, Luc Dettwiller, Paul-Louis Hennequin, Roland Jouanisson, Michel Naranjo.

sommaire

La mécanique du chaos.....	3
La rédaction des principes.....	11
Les OGM d'origine végétale.....	12
La sucrerie Bourdon.....	15
Science internaliste, science externaliste.....	23
Activités.....	30
Le Musée des Arts et Métiers.....	31

Photo de Couverture :
Sucrerie Bourdon (M. Profit)

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

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

La mécanique du chaos

Charles RUHLA

Professeur émérite de l'Université
Claude Bernard - LYON

La Science nous offre une représentation rationnelle du monde qui est particulièrement séduisante mais elle ne serait qu'un langage si cette représentation n'avait aucune valeur opérationnelle. Ce qui fait la valeur de la Science c'est d'être un instrument de prévision efficace qui nous donne un pouvoir sur la Nature. La validation d'une théorie nouvelle passe toujours par la réalisation d'une expérience nouvelle qui vérifie la théorie. Il en est ainsi par exemple de la mécanique céleste qui nous permet de prévoir, pour les quelques années à venir, le mouvement des objets du système solaire avec une très grande précision. Ce caractère opérationnel ne s'applique pas seulement aux objets naturels, comme les planètes, mais aussi à des objets artificiels, créés par les hommes, comme les satellites ou les sondes spatiales. Ainsi, la mécanique céleste classique apparaît-elle comme la meilleure expression du déterminisme triomphant tel que le définissait Pierre Simon de Laplace en 1814 :

“ Une intelligence qui, pour un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée, et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans une même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir comme le passé serait présent à ses yeux. L'esprit humain offre, dans la perfection qu'il a su donner à l'astronomie, une faible esquisse de cette intelligence ”.

Ces idées laplaciennes ont porté toute la physique du 19^e siècle jusqu'à ce qu'intervienne Henri Poincaré, en 1889, montrant les limites pratiques du déterminisme en physique macroscopique et ouvrant ainsi la voie à la théorie du chaos. Le présent article a pour objectif de suivre l'évolution de la mécanique classique depuis ses origines jusqu'à l'an 2000 et de montrer à

cette occasion que son classicisme contenait en germe des richesses insoupçonnées qui nous apparaissent aujourd'hui inépuisables.



LE DETERMINISME EN ACTION

Le déterminisme idéal s'illustre très bien par un problème de balistique cher aux élèves de terminale (figure 2) :

Un canon, placé au point O, avec un angle de hausse α , tire un obus dans le vide avec une vitesse initiale v_0 . Après avoir décrit une trajectoire parabolique l'obus retombe sur le sol en un point I. L'application des lois de la mécanique donne alors la portée du canon sous la forme : $OI = (2 v_0^2 \sin \alpha \cos \alpha)/g$. Si, comme cela est fréquent pour les problèmes de physique proposés au lycée, on donne pour les grandeurs physiques des valeurs rigoureusement exactes telles que $g = 10 \text{ m.s}^{-2}$, $v_0 = 200 \text{ m.s}^{-1}$, $\alpha = 45^\circ$, on peut calculer la portée OI avec exactitude et l'on trou-



Pierre Simon de Laplace (1749-1827)

ve ainsi $OI = 4000 \text{ m}$. Ce modeste exemple nous conduit à définir le déterminisme :

“ On dit qu'il y a déterminisme au sens idéal si la connaissance exacte des conditions initiales et des lois d'interaction d'un système physique permet de prévoir son avenir avec exactitude ”.

On remarquera que cela suppose que l'on ait des valeurs numériques exactes mais aussi que les lois d'interaction soient représentées par des équations pouvant être résolues mathématiquement avec exactitude.

Le déterminisme pratique peut très bien lui aussi être introduit par la même expérience de balistique mais en tenant compte de toute la réalité du phénomène :

- D'abord, l'expérience a lieu dans l'atmosphère et non pas dans le vide,

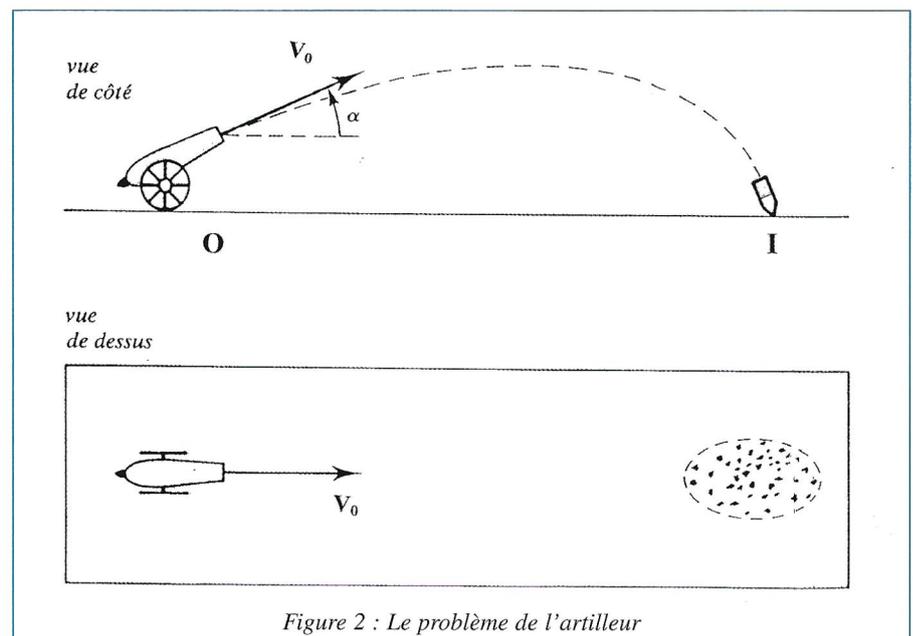


Figure 2 : Le problème de l'artilleur

et le frottement de l'obus sur l'air infléchit la trajectoire ; elle réduit la portée d'une valeur parfaitement calculable car on connaît bien les lois de la résistance de l'air.

- Ensuite, le tir comporte un aspect aléatoire : les valeurs initiales v_0 et α ne sont définies qu'avec une limite de précision car la précision absolue n'existe pas. De même, l'air libre, même sans vent, est le siège de fluctuations de densité qui font varier aléatoirement sa résistance. Si l'on procède successivement à une suite de tirs avec le même canon, avec des obus tous issus d'une même série, et en choisissant toujours la même hausse α , l'imprécision aléatoire sur la définition effective des conditions initiales entraîne que les obus n'atterrissent pas tous au point I, extrémité de la trajectoire idéale, mais se répartissent au hasard autour de I sur une surface que les artilleurs appellent ellipse de dispersion (figure 2). Les dimensions de l'ellipse de dispersion définissent la précision du tir. Ceci nous conduit à une définition pratique du déterminisme.

“ On dit qu'il y a déterminisme au sens pratique si la connaissance précise des conditions initiales et des lois d'interaction d'un système physique permet de prévoir son avenir avec précision ”.

La nature profonde du déterminisme peut être mieux comprise si l'on analyse la notion de précision. Revenant à la

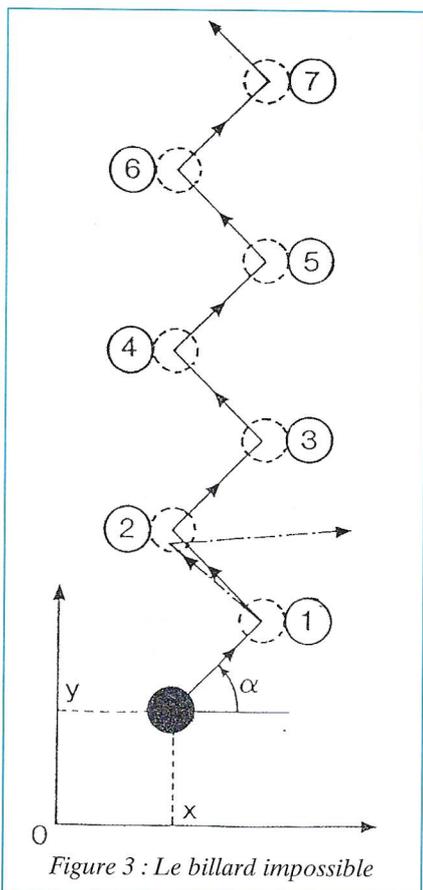


Figure 3 : Le billard impossible

ballistique on peut se demander quelle est la conséquence à l'arrivée d'un écart au départ de 1 ou 2 ou 3 minutes d'angle dans la visée horizontale. Pour une portée de 4000 m on trouve par un calcul trigonométrique élémentaire que l'écart à l'arrivée sera de 1,2 m, ou 2,4 m, ou 3,6 m.

Ainsi, la croissance des écarts dans l'état final est proportionnelle à la croissance des écarts de l'état initial et cette croissance limitée permet en pratique le pointage. Ceci nous conduit à une définition améliorée du déterminisme :

“ Un système physique est déterministe si une petite variation des conditions initiales n'entraîne par interaction qu'une petite variation proportionnelle des conditions finales ”.

En revanche, il existe des systèmes mécaniques macroscopiques, pour lesquels la croissance des écarts dans les conditions finales est exponentielle et nous allons voir que dans ce cas, tout pointage devient impossible.



LE BILLARD IMPOSSIBLE

Sur le plan horizontal d'un billard classique on a placé 7 butoirs cylindriques blancs numérotés de 1 à 7, et une boule noire. La disposition géométrique de ces différents éléments est bien apparente sur la figure 3 et suggère l'énoncé d'un joli problème :

“ Est-il possible en un seul jet de lancer la boule noire de façon qu'elle atteigne le butoir numéro 7 après avoir rebondi élastiquement et dans l'ordre sur les butoirs numérotés de 1 à 6 ? ”.

Cet énoncé appelle deux questions complémentaires :

Y a-t-il une solution ? La réponse est oui ; si, dans la géométrie de figure proposée, on lance la boule noire dans la direction définie par l'angle α , la boule décrit une trajectoire régulière en dents de scie qui l'amène jusqu'au butoir 7 (figure 3).

Si cette solution existe, y a-t-il un joueur assez habile pour réussir ? La réponse est non car le pointage dans la bonne direction est d'une difficulté extrême. Sur la figure 3 on a représenté l'effet d'un écart initial de $0,5^\circ$ par rapport à la valeur correcte α . Invisible sur la figure avant le butoir 1, l'écart est multiplié par 9 après le premier rebondissement, puis encore par 9 après le deuxième rebondissement*. L'écart par rapport à la trajectoire correcte passe donc de $0,5^\circ$ à $4,5^\circ$ puis à

$40,5^\circ$ ce qui entraîne l'échec car on n'atteint pas le butoir 3. Encore plus éloquent est le calcul des “ fenêtres ” de tir :

* Ce facteur 9 a été calculé en utilisant une relation particulière des miroirs sphériques : $\varepsilon' = \varepsilon [1 + 2d / (R \cos \varphi)]$

Pour plus d'information, voir “ La physique du hasard ” page 158

- Pour atteindre 1 butoir la fenêtre est égale à : 32°

- Pour atteindre 2 butoirs la fenêtre est égale à : $3,6^\circ$

- Pour atteindre 3 butoirs la fenêtre est égale à : $0,40^\circ$

- Pour atteindre 4 butoirs la fenêtre est égale à : $0,044^\circ$

- Pour atteindre 5 butoirs la fenêtre est égale à : $0,0049^\circ$

- Pour atteindre 6 butoirs la fenêtre est égale à : $0,00054^\circ$

- Pour atteindre 7 butoirs la fenêtre est égale à : $0,000060^\circ$ ($0,22''$)

Un joueur moyen peut atteindre deux butoirs ; un bon joueur peut atteindre trois butoirs ; un champion peut atteindre quatre butoirs et personne ne peut faire mieux. Un système sophistiqué de lancement mécanique pourrait dépasser les performances humaines mais on n'atteindrait jamais le butoir 7 qui exige une précision de pointage supérieure à celle des meilleurs instruments astronomiques. C'est le caractère multiplicatif des écarts à chaque rebond qui entraîne la difficulté extrême du pointage et rend impossible la prévision de la trajectoire de la boule.

“ Un système physique macroscopique pour lequel une croissance lente de l'écart initial conduit à une croissance très rapide de l'écart final n'est pas déterministe en pratique parce que son avenir est imprévisible ”.

Un tel système est donc déterministe au sens idéal, puisque l'on est capable de calculer la trajectoire idéale, mais indéterministe en fait en raison de la très grande sensibilité à la définition des conditions initiales. Nous allons voir maintenant sur un deuxième exemple comment cet indéterminisme pratique conduit à un mouvement désordonné qualifié de chaotique.



LA BOUSSE AFFOLEE

Une aiguille aimantée est placée dans un champ magnétique fixe B_1 parallèle à la composante horizontale du champ

magnétique terrestre (figure 4). Libérée sans vitesse initiale avec l'élongation θ , elle oscille de façon régulière et ce mouvement est prévisible car nous sommes dans une situation déterministe. La théorie du phénomène, en négligeant les frottements qui sont très faibles, nous conduit à une équation différentielle :

$$\theta'' + (\omega_1)^2 \sin \theta = 0 \quad (1)$$

- $\omega_1 = (M B_1/J)^{1/2}$
- M moment magnétique de l'aiguille aimantée
- J moment d'inertie de l'aiguille aimantée

Cette équation devient linéaire si l'on

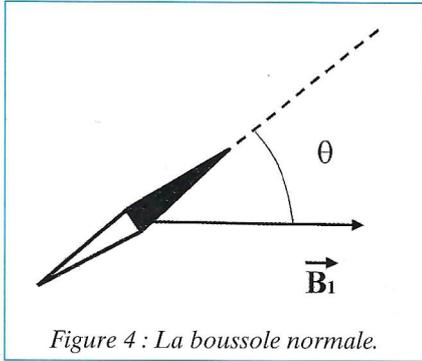


Figure 4 : La boussole normale.

remplace $\sin \theta$ par θ , ce qui est légitime pour les petites amplitudes, et sa résolution devient alors très simple. On obtient : $\theta = \theta_0 \cos \omega_1 t$ où θ_0 est l'élongation initiale de l'aiguille aimantée abandonnée sans vitesse initiale au temps $t = 0$.

On ajoute au champ fixe B_1 un champ tournant B_2 en plaçant autour de l'aiguille aimantée un ensemble de quatre bobines alimentées deux à deux par des courants sinusoïdaux en quadrature (figure 5). Ce champ tourne avec une vitesse angulaire ω_0 et sa phase est $\varphi = \omega_0 t$.

Dès que l'on ajoute le champ B_2 , l'aiguille aimantée s'anime d'un mouvement désordonné et chaque fois que l'on recommence l'expérience ce mouvement est différent car le système est extrêmement sensible à la définition

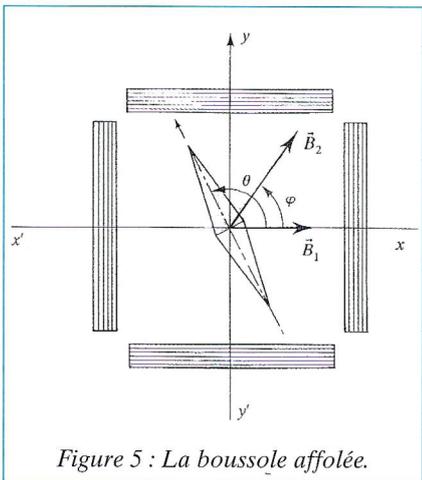


Figure 5 : La boussole affolée.

des conditions initiales et il est impossible de faire successivement deux mises en route identiques. Ce mouvement désordonné, baptisé chaotique, résulte de la concurrence permanente entre les effets des champs B_1 et B_2 sur l'aiguille aimantée qui tantôt suit l'un, tantôt suit l'autre. L'équation différentielle du mouvement s'écrit :

$$\theta'' + K\theta' + (\omega_1)^2 \cos \theta + (\omega_2)^2 \cos(\theta - \omega_0 t) = 0 \quad (2)$$

- $\omega_1 = (M B_1/J)^{1/2}$
- $\omega_2 = (M B_2/J)^{1/2}$

Le terme $K\theta'$ correspond à un frottement liquide qui peut être négligé si l'aiguille aimantée ne baigne pas dans un bain d'huile. Toutefois, même en supprimant ce terme de frottement, il nous reste une équation différentielle non linéaire pour laquelle il n'existe pas de solution générale exacte. Seule une intégration numérique permet d'obtenir une solution approchée par approximations successives. Encore faut-il préciser que la qualité de cette solution dépend fortement de la précision avec laquelle sont définies les conditions initiales et sont menés les calculs.

Comparons le tir au canon et l'affolement de la boussole :

- Le tir au canon dépend de deux paramètres initiaux α et v_0 , et donne lieu à une prévision déterministe.
- Le mouvement de la boussole dépend de trois paramètres initiaux θ_0 , θ_0' et φ_0 ; il donne lieu à un mouvement désordonné imprévisible.

Nous avons maintenant en main tous les éléments pour définir le chaos :

“ Le chaos est le mouvement désordonné imprévisible d'un système physique macroscopique très sensible à la définition des conditions initiales, dépendant d'au moins trois paramètres et régi par une équation différentielle non linéaire ”.



L'ESPACE DE PHASE

Notre première approche du chaos nous a fait réaliser la difficulté de trouver des solutions exactes ou même approchées à des équations non linéaires et ceci nous amène à la recherche d'une représentation qui nous permettrait d'accéder plus simplement à des solutions qualitatives. C'est le moment d'introduire l'espace de phase.

Dans le cas simple de la boussole normale, l'espace de phase a deux dimensions θ et θ' ; L'état dynamique de l'aiguille aimantée à un instant donné est représenté par le point de coordonnées :

- $\theta = \theta_0 \cos \omega_1 t$
- $\theta' = -\omega_1 \theta_0 \sin \omega_1 t$

En fonction du temps ce point décrit une ellipse qui est la trajectoire de phase et cette trajectoire de phase contient toutes les informations sur le mouvement de l'aiguille aimantée dès qu'elle est abandonnée avec les conditions initiales θ_0 et θ_0' . Par exemple, si l'aiguille est abandonnée avec une élongation θ_0 et une vitesse nulle $\theta_0' = 0$, l'état initial sera représenté par le point P et le mouvement qui suit par le déplacement de ce point P dans le sens de la flèche (figure 6).

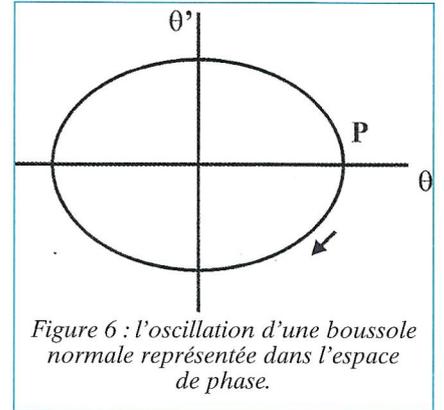


Figure 6 : L'oscillation d'une boussole normale représentée dans l'espace de phase.

Pour une élongation initiale plus grande, la trajectoire de phase est une ellipse plus grande et l'on obtient ainsi une infinité de trajectoires de phase qui se divisent en deux groupes :

- Pour les mouvements oscillatoires de l'aiguille, la trajectoire de phase est toujours une ellipse fermée sur elle-même.
- Pour les mouvements de rotation complète de l'aiguille, qui se produisent si θ_0' est grand, la trajectoire de phase est ouverte.
- Entre les deux groupes se situe une courbe limite : la séparatrice (figure 7).

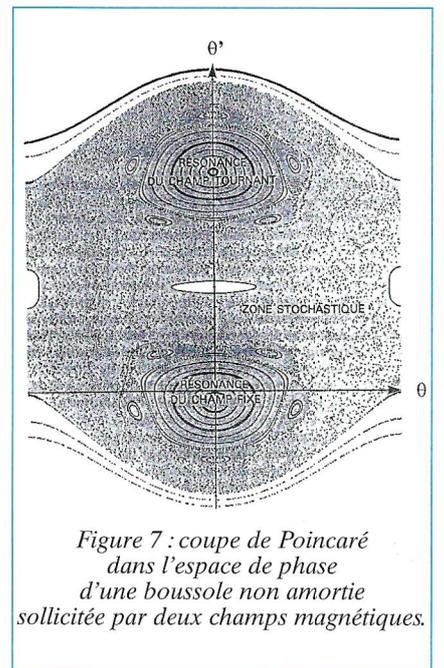


Figure 7 : coupe de Poincaré dans l'espace de phase d'une boussole non amortie sollicitée par deux champs magnétiques.

Enfin il faut souligner que les trajectoires de phase ne se coupent jamais. Si tel était le cas, le point d'intersection correspondrait à un état initial θ_0 et θ'_0 pouvant conduire à deux avènements distincts pour le système ce qui est en contradiction avec le déterminisme au sens idéal du terme.

Avec l'introduction du champ tournant B2, l'état dynamique du système dépend maintenant de trois paramètres et il faut pour le décrire un espace de phase à trois dimensions θ , θ' et φ . La trajectoire de phase prend alors une forme très contournée dont l'aspect est difficile à appréhender. C'est là que l'imagination féconde de Henri Poincaré nous conduit à une représentation plus simple et plus lisible. Puisque φ est un angle, sa périodicité est 2π et il est inutile de le faire croître jusqu'à l'infini. Il suffit de repérer la trajectoire en la coupant par des plans verticaux de coordonnées $0, 2\pi, 4\pi...$ et de projeter les points d'intersection P1, P2, P3... ainsi obtenus sur le plan θ, θ' . On est ramené alors à une représentation à deux dimensions baptisée coupe de Poincaré (figure 7). Sur cette coupe apparaissent très nettement les deux régimes dynamiques du système :

- Des régions où les points se distribuent sur des courbes fermées régulières qui correspondent aux situations où l'aiguille est en résonance avec le champ fixe B1 ou le champ tournant B2.
- Des régions où les points se distribuent de façon tout à fait désordonnée qui correspondent aux situations où l'aiguille est animée d'un mouvement chaotique.

Cette coupe de Poincaré a été obtenue par calcul sur ordinateur à partir de l'équation différentielle (2) sans le terme de frottement $K\theta'$.

Ainsi, bien que l'on ne puisse pas résoudre exactement et complètement cette équation différentielle, l'approche de la coupe de Poincaré nous permet de trouver avec précision les conditions initiales θ_0 et θ'_0 à réaliser pour obtenir un mouvement déterministe ou un mouvement chaotique.

L'introduction dans l'équation (2) du terme de frottement $K\theta'$ signifie que le système est dissipatif, ce qui veut dire que de l'énergie mécanique est dissipée sous forme de chaleur. L'aiguille aimantée ne s'immobilise pas pour autant car son mouvement chaotique est entretenu par le champ tournant qui injecte en permanence de l'énergie dans le système. On constate alors que la coupe de Poincaré se simplifie encore pour donner un ensemble de points formant une figure très étonnante, de structure feuilletée, que l'on a baptisée "attracteur étrange" ; cette structure

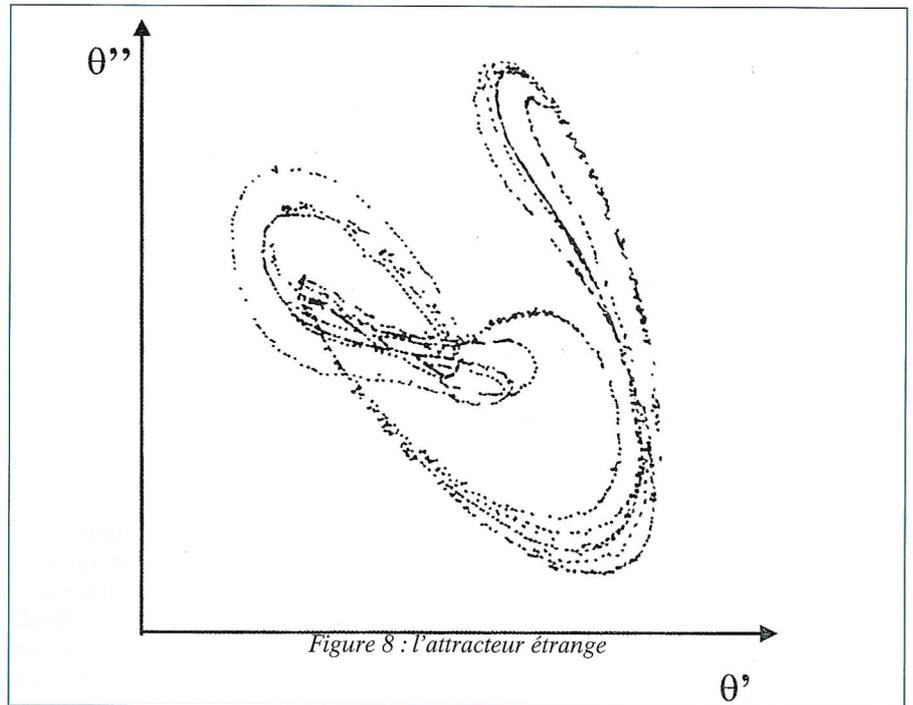


Figure 8 : l'attracteur étrange

feuilletée se maintient quelle que soit l'échelle à laquelle on l'observe, ce qui veut dire que l'attracteur étrange a une structure fractale (figure 8)*.

“ L'attracteur étrange est une région limitée de la coupe de Poincaré sur laquelle viennent s'accumuler sans jamais se couper les trajectoires de phase d'un système dissipatif entretenu, ayant au moins trois degrés de liberté dans l'espace de phase, une grande sensibilité aux conditions initiales, et un mouvement chaotique ”. L'attracteur étrange représente l'ordre dans le chaos.

* On choisit les variables de l'espace de phase qui donnent la représentation la plus simple. Dans la figure 8 ces variables sont θ' et θ'' .

L'ordinateur reçoit de ces bobines les signaux θ' et θ'' et, en plus, un signal pilote issu de l'oscillateur de fréquence $\omega_0 / 2\pi$. Les signaux sont traités par un programme approprié calculant directement une coupe de Poincaré dans l'espace de phase θ', θ'' et l'on voit se construire l'attracteur étrange en temps réel sur l'écran (figure 8).

Cette expérience est en elle-même un petit exploit : la moindre imperfection dans la qualité du pivot suffirait à brouiller complètement l'image dans l'espace de phase. Elle valide définitivement cette notion d'ordre dans le chaos représentée par l'attracteur étrange.

DE LA THEORIE A L'EXPERIENCE

Tous les résultats que nous venons de présenter sont issus de calculs numériques sur ordinateur à partir de l'équation (2). Cette équation elle-même ne

peut être mise en doute puisqu'elle repose sur les lois éprouvées de l'électromagnétisme. L'existence de l'attracteur étrange, issue d'un calcul théorique, est donc certaine. Mais la preuve de son existence serait encore meilleure si l'on pouvait extraire l'attracteur

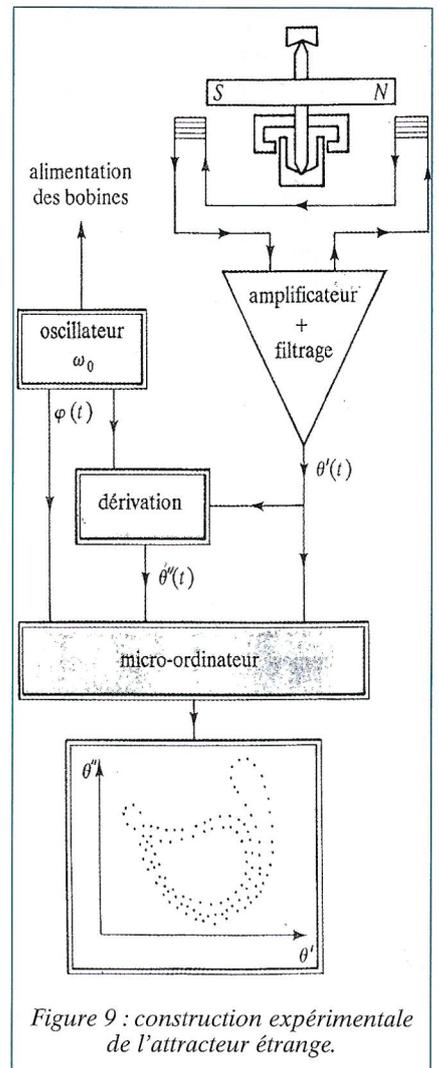


Figure 9 : construction expérimentale de l'attracteur étrange.

étrange directement de l'expérience. C'est ce qui a été réalisé en 1981 par un physicien français, Vincent Croquette.

Cette expérience de recherche (figure 9) est calquée sur l'expérience de démonstration (figure 5) mais tous les éléments sont particulièrement soignés pour pouvoir réaliser des mesures rigoureuses et fiables. Le barreau aimanté tourne sur un axe défini par deux pointeaux ; on lui adjoint deux palettes symétriques plongeant dans un bain d'huile afin de fournir un frottement liquide. Pour simplifier le schéma on n'a pas représenté les bobines créant le champ fixe et le champ tournant mais, en revanche, on a représenté les deux bobines détectrices qui, par induction, donnent un courant proportionnel à θ' .

Avec cette première partie nous venons donc d'introduire la physique du chaos par la voie qui nous a paru pédagogiquement la plus simple. Cette voie pédagogique n'est pas la voie historique : la physique du chaos a été créée par Henri Poincaré en utilisant une voie bien plus difficile, celle de la mécanique céleste. C'est une belle histoire, qui mérite d'être racontée, et qui se poursuit aujourd'hui par la découverte du chaos dans le système solaire.

BREVE HISTOIRE DES SYSTEMES DU MONDE

Depuis la plus haute antiquité les hommes observent les mouvements des astres dans le ciel et les peuples méditerranéens sont particulièrement bien servis par un ciel très pur. Ils ne manquent pas de se rendre compte, de visu, que le Soleil, la Lune et les étoiles tournent autour de la Terre et tout serait pour le mieux dans le meilleur des systèmes du monde possibles s'il n'y avait pas des astres errants au mouvement tantôt direct, tantôt rétrograde, qu'ils ont baptisés planètes. Après plusieurs tentatives, émerge chez les Grecs un système cohérent proposé par Ptolémée en 140 après J.C.

Ptolémée place la Terre au centre du monde, ce qui correspond parfaitement à l'observation directe. Autour d'elle tournent, d'un mouvement circulaire uniforme, le Soleil, la Lune, et la voûte céleste. Quant aux planètes, elles tournent également autour de la Terre, mais sur des trajectoires plus complexes, les épicycles, combinaison de deux cercles, et l'on explique ainsi que leur mouvement puisse être rétrograde à certaines périodes. Ce système permet des prévisions des phénomènes célestes tels que les éclipses avec une

fiabilité assez bonne compte tenu de la précision des mesures de l'époque.

Le mouvement circulaire uniforme est la base du système. Il est même érigé en symbole de régularité, d'harmonie, et d'immuabilité.

Copernic propose en 1543, un système plus simple. Le Soleil est au centre du monde tandis qu'autour de lui, la Terre et les autres planètes tournent d'un mouvement circulaire uniforme. Il n'y a que la Lune qui tourne autour de la Terre. Les prévisions qu'il permet sont aussi bonnes mais pas vraiment meilleures que celles données par le système de Ptolémée. L'argument de la simplicité est en faveur de Copernic mais c'est un argument théorique ; l'expérience n'a pas encore tranché.

Le dogme de l'immuabilité du mouvement circulaire uniforme demeure inchangé.

Tycho Brahé propose en 1577 un système mixte. La Terre est au centre du monde ; autour d'elle tournent le Soleil et la Lune tandis que les planètes tournent autour du Soleil. Tous ces mouvements sont circulaires uniformes et le système de Tycho Brahé est cinématiquement équivalent au système de Copernic. Il semble mieux conforme à l'observation de visu et, en bon observateur, Tycho Brahé préfère s'en tenir à l'immobilité de la Terre tant que l'expérience ne tranche pas en faveur de Copernic.

Le dogme de l'immuabilité du mouvement circulaire uniforme demeure inchangé.

Képler précise en 1609 le système de Copernic. Utilisant les résultats des observations de Tycho Brahé, qui sont d'une précision remarquable, il crée un nouveau système du monde qui sert toujours de base aux calculs d'aujourd'hui. Les cercles sont remplacés par des ellipses ; les mouvements des planètes et des satellites sont caractérisés par la loi des aires ; les périodes de révolution des planètes sont reliées aux dimensions de l'orbite. Avec ces trois lois de Képler les prévisions des éphémérides astronomiques sont bien améliorées.

L'harmonie du mouvement circulaire uniforme est abandonnée mais le dogme de l'immuabilité est conservé.

Newton introduit en 1687 une cause unique, la gravitation universelle. La force attractive exercée par le Soleil sur les planètes explique les orbites et les mouvements découverts par Képler. Cela montre en particulier que le système de Tycho Brahé n'est pas dynamiquement équivalent au système de Copernic et l'on élimine ainsi définitivement toute idée de placer la Terre au centre du monde. Mais, cette syn-

thèse remarquable contient en elle-même une difficulté : puisque la gravitation est universelle, les planètes s'attirent aussi entre elles et cela doit créer des perturbations. Newton lui-même a bien conscience de cette difficulté, en particulier quand il essaie de calculer avec précision le mouvement de la Lune.

Peut-on maintenir encore le dogme de l'immuabilité ?

Laplace est le véritable fondateur de la mécanique céleste. En 1784, il lance la théorie des perturbations, méthode de développement en série qui permet de calculer les orbites réelles des planètes par approximations successives à partir des orbites képlériennes. Il montre par exemple que les orbites de Jupiter et de Saturne se rapprochent puis s'éloignent régulièrement avec une période de 800 ans. Le système solaire n'est donc plus tout à fait immuable mais il paraît en équilibre stable.

L'immuabilité demeure, sous une forme plus élaborée : la stabilité.



LE CONCOURS DE 1889

Au 19^e siècle, les succès de la mécanique céleste de Laplace incitent à l'optimisme. En 1858, Dirichlet confie à l'un de ses élèves qu'il a trouvé une méthode démontrant la stabilité du système solaire mais il meurt avant d'avoir publié ses résultats.

L'université de Stockholm organise en 1889 un concours sur la question et le sujet est proposé par Weierstrass :

“ Pour un système quelconque de points massifs s'attirant mutuellement selon les lois de Newton, en supposant qu'aucun de ces points ne subisse de collisions, donner en fonction du temps les coordonnées des points individuels sous la forme d'une série uniformément convergente dont les termes s'expriment par des fonctions connues ”.

A cet énoncé, Weierstrass rajoute un commentaire explicatif :

“ Ce problème, dont la résolution élargirait considérablement notre compréhension du système solaire, devrait pouvoir être résolu à l'aide des méthodes analytiques actuellement disponibles. Malheureusement nous ignorons tout de la méthode de Dirichlet. Nous pouvons cependant supposer, avec une certitude presque totale, que cette méthode ne reposait pas sur des calculs longs et compliqués, mais sur le développement d'une idée simple et fondamentale que l'on peut raisonnablement espérer retrouver par une recherche pénétrante et persévérante ”.

Ironie du cheminement de la Science ! Un jeune mathématicien français, Henri Poincaré, démontre que le problème est mal posé et qu'il n'a pas de solution. Le jury, très "fair play", estime que cette contribution est si originale et si importante qu'il est déclaré vainqueur du concours.



POINCARÉ ET LE CHAOS



Henri Poincaré (1854-1912)

Henri Poincaré est né en 1854. Etudiant brillant, puis chercheur encore plus brillant, il est, dès 1881, professeur de mathématiques à l'Université de Paris. Après son succès au concours de 1889 il publie, l'année suivante, le texte de sa contribution, "largement revue et augmentée", dans la revue *Acta Mathematica*, sous le titre : "Sur le problème des trois corps et les équations de la dynamique". Par la suite, il développera encore davantage ses idées dans son cours à l'École Polytechnique qui sera publié de 1892 à 1899 sous le titre "Méthodes nouvelles de la Mécanique céleste".

Comme il réalise très bien la complexité du problème posé par Weierstrass, il préfère se limiter au mouvement de trois corps célestes tels que l'ensemble Soleil, Terre, Lune et son étude progresse par étapes :

1) Les équations du problème à trois corps sont non linéaires et non intégrables. Les solutions sous forme de série ne peuvent être que particulières et inutilisables pour les prévisions à long terme.

2) Il vaut mieux chercher des solutions qualitatives par une étude géométrique dans l'espace de phase, espace conventionnel à 6 dimensions (x, y, z, dx/dt, dy/dt, dz/dt). Comme il n'est pas très facile d'y voir à 6 dimensions, on procède à des coupes ; ce sont les

fameuses coupes de Poincaré.

3) Poincaré découvre ainsi qu'il y a, pour l'essentiel, et suivant les conditions initiales, deux types de solutions : les solutions périodiques et les solutions chaotiques.

Ces idées géométriques qualitatives sont remarquables mais nécessairement limitées car Poincaré ne dispose à l'époque que d'un crayon et d'un papier pour dessiner. Seule son extraordinaire aptitude à l'abstraction lui a permis d'imaginer la géométrie du problème et de poser les bases de la théorie du chaos. C'est longtemps après sa disparition, vers 1970, que l'arrivée de l'ordinateur a permis de faire progresser cette théorie du chaos en délimitant de façon quantitative très précise les zones de mouvement périodique et les zones de mouvement chaotique. L'ordinateur permet aussi de calculer par intégration numérique le début

d'une trajectoire chaotique. Sur la figure 10, on a représenté le mouvement pendant les premiers jours d'une sonde spatiale arrivant à proximité d'un système de deux étoiles de même masse ; on voit que la trajectoire est particulièrement désordonnée et l'on conçoit bien que l'avenir de cette sonde est imprévisible. C'est un bel exemple du problème à trois corps restreint pour lequel la masse du troisième corps est très faible devant les masses des deux autres.

Le dogme d'immuabilité doit être abandonné et cela nous incite à chercher des mouvements chaotiques dans le système solaire.



HYPERION, UN SATELLITE TRES AGITE

Autour de la planète Saturne, très célèbre par ses anneaux, on a identifié à ce jour 18 satellites parmi lesquels nous allons nous intéresser à Titan (n°15) et à Hypériorion (n°16).

Voyons d'abord les données astronomiques :

Saturne :

Masse	5,68.10 ²⁴ kg
Forme	Sphère
Diamètre	120600 km

Titan :

Masse	1,37.10 ²³ kg
Forme	Sphère
Diamètre	5140 km
Période	15,94 jours
Distance au centre de Saturne	1222000 km

Hypériorion :

Masse	1,77.10 ¹⁹ kg
Forme	Cacahouète
Dimensions	410 x 260 x 220 km
Période	21,28 jours
Distance au centre de Saturne	1481000 km

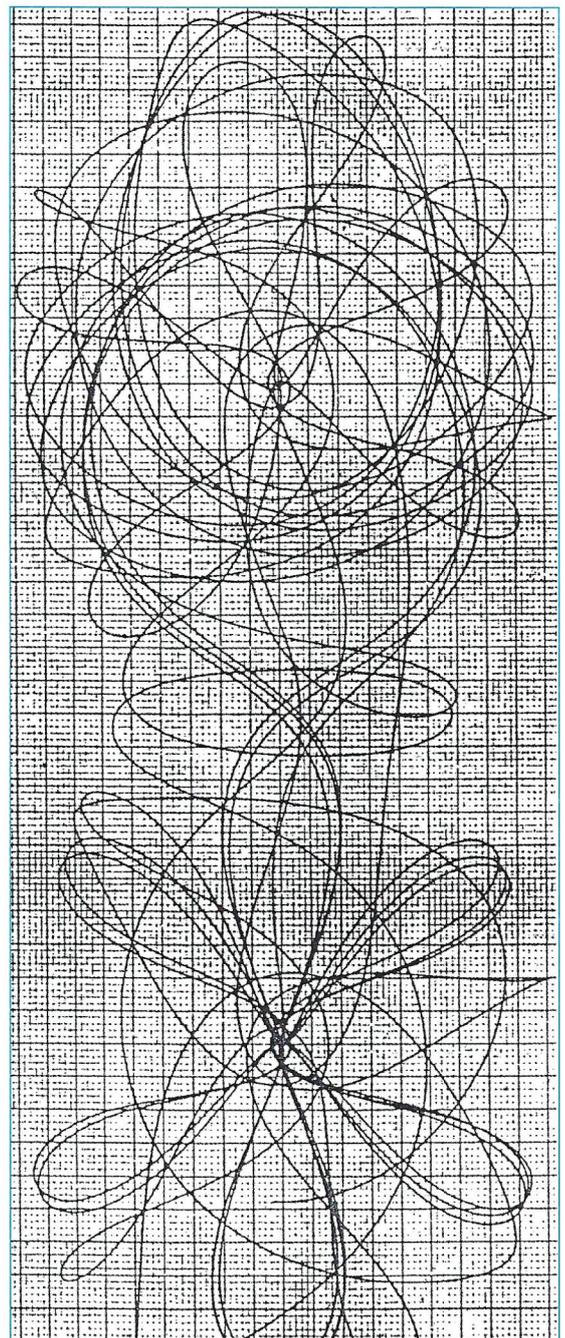


Figure 10 : trajectoire chaotique d'une sonde spatiale dans un système d'étoiles double.

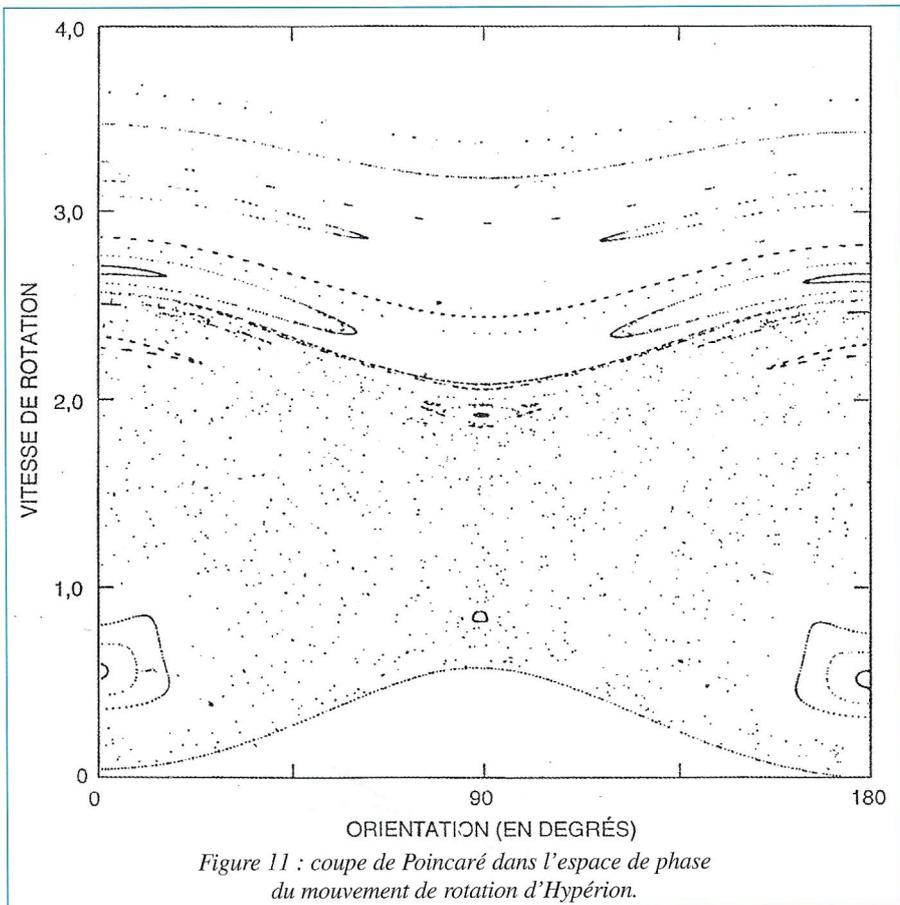


Figure 11 : coupe de Poincaré dans l'espace de phase du mouvement de rotation d'Hyperion.

Les orbites des autres satellites sont suffisamment éloignées des satellites 15 et 16 pour que l'on puisse isoler le système Saturne, Titan, Hyperion ; on se trouve alors en présence d'une illustration typique du problème à trois corps restreint car la masse d'Hyperion est très faible par rapport à celles de Saturne et de Titan et l'on peut se demander si ce système est le siège d'un mouvement chaotique. La forme allongée et dissymétrique d'Hyperion suggère a priori de chercher des variations possibles de la rotation propre du satellite, c'est à dire d'étudier la relation entre l'orientation de l'axe de rotation et la vitesse angulaire correspondante. Le calcul a été fait par l'équipe californienne de Wisdom, Peale et Mignard en 1983 (figure 11). Le résultat fait apparaître une coupe de Poincaré tout à fait typique, avec des zones blanches constituant des îlots de stabilité et des zones de points répartis au hasard qui correspondent à un mouvement chaotique. Ainsi, l'existence des pirouettes d'Hyperion paraît possible et il reste alors à prouver qu'elles existent réellement par l'observation astronomique.

La recherche d'une rotation chaotique est simple dans son principe :

- Si un satellite sphérique tourne régulièrement sur lui-même on observera au télescope un point lumineux d'éclat constant.
- Si un satellite allongé tourne régulièrement sur lui-même autour d'un

petit axe d'orientation fixe, on observera au télescope un point lumineux dont l'éclat varie périodiquement.

- Si un satellite allongé et dissymétrique tourne irrégulièrement sur lui-même autour d'un axe d'orientation

variable, on observera au télescope un point lumineux dont l'éclat varie aléatoirement.

Simple dans son principe, la mesure est délicate en raison de la faible luminosité d'Hyperion et de la forte luminosité de la planète Saturne, toute proche. Le défi a été relevé par Klavetter qui a réalisé 53 nuits d'observation entre le 31 mai et le 5 août 1987 à l'observatoire Mac Graw Hill. Sur ces 53 nuits, 37 lui ont apporté des données utilisables (figure 12).

Les points expérimentaux apparaissent dispersés de façon aléatoire ; aucune courbe périodique susceptible de correspondre à des périodes de rotation uniforme allant de 1 heure à 7 semaines ne concorde de manière satisfaisante avec l'ensemble de ces points ; seule, la courbe théorique d'un mouvement chaotique donne un accord convenable. Ainsi, la rotation désordonnée d'Hyperion apparaît comme le premier exemple identifié de l'existence du chaos dans le système solaire.

Ces calculs d'astronomie sur des objets lointains trouvent leur application dans le domaine spatial. Un satellite de télécommunication doit toujours tourner d'un mouvement régulier autour d'un axe fixe pour émettre toujours dans la même direction. Il ne faut surtout pas qu'il entre dans un régime de pirouettes chaotiques car il faudrait consommer beaucoup de carburant pour le remettre dans le droit chemin.

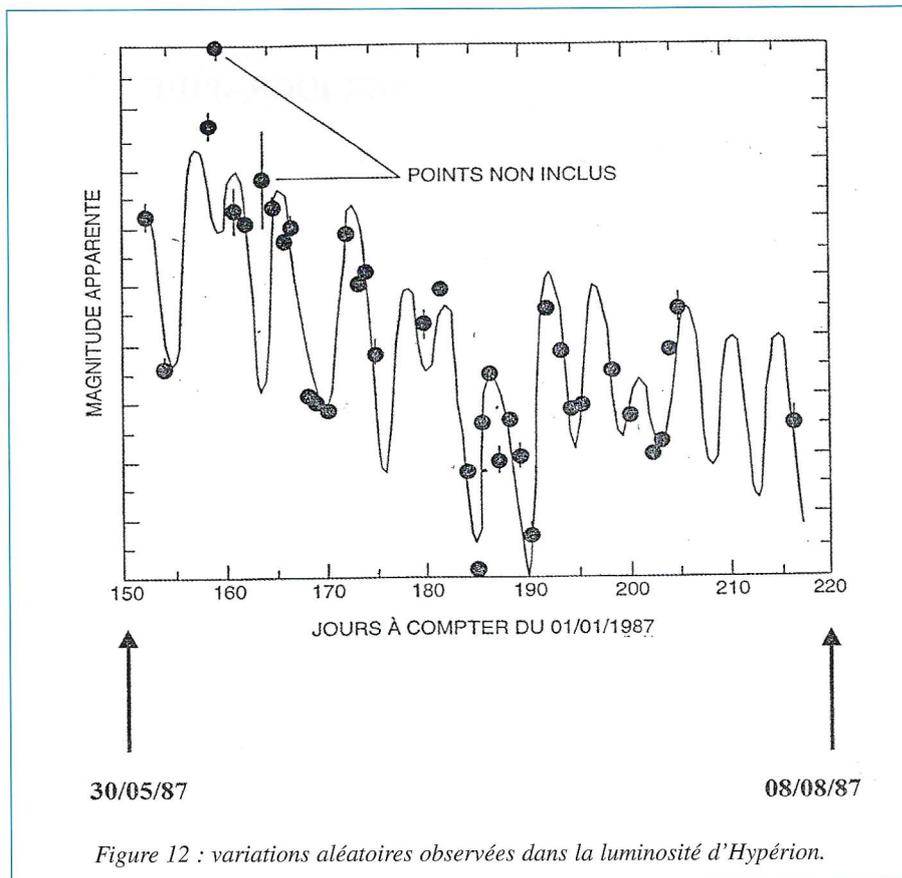


Figure 12 : variations aléatoires observées dans la luminosité d'Hyperion.

La théorie du chaos permet de définir les conditions d'une rotation stable, et l'on s'efforce de maintenir le satellite dans ces conditions à l'aide des petites fusées annexes sans consommer trop de carburant.

L'AVENIR DE LA TERRE

Il nous reste à chercher si le mouvement à long terme de la Terre est périodique ou chaotique. Répondre à la question posée dans l'esprit de Laplace est absolument inextricable mais, heureusement, il n'est pas nécessaire de connaître la position précise de la Terre à un instant donné dans un futur lointain. Il suffit de savoir comment évoluent l'excentricité et l'inclinaison de l'orbite terrestre, au cours du temps, pendant 1, 10, 100 ou même 1000 millions d'années.

La recherche se fait par intégration numérique des équations de la mécanique céleste avec un pas d'intégration suffisamment grand pour effacer les variations rapides et limiter la durée des calculs. Trois équipes de recherche travaillent sur le problème depuis 1989. Ce sont les équipes de :

- Laskar : France
(Bureau des longitudes)
- Tremaine : Canada (Toronto)
- Wisdom : USA (Californie)

Chaque équipe a ses méthodes (algorithmes, pas d'intégration...) mais leurs résultats sont concordants dans les plages de temps qui leur sont communes, ce qui donne assez confiance dans la méthode utilisée. C'est l'équipe californienne qui a poussé l'extrapolation au plus loin en calculant l'avenir jusqu'à 1 milliard d'années. Pour présenter ses résultats, Wisdom a réalisé en 1993 une vidéo présentant l'évolution des orbites planétaires en accéléré (1 seconde = 60000 ans).

On constate alors que toutes les orbites planétaires s'agitent. Certaines, comme celle de la Terre, sont assez sages ; d'autres, comme celle de Mars, s'agitent au contraire frénétiquement. En dépit de ce chahut, les orbites ne se coupent jamais, ce qui élimine les risques de collision, et c'est pourquoi Wisdom s'autorise à proposer deux conclusions :

- **Si, après avoir vu ce film, on vous demandait de démontrer la stabilité du système solaire, vous diriez immédiatement : " Je ne crois pas que le système solaire soit stable ".**
- **Le chaos n'est pas nécessairement synonyme de catastrophe.**

CONCLUSION

Cet article commençait par une célèbre citation de Laplace datant de 1814 ; il se terminera par une citation de Poincaré qui, elle, date de 1908. On pourra ainsi mesurer le chemin parcouru en un siècle :

" Une cause très petite, et qui nous échappe, détermine un effet considérable que nous ne pouvons pas ne pas voir, et alors nous disons que cet effet est dû au hasard. Si nous connaissons exactement les lois de la Nature et la situation de l'Univers à l'instant initial, nous pourrions prédire la situation de ce même Univers à l'instant ultérieur. Mais, lors même que les lois naturelles n'auraient plus de secret pour nous, nous ne pourrions connaître la situation initiale qu'approximativement.

Si cela nous permet de prévoir la situation ultérieure avec la même approximation, c'est tout ce qu'il nous faut, nous disons que le phénomène a été prévu, qu'il est régi par des lois ; mais il n'en est pas toujours ainsi, il peut arriver que de petites différences dans les conditions initiales engendrent de très grandes dans les phénomènes finaux ; une petite erreur sur les premières produirait une erreur énorme sur les derniers. La prédiction devient impossible et nous avons le phénomène fortuit ".

Charles RUHLA
Professeur émérite à l'Université
Claude Bernard

BIBLIOGRAPHIE

- Pierre - Gilles de GENNES
" L'ordre du Chaos "
Pour la Science 1977 à 1989
Diffusion BELIN
8 rue Férou
75006 PARIS
- C . MARCHAL
" La physique est-elle déterministe ? "
Revue du Palais
de la Découverte
N° 128, mai 1985
- Ivars PETERSON
" Le chaos
dans le système solaire "
Pour la Science 1995
Diffusion BELIN
8 rue Férou
75006 PARIS
- Charles RUHLA
" La physique du hasard "
HACHETTE - CNRS
Paris 1989

CHAOS ET CATASTROPHE

Le lecteur qui aura eu le courage et la patience de lire les deux articles sur la théorie des catastrophes (N°45 d'Auvergne Sciences) et la théorie du chaos se demandera peut être quel rapport existe entre ces deux théories; l'une et l'autre représentent des solutions particulières et approchées d'une théorie générale des systèmes mécaniques dissipatifs.

Un système mécanique dissipatif soumis à une perturbation revient à l'équilibre après une durée d'amortissement caractéristique appelée temps de relaxation:

- Pour le lac de montagne, le temps de relaxation se mesure en heures.
- Pour l'aiguille aimantée, le temps de relaxation se mesure en minutes.

Tout dépend alors de la vitesse de variation du phénomène exciteur extérieur: - Pour le lac de montagne, il faut au moins un siècle pour avoir une variation significative de son profil et cette durée est très supérieure au temps de relaxation du système. L'analyse de ce phénomène entre dans le cadre de la théorie des catastrophes.

- Pour l'aiguille aimantée, la période du champ tournant-exciter est de l'ordre de la seconde, et cette durée est très inférieure au temps de relaxation du système. L'analyse de ce phénomène entre dans le cadre de la théorie du chaos.

En dehors de ces deux théories particulières il reste à construire une théorie générale des systèmes mécaniques dissipatifs. . . mais ceci est une autre histoire !

La rédaction des principes

Traduction de Madame Suzanne Gély

(Suite aux numéros 46, 47 et 48 d'Auvergne Sciences)

Les «Principes» furent l'aboutissement de trente mois de travail intensif entre l'automne 1684 et le printemps 1687. Jusqu'alors, Newton avait manqué certainement des concepts de base utilisés dans les Principes, comprenant ce qu'il appela alors «la force centripète» tirant les corps en orbite vers un foyer, tel que le Soleil. Son travail de l'automne 1684 vit aussi sa première utilisation du Principe de Kepler selon lequel la droite reliant le soleil à une quelconque planète balayait des aires égales en des temps égaux. Malgré ses réclamations ultérieures, il n'y a pas d'indication que Newton ait le premier démontré ses Principes du mouvement : il les a présentés sous forme géométrique en utilisant le calcul des fluxions*.

Le programme de Newton fut consacré à une visite fameuse à Cambridge de Edmond Halley en août 1684. Newton dit alors qu'il pourrait démontrer que les planètes devraient se déplacer sur des ellipses si elles étaient tirées par une force, en inverse-carré, issue du Soleil. En novembre, Newton envoya un texte bref sur «le mouvement des corps», incitant Halley à revenir à Cambridge où il vit d'autres textes dont il fit part à Londres en décembre. Newton déterminait des moyens de mesure des forces centripètes, indiquant leur implication dans le mouvement des planètes et des comètes sur des orbites fermées ; il ébauchait brièvement une application au mouvement freiné.

Newton étendit rapidement la portée de ces textes. Durant l'hiver de 1684-1685, il termina un article appelé «le mouvement des corps sphériques dans les fluides» dont il fit aussitôt plusieurs révisions. Dès l'automne 1685, Newton travailla sur un texte beaucoup plus long pour composer deux ouvrages sur le mouvement des corps et le mouvement du monde. Newton présenta ces ouvrages comme des conférences qu'il était supposé donner en qualité de professeur Lucasien à Cambridge.

Le début contient seulement la première présentation des trois lois du mouvement qui apparaissent dans les Principes. C'est la base du livre I des textes publiés. La seconde partie était une simple version préliminaire de ce qui devait être le troisième livre des Principes, lequel traitait du mouvement des planètes, des lunes et des marées. A partir de l'automne 1685, Newton prépara alors des volumes sur le mouvement des corps à travers un espace vide sous l'action de forces centrales, sur le mouvement dans un

milieu résistant et, centré sur le mouvement de la lune et des orbites des comètes, un dernier volume qu'il réécrivit durant 1686 en utilisant les observations de l'astronome royal, John Flamsteed.

En avril 1686, Newton envoya à Halley sa version complète du livre I. Elle fut donnée à l'approbation de la «Royal Society» par son président, Samuel Pepys, en juillet. Newton apprit alors que Robert Hooke avait contesté l'originalité de ce travail. Le professeur de Cambridge, irrité, menaça de supprimer le dernier volume sur le système du monde. Halley l'en dissuada et les deux autres volumes arrivèrent à Londres au printemps 1687.

Le livre entier parut dans la presse, à ses propres frais, sous le contrôle direct de Halley, en juillet 1687. Newton avait préparé une longue «conclusion» dans laquelle les Principes de la Dynamique devaient être appliqués à d'autres phénomènes. Il supprima ce texte et dans sa préface, il remercia généreusement Halley, pour son aide en exprimant le souhait de «tirer des Principes mécaniques, et par le même genre de raisonnement, les autres phénomènes de la Nature.»

*Méthode des fluxions : calcul infinitésimal. Newton employait le mot fluxion (du latin *Fluere* : couler) pour indiquer qu'il s'agissait de quantités variables et de leur vitesse de croissance ou de décroissance.

The Principia followed 30 months of intensive work between autumn 1684 and spring 1687. Until then Newton certainly lacked some of the key concepts used in the Principia, including what he now called 'centripetal force', pulling on orbiting bodies towards some focus, such as the Sun. His work of autumn 1684 also saw his first use of Kepler's principle that the line linking the Sun with any planet swept out an equal area in equal times. Despite his later claims, there is no indication that Newton first demonstrated his principles of motion using the fluxional calculus, then casting them into geometrical form. Newton's programme followed a famous visit to Cambridge by Edmond Halley in August 1684. Newton then said he could demonstrate that planets would move in ellipses if they were pulled on by an inverse-square force in the Sun. In November, Newton sent a short paper on 'the motion of bodies', prompting Halley to return to Cambridge, where he saw further drafts, reporting on them in London in December. Newton defined ways of measuring centripetal force, indicating their relevance to the motion of planets and comets in closed orbits and briefly outlined an application to resisted motion. Newton rapidly extended the scope of these papers. During the winter of 1684-1685, he finished a paper called 'The motion of spherical bodies in fluids' and soon made various revisions. By autumn 1685, Newton was working on a much longer text to consist of two books on the

motion of bodies and the system of the world. Newton deposited versions of these as the lecture he was supposed to give as Lucasian Professor in Cambridge. The former part contains the first presentation of just the three laws of motion which appear in the Principia. It forms the basis of Book 1 of the published text. The second part was a preliminary simpler version of what was to be the third book of the Principia, that which dealt with the motion of planets, moons, comets and tides. By the autumn of 1685, Newton now planned volumes on the motion of bodies through empty space under central forces, on motion in resisting media and a final volume which he rewrote during 1686, concentrating on lunar motion and cometary orbits, and using observations from the Astronomer Royal, John Flamsteed.

In April 1686, Newton sent Halley his completed version of Book 1. It was given the Society's approval by its President, Samuel Pepys, in July. Newton was now told that Robert Hooke had challenged the originality of this work. The Cambridge professor angrily threatened to suppress the final volume on the system of the world. Halley dissuaded him and the two other volumes reached London in spring 1687. The entire book was seen through the press, under Halley's direct supervision and at his own expense, by July 1687. Newton had planned a long 'conclusion', in which the principles of dynamics were to be applied to other phenomena ; he suppressed this text, and in his preface generously thanked Halley for his help and expressed the desire 'to derive the rest of the phenomena of Nature by the same kind of reasoning from mechanical principles'.

Written and compiled by S-J. Schaffer

Les organismes génétiquement modifiés d'origine végétale

Gérard LEDOIGT

Professeur à l'université Blaise Pascal (Clermont-Ferrand II)
Physiologie et Génétique Végétales



LA DOMESTICATION DES PLANTES

Les plantes alimentaires cultivées existent depuis plus de 4000 ans, comme l'attestent des fouilles archéologiques menées au Moyen-Orient. Auparavant, les hommes vivaient de la cueillette et devaient donc se déplacer pour trouver leur nourriture. La mise en culture de plants découverts dans la nature a permis la sédentarisation de l'homme.

Ainsi a débuté l'apprivoisement de l'environnement de l'homme.

Dès le 3^e millénaire avant notre ère, il est observé que l'homme cultivait, en plus des plantes à valeur nutritive, des plantes ornementales pour son agrément (la culture de la rose apparaît à l'époque minoenne).

Pour l'amélioration des cultures végétales, les plantes ont été soumises à un processus empirique de sélection, les meilleures, selon les critères de nécessité, étaient récoltées, multipliées et

conservées, souvent dans le plus grand secret (voir l'exemple des tulipes). L'homme a commencé aussi à modifier les conditions naturelles de croissance des plantes en fertilisant la terre de manière à les cultiver dans des lieux non favorables à leur croissance, mais où l'homme résidait.

La nature a aussi fourni de nouvelles espèces d'intérêt agronomique en passant outre les barrières biologiques habituelles qui s'étaient établies au cours de l'évolution des espèces. Ainsi le blé panifiable, *Triticum aestivum*, est une plante qui contient 42 chromosomes dans son génome. Les techniques de biologie moléculaire ont montré que ce génome correspondait à l'association de 3 patrimoines génétiques qui proviennent de 3 espèces différentes de blé ; le blé panifiable est donc le produit "inhabituel" du croisement de *Triticum monococcum*, *searsii*, *T. tauschii*. Il est dit allohexaploïde. De même, le colza (*Brassica napus*, 38 chromosomes) est le produit du croisement du chou sauvage (*Brassica oleracea*, 18 chromosomes) et du navet (*B. campestris*, 20 chromosomes).

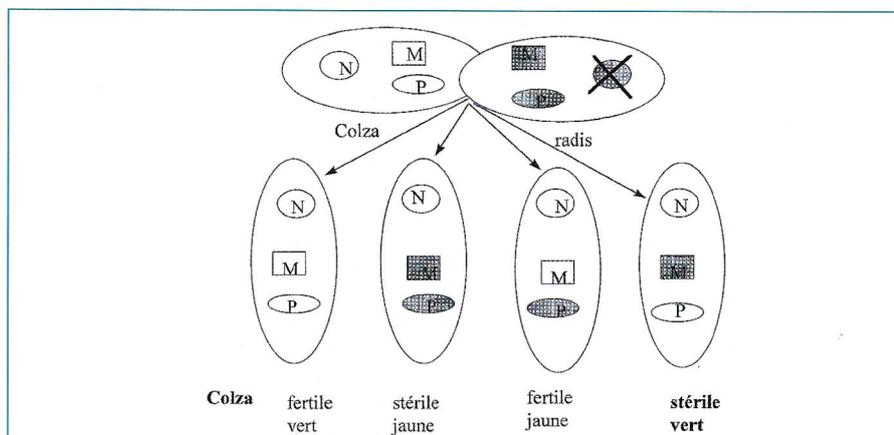


Figure A : Obtention de plants de colza à stérilité mâle cytoplasmique par la méthode des cybrides.

Des protoplastes de colza (cellule à organites blancs dans le schéma) sont fusionnés avec des protoplastes de radis dont le noyau a été préalablement détruit (cellule à organites gris dans le schéma). La cellule hybride cytoplasmique ("cybride") obtenue pourra contenir les 4 combinaisons d'organites, mitochondries (M) et chloroplastes (P) indiquées. Seuls les cybrides qui auront le noyau et les plastides de colza (en blanc) et les mitochondries de radis (en gris) donneront, après régénération des plantes, des colzas qui auront les caractéristiques phénotypiques recherchées, c'est-à-dire, une stérilité des gamètes mâles, et des feuilles bien vertes nécessaires à un bon métabolisme photosynthétique (caractères écrits en gras sur le schéma).

En 1760 a été introduite la notion de vigueur hybride. Il a été observé que les individus de première génération provenant de croisement entre parents différents présentaient des caractéristiques de croissance améliorées par rapport à des individus provenant d'une autogamie (souches pures). Sous une autre forme, cela revient à écrire qu'un taux d'hétérozygotie ou de métissage croissant améliore la vigueur des individus.

La commercialisation des premières variétés de maïs hybrides s'est effectuée au début des années 30 aux USA. Ces nouvelles variétés ont permis d'améliorer rapidement et fortement le rendement en grains. Ainsi, aux USA, en 1935, avec moins de 1 % de la surface cultivée en hybrides, le rendement était d'environ 1,5 t/ha ; en 1968, avec environ 90 % de la surface cultivée en hybrides, le rendement était d'environ 5,1 t/ha.

L'obtention de variétés nouvelles de plantes hybrides est relativement longue. A la suite du croisement initial entre une plante alimentaire et une plante qui comporte des caractères qui amélioreraient les qualités de la première, il faut environ une dizaine d'années pour des plantes annuelles. Au cours de cette période des croisements en retour avec le parent d'intérêt agronomique permettent de stabiliser le génome, en conservant les qualités agronomiques de celui-ci tout en sélectionnant dans la descendance, le caractère nouveau apporté par l'autre parent. Différentes techniques permettent de réduire ce temps d'obtention. Ensuite, il faut vérifier que ce nouvel hybride ne contient pas de caractères négatifs (croissance moindre, toxicité) qui auraient été sélectionnés en même temps que le caractère nouveau.

La découverte des enzymes de restriction a permis le développement de la biologie moléculaire et notamment le transfert direct de séquences géniques caractérisées et isolées, dans le génome d'organismes. Cette nouvelle méthode de modification du patrimoine génétique a été appelée génie génétique. Les gènes transférés ont été appelés transgènes et les nouveaux organismes ont été qualifiés de transgéniques. Dans les années 80, le terme général d'organisme génétiquement modifié (OGM) a été réservé à ces nouveaux hybrides. Le premier organisme transgénique commercialisé a été en juillet 1994, un plant de tabac résistant à un herbicide. Par la suite le terme de PGM (plante génétiquement modifiée) est apparu pour différencier les organismes transgéniques.



MÉTHODOLOGIE

Il faut tout d'abord définir l'objectif du transfert, puis définir les différentes étapes et les hôtes successifs (bactéries, levures, cellules ou organismes).

Il faut connaître la nature du caractère transféré et son origine (procaryote ou eucaryote), savoir ce qui est accessible,

le polypeptide, l'ARN messager ou partie du gène natif.

Il faut définir les outils moléculaires utilisés ou utilisables (enzymes, vecteurs de transferts, marqueurs moléculaires).



TECHNIQUES DE TRANSFERT

Le transfert du transgène est effectué dans des cultures de cellules, Il y a deux raisons pour cela: les cellules sont totipotentes, c'est à dire qu'un organisme complet peut être créé à partir d'une seule cellule et nous savons régénérer beaucoup de plantes à partir de cellules somatiques ; ensuite, cette régénération fait que le transgène se retrouvera dans le génome de toutes les cellules de l'organisme, évitant ainsi a priori, une expression mosaïque du transgène et assurant aussi a priori la pérennité du nouvel organisme.

1) dans des protoplastes

Ce sont des cellules végétales dont la paroi a été retirée par digestion enzymatique (mélanges de pectinases, cellulases, hémicellulases). Ces cellules ne peuvent alors être conservées que dans un milieu légèrement hypertonique, un peu plus concentré en sucre non métabolisable que le gel cytoplasmique pour éviter qu'elles n'éclatent du fait de la fragilité de la membrane plasmique limitante.

a) agent physique (électroporation)

Cette technique consiste à mettre des protoplastes en solution avec l'ADN à transférer, dans un champ électrique intense ; des pulses électriques sont effectués, qui créent des trous temporaires dans les membranes cellulaires, laissant ainsi entrer les molécules d'ADN. Une fréquence de 10^{-5} à 10^{-6} protoplastes transformés peut être observée.

b) agents chimiques (liposomes, PEG)

Les liposomes sont des structures lamellaires pseudo-membranaires qui se forment lorsque divers types de molécules lipidiques sont mélangés en solution. Ils sont notamment formés en mélangeant un phospholipide, le dioléolphosphatidyléthanoline, le cholestérol et un acide gras à longue chaîne, l'acide oléique. Ces structures lamellaires peuvent se replier sur elles-mêmes et former des vésicules. Ces vésicules sont de 2 types selon le sens de repliement car les structures lamellaires sont asymétriques ; une surface

présente les groupements polaires des lipides et l'autre face présente les parties hydrophobes. Au cours du repliement sur elles-mêmes, les vésicules vont enfermer un peu du milieu dans lequel elles se trouvent. Si de l'ADN a été ajouté au mélange, certaines de ses molécules vont se retrouver encapsidées, mais seulement dans les vésicules dont les parties polaires sont présentes sur la face interne. Ainsi, en moyenne, seulement 50 % des vésicules vont contenir de l'ADN,

Ces vésicules peuvent fusionner avec la membrane cellulaire et relâcher leur contenu (à pH acide), dans le cytoplasme. En laboratoire, le transfert d'un fragment d'ADN portant un gène de résistance à un antibiotique, la kanamycine, a permis d'obtenir des plantes normales, fertiles, contenant ce gène dans leur patrimoine génétique (caractère mendélien et dominant), avec une fréquence très faible d'obtention de l'ordre de $1,6 \cdot 10^{-4}$. Cependant cette technique peut présenter un intérêt. En effet, lorsqu'un protoplaste est infecté par 2 liposomes qui contiennent chacun des ADN marqueurs différents, la fréquence d'apparition du 2^e gène marqueur, lorsque le premier a été sélectionné, est de 23 % et non de $1,6 \cdot 10^{-4}$; ce ne sont donc pas 2 événements indépendants.

Il est ainsi possible de cloner un fragment d'ADN qui n'est pas sélectionnable au niveau de la culture cellulaire, en utilisant un premier liposome qui contient un marqueur ; ainsi, en moyenne, une plante régénérée, sur quatre qui contiennent le marqueur, aura la 2^e séquence d'ADN. Ce qui est plus intéressant, c'est que les plantes obtenues alors contiendront chacune des 2 séquences d'ADN à des endroits différents de leur génome, car ces séquences ne sont pas liées et leur intégration dans l'ADN chromosomique nécessite 2 événements indépendants. Ensuite, par des croisements classiques, il est donc facile de se séparer du marqueur pour ne conserver que des plantes transgéniques ne contenant que le gène désiré.

Les liposomes ont ainsi permis de transférer dans des cellules de l'ADN, de l'ARN, des protéines, des drogues, des virus, des organites cellulaires (chloroplastes).

D'autres molécules, comme le polyéthylène glycol (PEG) ou des polycactions (par exemple la polyornithine) peuvent aussi fusionner avec la membrane plasmique et donc délivrer un contenu moléculaire à un protoplaste.

Une fréquence de transformation de 300.10^{-6} est observée avec le PEG.

c) fusions cellulaires

La fusion cellulaire a pour objectif d'introduire tout ou partie d'un génome cellulaire dans une autre cellule. Ce transfert direct de génome est effectué à travers le passage créé par la fusion des membranes plasmiques. Il faut donc que les cellules soient débarrassées de leur paroi. Il est alors possible de fusionner tout type cellulaire d'origine végétale (protoplastes), bactérienne (sphéroplast) ou animale. L'intermédiaire qui permet d'initier cette fusion a été, au début, un virus (virus sendai), puis des agents chimiques (PEG) ou bien des traitements physiques (électrofusion).

Des hybrides protoplaste-sphéroplaste ont ainsi été obtenus dans le but de transférer des plasmides bactériens qui contenaient, par clonage, un gène végétal. Cette technique entraîne souvent des anomalies génétiques pour la cellule végétale du fait de la présence de l'ADN bactérien et de recombinaisons possibles avec le génome végétal, qui peuvent perturber le fonctionnement de celui-ci.

Des hybrides protoplaste-protoplaste sont effectués, les produits obtenus sont appelés des hybrides somatiques, lorsque les cellules utilisées ne sont pas des gamètes. L'objectif de tels croisements est la mise en commun de formes alléliques différentes. Il peut aussi permettre le croisement entre espèces incompatibles ou stériles. Ils permettent le transfert d'organites cellulaires, comme par exemple des mitochondries, pour l'obtention de nouvelles espèces à stérilité mâle cytoplasmique; en effet il a été observé que la stérilité cytoplasmique vis-à-vis des gamètes mâles est due à une mésentente entre le chondriome et le génome nucléaire.

Des hybrides somatiques peuvent aussi être utilisés pour l'introduction de nouveaux chloroplastes dans une cellule qui peuvent conférer, de par leur génome, une nouvelle résistance aux herbicides.

Cependant pour le transfert d'organites cellulaires, la présence du génome nucléaire n'est pas indispensable et peut même se révéler néfaste à la régénération de la plante. Pour cela le génome nucléaire de la cellule donneuse sera détruit (par rayonnement, par agent chimique ou par énucléation), et les deux protoplastes seront fusionnés, le produit obtenu sera un hybride cytoplasmique ou cybride. Pour le créer,

les organites cellulaires (mitochondries et chloroplastes) du receveur peuvent aussi être détruits. Cependant cette opération au demeurant difficile peut être évitée, par une suite de croisements de la plante cybride avec les plantes parentales et une sélection des plantes au caractère désiré.

Ainsi, la pollinisation de fleurs de radis par du colza, suivis de croisements en retour ("backcross") par pollinisation par le colza permet de créer des plants de colza qui ont un cytoplasme, donc les mitochondries et les plastides du radis. Ces plantes présentent une stérilité mâle cytoplasmique. Ce caractère est conféré par la présence d'un chondriome de radis. En revanche, ces plantes présentent des anomalies de la photosynthèse avec un faible taux de pigments chlorophylliens, ce qui est préjudiciable à la production de la biomasse végétale. Il fallait donc créer une cellule de colza qui contienne des mitochondries de radis, mais qui conserve les chloroplastes du colza. Des protoplastes de la plante cybride précédemment obtenue ont été faits, ils ont été fusionnés avec une cellule de colza d'origine dont le noyau a été détruit. Les nouveaux cybrides obtenus contenaient le noyau du colza et, au début, un mélange des mitochondries et des chloroplastes de colza et de radis, cette hétéroplasmie (c'est à dire la présence dans une même cellule de 2 populations d'un même organite, plaste ou mitochondrie) ne peut perdurer. Au cours des différents cycles cellulaires, il y a une tendance à l'homoplasmie qui émerge pour chaque type d'organite, c'est-à-dire qu'une population d'un organite va prendre le dessus et éliminer l'autre et ceci, semble-t-il, au hasard, ce qui fait qu'il y a 4 types de plantes à cytoplasme différent qui vont apparaître. Une seule d'entre elles est intéressante : cette plante aura des mitochondries de radis et des chloroplastes de colza, et ses critères de reconnaissance (son phénotype) seront la stérilité gamétique mâle et des feuilles bien vertes.

2) dans des cellules intactes

L'intérêt de l'utilisation de cellules intactes réside dans une capacité de régénération meilleure des plantes à partir des cellules qui ont conservé leur paroi. Le rendement de régénération est amélioré et la qualité des plants obtenus est accrue; en effet, l'absence de microfibrilles de pectocellulose de la paroi cellulaire entraîne une désorganisation des microtubules du cytosquelette cortical qui interviennent dans la division cellulaire et la méiose en place de la paroi.



DIFFÉRENTES TECHNIQUES DE TRANSFERT EXISTENT QUI SOIT SONT DIRECTES SOIT UTILISENT DES VECTEURS.

Transferts directs,

1) Microinjection :

Lorsque les cellules sont suffisamment grosses et présentent une paroi relativement fragile, il est possible de transférer de l'ADN par microinjection à l'aide d'un micromanipulateur.

Des microinjections ont aussi été effectuées par écrasement de tissus (inflorescences, sac embryonnaire, ovules, méristèmes) ; l'ADN pénètre alors dans les cellules à la suite de blessures dans le tissu, dans ce cas, la régénération amène l'obtention de plantes chimères.

2) La biolistique :

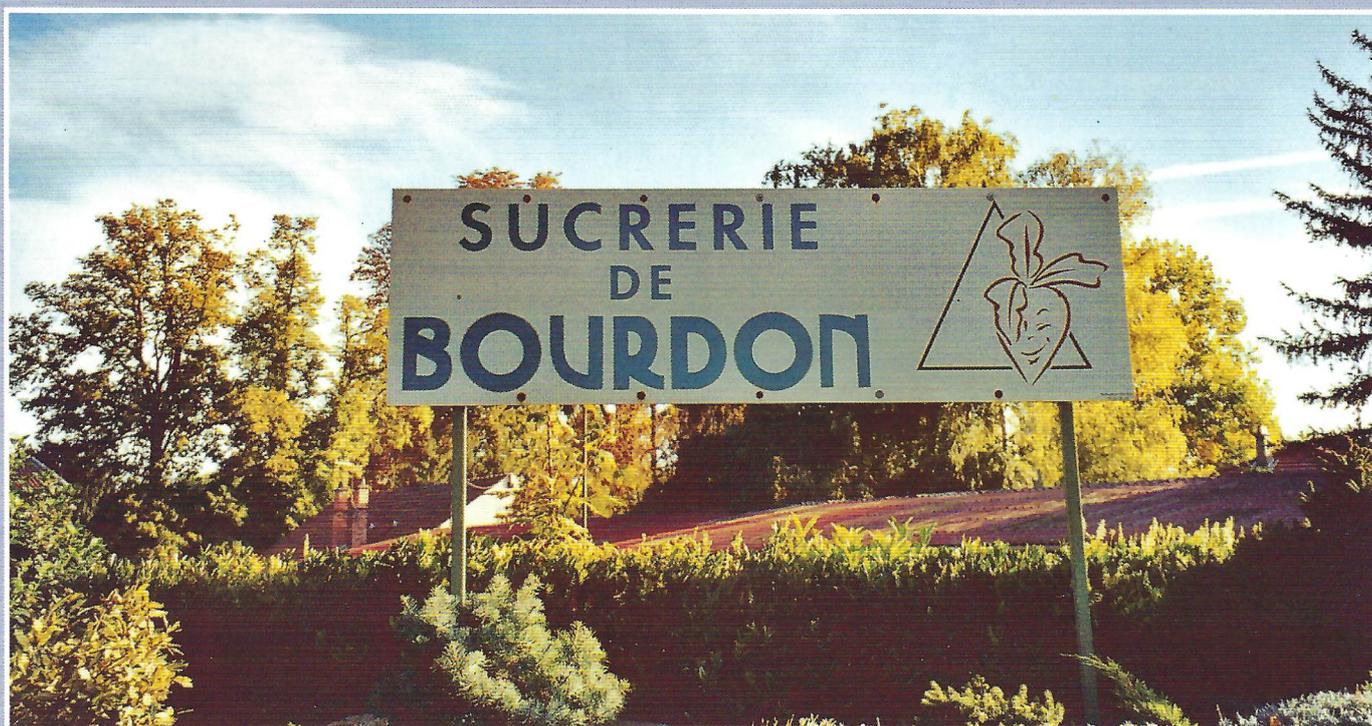
Le terme provient de la contraction de **biologie** et de **balistique**. Il s'agit en effet d'introduire des molécules d'ADN en perforant la paroi et la membrane plasmique et les déposer dans le cytoplasme ou dans un organite de la cellule.

Comme avec la technique précédente il est observé que loin d'être dégradé par des hydrolases cellulaires, l'ADN injecté est pris en charge par la cellule et dirigé vers le noyau, et peut-être même vers d'autres organites, comme les mitochondries. Ainsi la transformation cellulaire, c'est à dire l'incorporation physiologique de matériel génétique, l'ADN, par une cellule, n'est pas un phénomène réservé aux bactéries où il a été démontré depuis un demi-siècle, mais existe aussi pour les cellules eucaryotiques (végétaux, champignons et animaux).

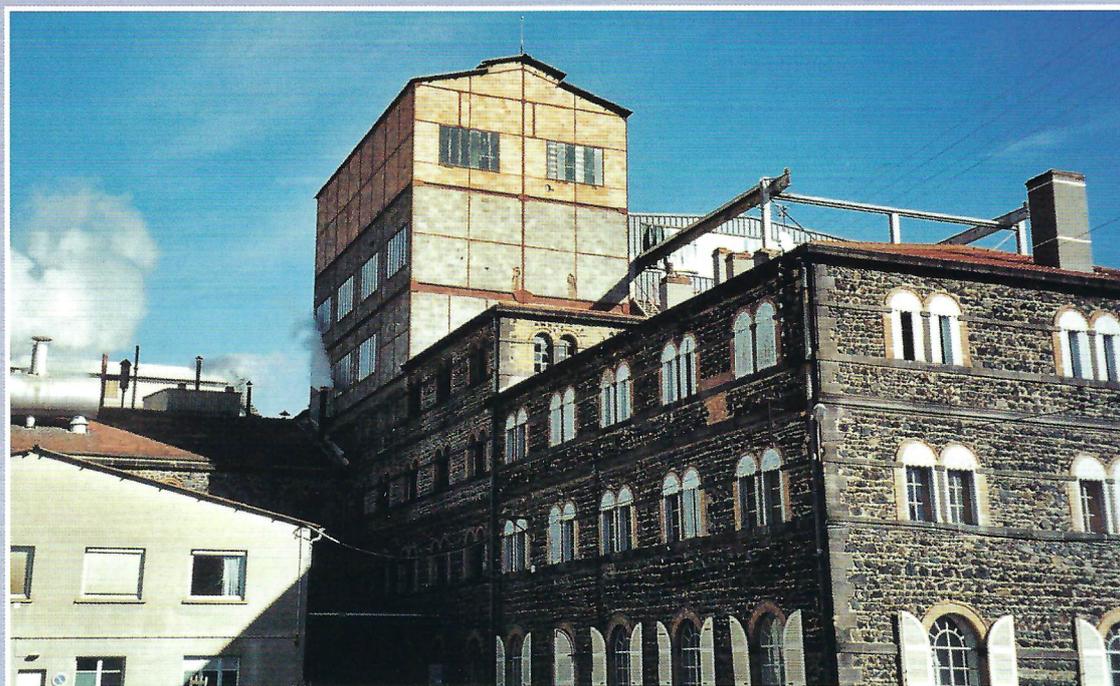
Cette technique, développée dans les années 80, utilisait au départ une carabine qui propulsait des microbilles enveloppées d'ADN sur des cultures de cellules. Cette technique, par trop brutale pour le matériel, a été modifiée par l'utilisation d'une électrovanne qui libère, au moment du tir, de l'hélium comprimé (pression de 7 bars) ; le tir a lieu dans une enceinte en Plexiglas, sous vide partiel (25 mm de mercure), dans laquelle est placée une boîte de Pétri qui contient la culture de cellule à transformer, sur un milieu nutritif solide.

suite page 19

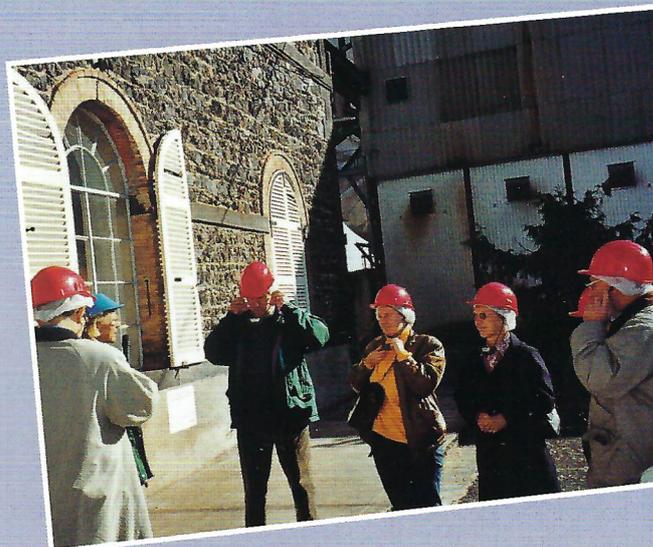
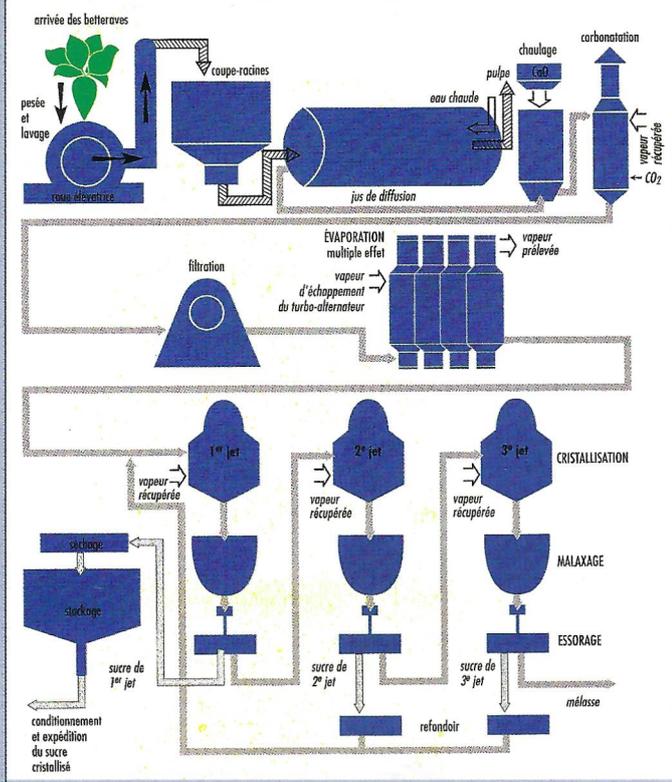
La sucrerie Bourdon à Clermont-Ferrand-Aulnat



La sucrerie Bourdon est la plus ancienne des 36 sucreries françaises en activité, et la seule située au sud de la Loire. Son origine remonte au début du XIX^e siècle. Elle emploie actuellement un effectif de 160 personnes environ pendant la campagne de fabrication qui dure 70 jours, et de 96 personnes pendant l'intercampagne.



Les différentes étapes de la fabrication du sucre



Réception des betteraves. Détermination de la teneur en sucre

7000 tonnes (brutes) de betteraves arrivent à l'usine chaque jour du lundi au vendredi par semi-remorques. A la réception des betteraves on procède au prélèvement de 3 échantillons par camion au moyen de sondes dites "rupro". Les betteraves ainsi prélevées sont lavées puis subissent un décolletage, c'est-à-dire l'enlèvement de la partie supérieure pauvre en sucre. On détermine ensuite la teneur en sucre par des mesures au saccharimètre. Cette teneur est habituellement de 17 à 19%.

Stockage des betteraves et approvisionnement de l'usine

Le stockage est constitué dans la journée du lundi au vendredi sur une aire de capacité 12000 tonnes. L'usine est approvisionnée par un transporteur à bande.



Lavage et séparation des déchets

Diverses opérations permettent de débarrasser les betteraves des impuretés (terre, cailloux, herbes...) : pré-lavage, épierrage, esherbage, lavage, rinçage. Les eaux de lavage sont décantées et recyclées.

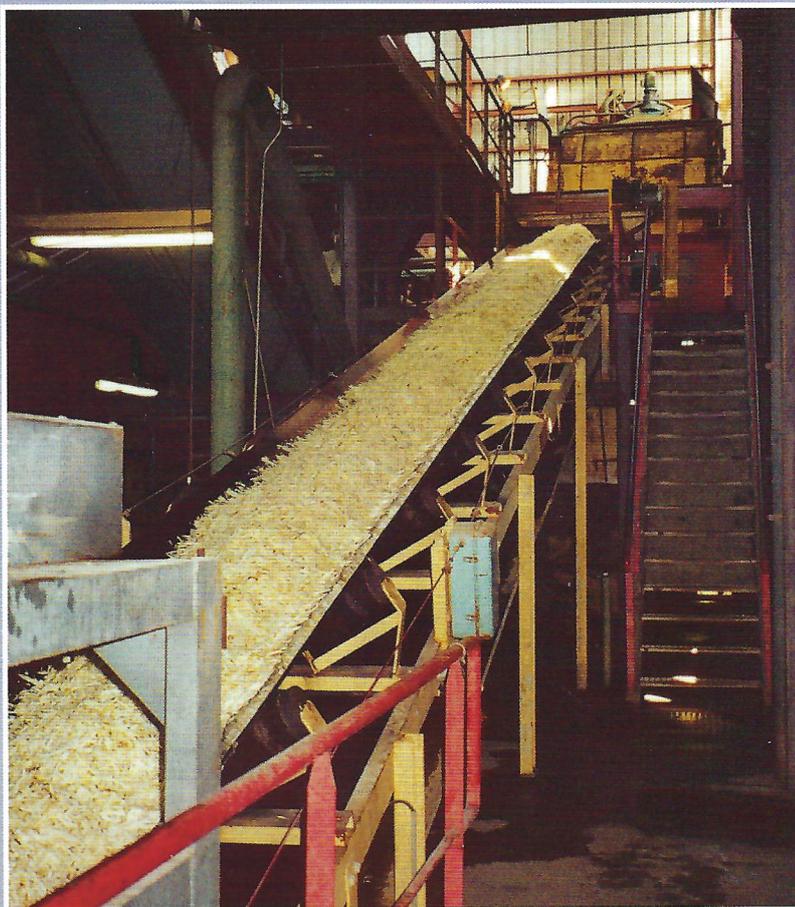


Découpage en cossettes

Les betteraves reprises par un transporteur à bande passent dans des appareils appelés coupe-racines qui les découpent en minces lanières, les cossettes. Celles-ci sont pesées sur un tapis peseur continu.

Diffusion

La diffusion est l'opération qui consiste à faire passer, par osmose, en solution dans l'eau, le sucre contenu dans les cossettes. Les cossettes pénètrent en bas d'une tour haute de 15 mètres et montent lentement sous l'action d'une vis hélicoïdale. L'eau chaude est introduite en haut de la tour et descend en s'enrichissant en sucre. Les cossettes, épuisées de leur sucre, donnent des pulpes, qui sont destinées à l'alimentation animale, sous forme de pulpes humides, pulpes surpressées (partiellement déshydratées) ou pulpes sèches.



Purification du jus sucré

Le jus provenant de la diffusion contient 16% de sucre et 3% de "non sucre" qu'on souhaite éliminer. Cette purification nécessite de la chaux et du gaz carbonique. Ces deux composés sont fabriqués dans un four à chaux qui consomme au cours d'une campagne 8000 tonnes de calcaire et 600 tonnes de coke. L'addition de lait de chaux au jus sucré de diffusion précipite une partie des "non sucre". Le saccharose donne également un composé insoluble qui se décompose en faisant simplement barboter du gaz carbonique. Les "non sucre" et le carbonate de calcium se retrouvent sous forme de précipité qu'on sépare par filtration, ce sont les écumes qui peuvent être utilisées pour l'amendement des terrains.

Obtention du sucre

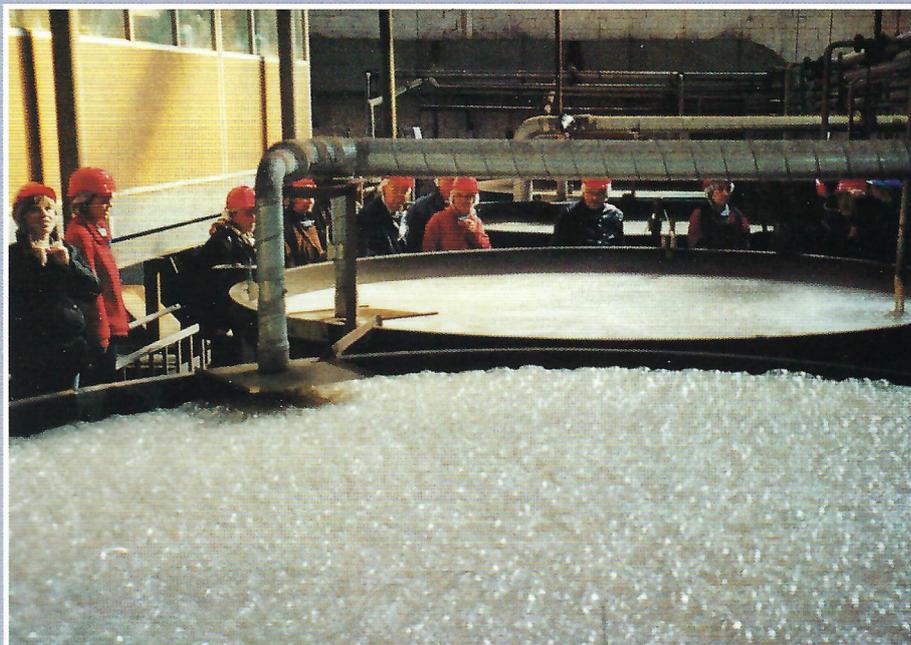
On procède d'abord à une concentration progressive du jus sucré par évaporation, ce qui donne un sirop à 63% de sucre. Le sirop est concentré dans des chaudières travaillant sous vide pour éviter la caramélisation. On obtient la "masse cuite", formée de petits cristaux de sucre enrobés par un sirop coloré appelé eau-mère. Cette masse subit un malaxage et un refroidissement ce qui a pour effet de faire grossir les cristaux de sucre. En séparant les cristaux de l'eau-mère par centrifugation dans des turbines à sucre, on obtient le sucre cristallisé blanc. L'eau-mère, ou égoût de premier jet, qui contient encore beaucoup de sucre, est recueillie et subit à nouveau cuisson, cristallisation et essorage. On recueille du sucre roux et un égoût de deuxième jet. Le sucre roux est refondu dans le sirop. On peut faire une troisième opération similaire. Les sucres blancs sont séchés dans un courant d'air puis stockés en silo et ensachés.

Le rendement de la fabrication du sucre est d'environ 150 à 170 kg de sucre par tonne de betteraves

Autres fabrications

Les pulpes et écumes ont déjà été mentionnées. La pulpe surpressée peut être déshydratée dans un sécheur à tambour rotatif. Les granulés obtenus servent de fourrage.

A l'issue du turbinage de troisième jet, on obtient un produit incristallisable, contenant encore 50% de sucre, la mélasse. La mélasse est notamment utilisée comme matière première de la distillerie. La fermentation d'une tonne de mélasse fournit 3 hectolitres d'alcool, et la production totale de la sucrerie est de 70000 hectolitres par an. Le résidu de la distillation, la vinasse, est concentré et sert d'engrais.



La sucrerie Bourdon a été visitée par un groupe d'adhérents ADASTA, le 18 octobre 2000.

Photos J.-C. Capelani,
M. Profit

L'ADN du gène à injecter est collé sur des microbilles de 0,5 à 2 µm de diamètre, soit à l'aide de molécules basiques, spermidine (5 mmol/l), et de polyéthylène glycol (PEG à 8%), soit par précipitation de l'ADN par le CaCl₂. Ces microbilles sont souvent en tungstène, car ce métal est peu toxique, ou en or, plus cher mais encore moins toxique.

Le dispositif est constitué d'un tube évasé de manière à disperser les particules au cours du tir; il faut limiter le nombre de microbilles par cellule sinon celle-ci est détruite par l'impact, il faut aussi en doser la puissance car ces microbilles doivent rester dans les cellules.

Cette technique, utilisée en laboratoire, amène une mosaïque de cellules transformées plus ou moins blessées.

3) Chocs hydriques

Des graines, des grains de pollen, des cals cellulaires, des embryons somatiques, des protoplastes sont soumis à un dessèchement léger puis à une imbibition et sont alors capables d'absorber des molécules d'ADN. Cette technique est en cours de développement dans les laboratoires.

Utilisation de vecteurs

Des virus à ADN peuvent être utilisés comme vecteurs, notamment le virus de la mosaïque du chou-fleur ou CamV, les geminivirus. Ces virus modifiés ont perdu leur virulence mais ont conservé leur pouvoir infectieux qui leur permet de transporter un gène étranger dans une cellule, un tissu et de le disséminer éventuellement dans la plante.

Cependant le vecteur le plus utilisé et le mieux travaillé est le plasmide Ti de

la bactérie du sol, *Agrobacterium tumefaciens*. Les plantes actuellement commercialisées ont été transformées avec l'aide de cette bactérie.

LE PLASMIDE Ti

C'est une molécule d'ADN bicaténaire, circulaire et surenroulé, de taille variable (souvent autour de 150 kbp*). C'est une structure chimère constituée de 2 types de gènes séparés par des petites séquences répétées directes de 25 bp* chacune, dénommée LB ("left border") ou BG (bordure gauche) et RB ("right border") ou BD (bordure droite).

* bp = paire de base

* kbp = 1000 paires de nucléotides

Le plus petit fragment d'ADN limité par ces séquences répétées fait environ 12 kbp et est appelé ADN T (ADN transféré). Il contient des gènes qui seront transférés dans le génome nucléaire de la plante où ils s'exprimeront. Ce sont donc des gènes à régulation eucaryotique qui ne peuvent pas s'exprimer dans la bactérie où ils se trouvent. Le plus grand fragment du plasmide Ti contient des gènes qui restent dans la bactérie dans laquelle ils vont être exprimés. Ce sont des gènes de virulence appelés vir qui permettent la réplication et le transfert de l'ADN T. Les gènes pour l'attachement bactérie-cellule végétale sont situés dans le génome principal de la bactérie.

L'agrobactérie induit chez la plante qu'elle infecte, un développement anarchique des cellules souvent situé sur le collet de la plante, limite entre tige et racine. Cette tumeur est appelée galle du collet ("Crown-gall").

L'agrobactérie pénètre dans le tissu de la plante à la suite d'une blessure du tissu végétal; le collet de la plante représente l'endroit où le risque de blessure est grand à cause de la présence de cailloux qui peuvent être déplacés par les eaux de ruissellement et donc abîmer les plantes, et de la présence proche du sol et de ses agrobactéries.

Certaines galles peuvent apparaître sur les branches, elles semblent provenir d'oiseaux qui, après s'être restaurés au sol, viennent se percher et injectent par leurs griffes les bactéries contenues dans la terre qu'ils peuvent transporter.

La plante blessée se met à synthétiser des molécules de défenses de type phénolique pour prévenir l'attaque d'agents infectieux qui pourraient pénétrer dans ses tissus par cette blessure.

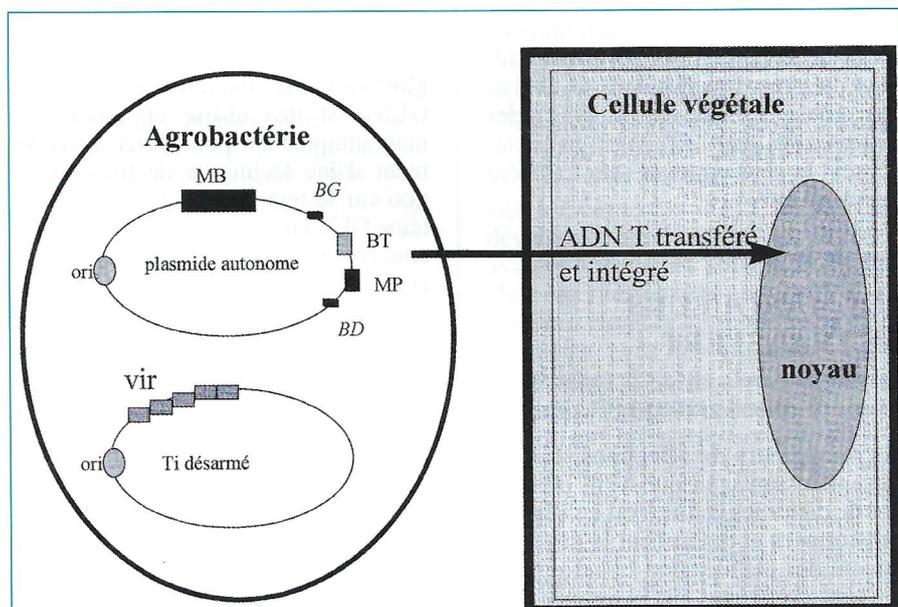


Figure B : Transformation de cellules de coton par le gène exprimant le gène de la toxine de *Bacillus thuringiensis* (BT), par utilisation d'un vecteur binaire. Le gène bt est une partie du gène présent dans la bactérie (gène crystal), il code les 453 premiers acides aminés de la protéine (1 178 acides aminés) qui en représente la partie active. Ce gène bt a été cloné dans un vecteur ADN T binaire, entre les régions BD (bordure droite) et BG (bordure gauche) qui limitent l'ADN T du plasmide autonome. Ce plasmide contient une origine de réplication de type bactérien (ori), un marqueur de sélection pour le clonage génique chez *E. coli*, localisé en dehors de l'ADN T (MB, qui est un gène de résistance aux antibiotiques, à promoteur bactérien) Le plasmide autonome comporte aussi l'ADN T, obtenu à partir du plasmide Ti, cet ADN T contient un marqueur de sélection des cellules végétales transformées (MP, qui est un gène de résistance aux antibiotiques, à promoteur eucaryotique), et le gène bt qui doit être transféré dans le noyau des cellules végétales.

Le plasmide Ti est désarmé parce qu'il est dépourvu de son ADN T, mais il contient les gènes de virulence (vir), qui permettent l'excision et le transfert de tout ADN T présent dans l'agrobactérie.

Le vecteur ADN T est donc transféré et intégré dans le patrimoine génétique de jeunes pousses de coton par *Agrobacterium tumefaciens*. Des plants de coton transgéniques sont ensuite régénérés. Ces plantes transgéniques sont protégées contre les larves de nombreuses espèces d'insectes.

Cependant, l'une de ces molécules phénoliques, l'acétosyringone et ses dérivés, est reconnue par l'agrobactérie et va déclencher une cascade de modifications métaboliques (activation de protéines suivie de la biosynthèse de polypeptides) qui va aboutir à la répllication de l'ADN T et à son transfert dans le noyau de cellules de la plante. Cet ADN contient plusieurs types de gènes qui ont la particularité de pouvoir être exprimés dans une cellule végétale.

L'un de ces gènes code pour une enzyme qui permettra la fabrication, en une étape, d'un nouveau type de polypeptide appelé opine, à partir d'un acide aminé préexistant et d'un acide carboxylique ou d'un sucre. Cette réaction utilise l'énergie de la plante, essentiellement d'origine photosynthétique. La plante ne peut utiliser ce nouveau type de polypeptide, en revanche, l'agrobactérie contient dans le génome du plasmide Ti les gènes nécessaires à la dégradation de celui-ci, ce qui permet à la bactérie de bénéficier d'une source de carbone et d'azote organique pour effectuer ses biosynthèses. De façon à augmenter la source de ces produits, l'ADN T transféré dans la plante contient des gènes inducteurs de tumeurs, c'est-à-dire qui amènent une division anarchique de la cellule infectée. Ces gènes codent pour des enzymes qui interviennent dans la synthèse de deux hormones végétales, auxine et cytokinine, dont la présence induit la division cellulaire. Ainsi la bactérie va accroître son potentiel de fabrication de molécules organiques dont elle est la seule utilisatrice. De plus, il existe différents types de plasmides Ti qui se caractérisent notamment par des gènes différents de métabolisme d'opine; ainsi une agrobactérie a le monopole de l'utilisation de son opine face à d'autres agrobactéries.

Le biotechnologiste a utilisé cette possibilité de transfert d'ADN par l'agrobactérie. Pour le faire, il fallait :

- rendre le plasmide non tumorigène, en ôtant les gènes oncogènes
- diminuer la taille de l'ADN T pour permettre l'insertion de grands fragments d'ADN exogène, en ôtant les gènes du métabolisme de l'opine,
- conserver les bordures, qui sont nécessaires au transfert
- ajouter une séquence d'ADN contenant des sites d'enzyme de restriction, pour permettre l'insertion de l'ADN étranger.

Le plasmide Ti ainsi obtenu peut être utilisé comme vecteur de transfert d'ADN. Plusieurs types de vecteurs ont été construits qui sont définis en fonction des gènes qu'ils contiennent. Ils peuvent aussi se définir selon le

transfert effectué. Il existe principalement 2 types de vecteur :

- le vecteur d'intégration : le gène à transférer est d'abord cloné dans une bactérie, *Escherichia coli* (par l'intermédiaire d'un plasmide bactérien, comme par exemple pBR 322)¹ après fusion des bactéries, colibacille et agrobactérie, le plasmide bactérien recombiné peut s'intégrer par recombinaison, dans l'ADN T du plasmide Ti modifié en vecteur d'intégration. Dans ce cas, l'agrobactérie va transférer dans la plante l'ADN T qui contient le gène prévu et son vecteur plasmidique bactérien.

- le vecteur binaire : il est constitué de 2 plasmides différents qui portent chacun une partie du plasmide Ti, l'un des plasmides contient la région vir, qui permet le transfert vers la plante de l'ADN T, l'autre contient d'une part l'ADN T (réduit aux bordures BR et BL), dans lequel peut être inséré un gène étranger, et, d'autre part, un gène marqueur bactérien qui permet le clonage du gène étranger dans le colibacille, ainsi, lorsque ces 2 plasmides sont présents dans la même agrobactérie, seul le gène étranger sera transféré dans la plante.



LES MARQUEURS DE TRANSFERT

Ces marqueurs sont de 2 types, marqueurs de sélection ou gènes reporters.

Les **marqueurs de sélections** sont les plus intéressants puisque qu'ils permettent de cibler les cellules ou les plantes transformées et empêchent le développement des cellules non transformées. Ce sont des gènes de résistance aux antibiotiques, aux herbicides. Ces gènes sont transférés dans la cellule végétale en même temps que le gène d'intérêt; ils sont sous la dépendance d'un promoteur eucaryotique, ce qui ne leur permet pas d'être exprimés dans des bactéries. Ces gènes de sélection sont utilisés lorsque la technique de transfert présente un rendement très faible et donc les plantes non transformées sont très minoritaires.

Le risque lié au transfert de gène de résistance aux antibiotiques vers d'autres organismes (transfert horizontal) est très faible vers des cellules procaryotiques (types cellulaires différents), par ailleurs ces gènes ne peuvent s'exprimer dans les bactéries du fait de leur système d'expression. Le risque lié au transfert de gènes de résistance aux herbicides vers des plantes considérées comme nuisibles à la culture est plus ou moins important en fonction du degré de parenté géné-

rique, de l'éloignement géographique, du cycle de développement des plantes concernées. Le problème n'existe que si le même herbicide est utilisé dans la culture en champ, car l'utilisation des gènes de sélection n'est nécessaire que pour l'isolement des nouvelles variétés de plantes avant leur mise sur le marché.

D'autres marqueurs de sélection ont été envisagés, comme l'utilisation de gènes de synthèse d'hormones qui confèrent aux nouvelles cellules transformées une autonomie de croissance en culture *in vitro*, avant régénération. Ces gènes sont déjà présents dans le génome des plantes, cependant la présence de gènes supplémentaires et leur expression différente peut amener des anomalies dans le métabolisme des plantes transformées et ces gènes ont été abandonnés.

Les **gènes reporters** ou rapporteurs, comme leur nom l'indique, permettent d'identifier les plantes transformées. Le gène *uid A*, qui code pour une β -glucuronidase bactérienne (protéine GUS) est très utilisé en laboratoire mais uniquement pour tester le rendement d'une technique de transformation car le test de détection de la protéine GUS entraîne la mort des cellules concernées. Une autre catégorie de gènes reporters est représentée par les gènes *luc* qui codent pour des luciférases et proviennent des lucioles et vers luisants (*Photinus pyralis*), la luciférase qui est constituée d'un seul polypeptide (62 kDa où le Dalton Da est la masse de l'atome d'hydrogène) à localisation peroxysomique, permet l'oxydation de la luciférine ce qui amène l'émission de lumière; ainsi les cellules végétales transformées par ce gène vont émettre un rayonnement lumineux en présence de luciférine; ce traitement n'est pas destructeur de la cellule. De plus, de nouvelles luciférases ont été clonées, avec des longueurs d'ondes d'émission différentes, ce qui permet la détection simultanée de plusieurs gènes transférés.



APPLICATIONS POUR LES PLANTES TRANSGÉNIQUES

Les applications sont liées au transfert d'un seul caractère nouveau vers des plantes qui présentent un intérêt agronomique par de nombreuses caractéristiques qu'il ne faut pas modifier.

Résistance

Des terres cultivables peuvent être contaminées par des polluants qui ne permettent plus la culture de plantes nécessaires à la vie des personnes.

Ce sont notamment la présence de pesticides ou de métaux lourds dont la concentration anormale peut avoir des causes accidentelles (pollution), volontaires (guerres, pratiques culturelles), ou de nécessité de cohabitation de structures industrielles et agronomiques (mines près d'oasis et de terres cultivables). La création de variétés végétales qui peuvent s'accommoder de tels sols permet la survie des habitants, ce peut être aussi la création de plantes qui permettent la dépollution des sols et donc la croissance de plantes d'intérêt agronomique.

Les stress mécaniques, comme par exemple le vent, peuvent entraîner une perte importante de rendement chez certaines plantes. Ainsi il a été calculé que de forts vents peuvent entraîner une perte de poids des grains de blé (jusqu'à 30 %) et ceci indépendamment de la verse. En effet sous l'effet de stimuli mécaniques (frottements, piqûres, pincements, brûlures, etc.), les plantes diminuent leur croissance et le métabolisme de certaines productions. C'est par ces stress que sont obtenus les bonsaïs. Certaines plantes sont très sensibles, par exemple le liquidambar, arbuste utilisé en cosmétologie, présente une perte de poids importante (environ 30%), par rapport à une plante non traitée en pot, lorsqu'il est agité pendant 30 secondes tous les jours pendant un mois. Ainsi l'obtention de plantes qui présentent une bonne résistance à ces stress permettrait un gain intéressant.

Les insectes amènent différents types de nuisance aux cultures. Au cours de leur développement, à l'état de larve ou de chenille, ou lors de rassemblements cycliques (par exemple les criquets) les insectes herbivores peuvent détruire des quantités importantes de plantes. Les insectes sont aussi les véhicules de phytopathogènes, notamment de virus végétaux.

Lorsque ces insectes sont présents dans des cultures en serre, il est difficile de les déloger, car l'utilisation d'insecticides chimiques doit être évitée pour des risques de concentration dans les produits alimentaires.

D'autre part certains insectes sont utiles aux cultures, par exemple pour leur intervention dans la pollinisation ou dans la défense des plantes contre les insectes herbivores.

Une bactérie, commensale des plantes, le bacille de Thuringe (*Bacillus thuringiensis*) fabrique une protéine (un inhibiteur de protéase) qui ralentit le processus digestif des insectes herbivores, mais qui n'interfère pas avec les protéases digestives humaines. Cette pro-

téine est inactive lorsqu'elle est synthétisée dans la bactérie ; pour être active cette toxine doit être clivée par une endoprotéase spécifique présente dans la salive de l'insecte (les mammifères ne fabriquent pas cette endoprotéase). De plus, il existe différents types de toxine, produits par des souches différentes de *B. thuringiensis*, qui sont spécifiques de groupes d'insectes différents. Ainsi le transfert d'un gène de ces bactéries dans des plantes d'intérêt agronomique, permet de détruire les insectes nuisibles à la culture, en épargnant les autres, tout en évitant l'utilisation de produits chimiques très efficaces mais qui présentent souvent des risques d'accumulation dans l'environnement et deviennent alors dangereux pour la santé humaine. L'un de ces gènes, appelé *bt*, a été transféré dans des plants de maïs et de coton qui sont commercialisés par les USA.

D'autres molécules insecticides sont aussi produites par les plantes. C'est le cas de la pyrèthrine, produite par le pyrèthre (*Chrysanthemum cinerariaefolium*), qui est commercialisé comme insecticide biologique, car non dangereux pour l'homme. Depuis longtemps l'homme a eu connaissance de la capacité à éloigner ou à tuer les insectes, développée par certaines ; les bouchers avaient auparavant l'habitude d'accrocher des rameaux de gommiers à leur étal pour éloigner les mouches, il en est de même avec les géraniums ou la citronnelle vis-à-vis des moustiques. Durant ces dernières années, il a été montré que les plantes sont capables de synthétiser des molécules insecticides, comme des inhibiteurs de protéases, sous l'effet de certains stimuli ou stress. Ainsi les gènes qui codent pour les protéines les plus actives et spécifiques contre les insectes, pourront avoir leur expression développée dans les plantes cultivées, en permettant ainsi une autonomie de défense.

Dans la nature, certains individus des espèces végétales résistent de manière spécifique aux infections par des phytopathogènes fongiques ou bactériens. Cette résistance est corrélée à la présence de gènes spécifiques sous certaines formes alléliques. Ces gènes sont en cours de caractérisation et de localisation dans le génome de nombreuses espèces végétales. Les allèles et leurs produits sont étudiés. D'autre part il a été montré que les plantes savent se défendre contre les infections, même si elles n'ont pas les allèles de résistance, en produisant des molécules spécifiques (protéines, flavonoïdes, glucides) qui sont dirigées directement contre l'agresseur ou bien déclenchent un processus de défense généralisé, systémique, dans la plante.

L'expression de ces gènes, lorsque leurs rôles respectifs seront bien déterminés, pourra être maîtrisée chez les plantes cultivées pour accroître leur résistance aux parasites.

Productions spécifiques

Les plantes peuvent voir leur génome amélioré pour permettre certaines fonctions nouvelles.

Par exemple, les plantes, comme tous les êtres vivants, ont besoin d'azote pour construire certaines macromolécules vitales (acides nucléiques et protéines notamment). Les plantes utilisent essentiellement l'azote minéral présent dans le sol sous forme de nitrates; certaines plantes, qui produisent une grande quantité de biomasse, utilisent beaucoup d'azote et appauvrissent le sol en nitrates, il faut donc enrichir le sol après chaque culture, soit par l'assolement soit par l'addition d'engrais. L'assolement amène une diminution de la production de plantes, et d'autre part l'apport d'engrais peut amener une accumulation de nitrates dans l'environnement et donc dans l'alimentation humaine. La source naturelle la plus abondante en azote est l'air, mais les plantes n'ont pas la fonction de fixer l'azote atmosphérique ; certaines bactéries ou champignons ont cette capacité (d'ailleurs certaines plantes, notamment les légumineuses, ont développé un système symbiotique de relations avec certaines bactéries du sol, les rhizobiacées, pour avoir accès à cette source d'azote). La fixation de l'azote atmosphérique est sous la responsabilité d'une seule enzyme, la nitrogénase. Le problème paraissait simple à résoudre, il suffisait de faire s'exprimer cette enzyme dans les plantes. Seulement, cette enzyme a une structure complexe qui nécessite l'expression d'un grand nombre de gènes (17 chez *Klebsiella*), et, depuis près de 30 ans les chercheurs essaient de comprendre le processus de fonctionnement de ces différents gènes.

Certaines molécules sont nécessaires pour l'alimentation ou pour les soins des hommes et, pour différentes raisons (habitudes alimentaires ou sociales, particules infectieuses, ...), ces molécules ne peuvent être obtenues à partir de l'animal. Les plantes sont alors mises à contribution. Ainsi des protéines humaines à action thérapeutique sont produites à partir de plantes transformées par un gène humain. Des hormones (enképhalines, somastatine), des enzymes (lipase gastrique), des transporteurs (hémoglobine) ou des agents de défense (interféron) ont été produits par des plantes transgéniques ; l'intérêt supplémentaire que présente ce genre de production de protéines

humaines, par rapport à l'extraction de l'animal, est l'absence de rejet de ces protéines par le système immunitaire humain.

Les végétaux ne peuvent être utilisés seuls comme nourriture du fait de leur carence ou leur pauvreté en certains éléments vitaux, dont quelques acides aminés essentiels comme, par exemple, la lysine ou le tryptophane.

Des études d'amélioration des plantes en teneur pour ces éléments essentiels sont menées par l'intermédiaire de plantes transgéniques qui garantissent une conservation du génome initial à l'exception du gène transféré. L'utilisation de plantes recombinantes permet aussi la connaissance de voies métaboliques et l'amélioration de la production de métabolites secondaires spécifiques.

Structure des gènes

Les séquences géniques qui interviennent dans l'expression des gènes (promoteurs), dans la régulation de cette expression en réponse à des stimuli variés de l'environnement ou liés au développement de tissus, d'organes, peuvent être détectées et caractérisées grâce à leur introduction dans des plantes modèles en association avec des gènes reporters.



CONCLUSIONS

La transgénèse est une méthodologie qui présente des avantages par rapport à l'obtention d'organismes hybrides par les méthodes classiques de croisement-sélection :

- elle permet de conserver l'ensemble des caractères génétiques de l'organisme concerné à l'exception de la seule séquence génique qui est introduite

- elle permet de maîtriser l'expression de gènes spécifiques.

Ses applications concernent le domaine nutritionnel, le domaine médical (thérapie génique) et le domaine de la recherche fondamentale.

Actuellement, un certain nombre de points techniques reste encore à résoudre. Tout d'abord la maîtrise de l'intégration de la nouvelle séquence d'ADN par recombinaison dans le génome hôte n'est pas obtenue, en effet ce sont des mécanismes naturels non encore complètement élucidés qui président au lieu d'insertion et au nombre de copies insérées dans un génome.

D'autre part, la création de nouvelles variétés végétales transgéniques implique une stabilité du gène au cours des générations, c'est-à-dire une intégration du nouveau gène dans l'ADN chromosomique, au contraire, dans l'état actuel des connaissances, la thérapie génique et les vaccins à ADN nécessitent une expression du gène nouveau sous une forme non intégrée au génome hôte (afin d'éviter les risques éventuels de désorganisation de l'expression de gènes par une intégration dans des séquences de régulation, d'où le risque de néoplasie).

Le risque le plus souvent soulevé vis-à-vis de cette nouvelle méthodologie est le transfert horizontal des gènes concernés (surtout pour ceux qui peuvent amener de nouvelles caractéristiques à des pathogènes). L'homme, comme toujours, ne fait que découvrir ce que la nature effectue et qui restait en dehors de sa connaissance.

Chez les bactéries des transferts directs de gènes ont été mis en évidence depuis une cinquantaine d'années; il s'agit de la transformation, de la transduction et de la conjugaison. Ce dernier mécanisme d'accroissement de la variabilité génétique des individus s'apparente au processus de reproduction des organismes eucaryotiques, tout en étant très simplifié. Il nécessite une différenciation cellulaire alors que les 2 autres mécanismes de transfert s'effectuent spontanément. Cependant, ce mécanisme de transfert d'ADN est codifié pour chaque espèce bactérienne.

En effet, certaines cellules n'accepteront que de l'ADN bicaténaire, circulaire et surenroulé alors que chez d'autres espèces seul de l'ADN monocaténaire et linéaire sera accepté pour pénétrer dans la cellule.

Il a aussi été observé un transfert de gènes d'organisme eucaryotique vers des bactéries ; ainsi il a été isolé une souche de *Progenitor cryptocides*, bactérie associée à plusieurs tumeurs humaines, qui secrète *in vitro* de la gonadotropine chorionique.

Une superoxyde dismutase, enzyme de détoxification cellulaire, du poisson *Leiognathus splendens* a été retrouvée dans sa bactérie symbiotique luminescente *Photobacter leiognathi*. Des transferts inverses ont aussi été décrits comme par exemple le transfert de gènes de biosynthèse de toxine bactérienne de la bactérie endosymbiotique vers le génome de l'amibe *Amoeba proteus*.

De même les barrières biologiques naturelles, selon une classification

créée par l'homme, ont été transgressées par le passé pour la création de nouvelles espèces - par exemple, le colza (*Brassica napus*) qui comporte 38 chromosomes dans son génome provient du croisement du chou sauvage (*B. oleracea*, 18 chromosomes) et du navet (*B. campestris*, 20 chromosomes).

Règles de base de sécurité pour l'introduction de nouvelles variétés végétales

Risques primaires, surveillés et acceptés

- 1) Evaluation :
 - des modifications acceptables de l'environnement
 - de la limite de toxicité des aliments
 - de l'immunotoxicité
 - des allergies

Risques secondaires à maîtriser

- 2) Mise en place et développement :
 - des croisements et de la reproduction des plantes
 - de la connaissance du taux de variabilité naturelle de l'ADN au cours de l'évolution de la variété et de sa reproduction
 - sélection d'une technologie pour éliminer les phénotypes potentiellement dangereux.

BIBLIOGRAPHIE

"ADN recombinant",
WATSON, GILMAN,
WITKOWSKI,
ZOLLER
(édition De Boeck
Université, 1994)

"Génie génétique
et biotechnologies : concepts et
méthodes. Applications à
l'agronomie et aux bio-industries",
Yves TOURTE
(édition Dunod, 1998)

"Guerre et Paix
dans le règne végétal"
Bernard BOULARD
(édition Ellipses, 1990)

"Domestication" G. RICHARD,
1983., Encyclopedia Universalis,
corpus 6, 340-344

Science internaliste Science externaliste Le rôle de l'histoire

Jean-Claude COMPAIN



Après des études à l'École Normale Supérieure et l'obtention de l'Agrégation de chimie (1981), Jean-Claude Compain a consacré sa carrière à l'enseignement en Classe Préparatoire aux Grandes Ecoles, d'abord au lycée Jacques Decour, puis au lycée Saint-Louis, à Paris. Il s'intéresse depuis longtemps à l'histoire de la science qu'il enseigne. Il a publié divers articles dans ce domaine dans le Bulletin de l'Union des Physiciens et l'Actualité Chimique, il a collaboré au Dictionnaire d'histoire et de philosophie des sciences dirigé par Dominique Lecourt. Il a par ailleurs œuvré pour une meilleure prise en compte de la dimension historique dans l'enseignement scientifique du second degré.

L'article ci-dessous a fait l'objet d'une conférence au colloque d'histoire des Sciences organisé par l'Union des Professeurs de spéciales à Paris le 18 mai 2000.



Document 1 : Je suis le lion vert et l'or véritable.
Je porte au fond de moi tous les mystères
des philosophies.

Dans la deuxième leçon de son cours de philosophie positive, A. Comte dit : " Toute science peut être exposée suivant deux démarches essentiellement distinctes dont tout autre mode d'exposition ne saurait être qu'une combinaison : la marche historique et la marche dogmatique. " Pour A. Comte, la marche historique, c'est une exposition riche, nuancée, profonde, humaniste de l'évolution du savoir. La marche dogmatique, c'est en revanche une exposition rapide qui vise à l'efficacité de l'apprentissage. En fait, s'il met pour un instant en balance, à égalité, les deux méthodes, c'est pour préférer très vite la marche dogmatique, dès lors que la science exposée est assez développée pour posséder un passé et donc une histoire trop longue pour que l'exposé historique soit raisonnablement compétitif.

Certes, pour le chimiste que je suis, il ne saurait être question de proposer à mes élèves un exposé phlogisticien de l'oxydoréduction dans le goût du XVIII^e siècle ou, qui sait, en introduction à l'étude des diagrammes des phases, une chasse au lion vert dévorant le soleil [DOCUMENT 1], première étape de la transmutation, à savoir une fabrication de l'or vivant, à la suite d'un alchimiste aussi célèbre que méconnu, je veux parler d'Isaac Newton.

Toutefois, si une démarche exclusivement historique ne peut être proposée, quelques pages judicieusement choisies d'une histoire pas trop ancienne pourraient enrichir une démarche principalement dogmatique de dimensions qu'elle gomme

de façon structurelle. Or, si l'histoire des sciences n'intéresse pas seulement les historiens mais aussi les scientifiques, et vous êtes assez nombreux ici pour en témoigner, la science telle qu'elle se rêve ou du moins la science telle qu'elle se donne à voir, c'est-à-dire la science telle qu'elle s'enseigne est une science a-historique pour ne pas dire anti-historique.

Même dans le cadre délibérément ouvert des TIPE, l'expérience montre que les travaux proposant un axe historique fort sont l'exception. L'appel à témoignages que j'ai lancé sur le forum UPS il y a quelques mois en préparation de mon intervention d'aujourd'hui le montre de façon cruelle: deux réponses seulement ont été émises. Les deux collègues en question soulignaient l'un et l'autre l'intérêt de tels travaux, et l'accueil favorable qui leur était réservé par les jurys de concours.

Du recueil des lois et règlements de l'Instruction Publique du 16 février 1810 dans lequel on recommande à chaque professeur, je cite de mémoire, de " faire connaître l'histoire de la science qu'il enseigne, les auteurs et les ouvrages qui en ont fait reculer les limites " aux TIPE, on retombe toujours sur le même paradoxe maintenant pluriséculaire: Alors que le scientifique s'intéresse à l'histoire de son domaine, alors que ce point de vue est qualifié de pertinent, de légitime, voire de rentable, il est systématiquement délaissé, au profit d'une science sans histoire, quand ce n'est pas une science affublée d'une histoire de fantaisie dès lors que la science s'enseigne.

C'est à l'examen de ce paradoxe que je vous invite maintenant, à travers quelques exemples ponctuels, quelques coups de projecteurs portés ici où là pour comprendre comment ce paradoxe se met en place, comment il

fonctionne ou ne fonctionne pas et quelles conséquences il y a lieu de craindre ou d'en espérer. Et c'est dans un domaine que j'aime, celui de la chimie, vous l'aurez sans doute deviné, que je choisirai mes exemples.

LA RÉVOLUTION CHIMIQUE CONTRE L'HISTOIRE

Du mythe Lavoisier

De tous les chimistes français, Lavoisier est probablement celui dont le nom est connu du plus grand nombre. Tout le monde sait que ce grand chimiste a été guillotiné sous la Terreur. En fait, la culpabilité collective des Français fondateurs d'une République qui, selon le Président du tribunal qui l'a condamné, "n'avait pas besoin de savants" a suscité l'émergence d'un mythe tenace : le mythe d'un Lavoisier martyr de la science, héros romantique ayant mené à bien l'épopée de la création d'une chimie déjà adulte, directement issue de la sombre et sulfureuse alchimie.

Le Lavoisier "d'immortelle mémoire" ainsi décrit n'est pas le personnage historique. Si on peut lui donner sans réserve le titre de leader de l'école des chimistes français de la fin du XVIII^e siècle, il n'est certainement pas créateur ex nihilo ou peu s'en faut d'une science moderne à l'image d'une Vénus émergente de sa coquille et déjà au faite de sa beauté. La chimie avait droit de cité à l'Académie bien avant que Lavoisier n'en soit membre, elle comportait un corpus de doctrine riche et cohérent, elle comptait aussi, avec Venel par exemple, des expérimentateurs exceptionnels dont la pratique avait peu à voir avec une quête mystique de l'or véritable, elle était enfin étroitement liée aux sites de productions, que ce soient les officines d'apothicaires ou les vitrioleries industrielles.

Lavoisier n'est pas non plus un martyr de la science, puisque c'est le Fermier Général qui a été condamné. Il a été guillotiné en même temps que l'ensemble des Fermiers Généraux dont son beau-père, M. Paulze. La République se débarrassait de la Ferme Générale, et non pas d'un savant inutile comme le prétend cette phrase, d'ailleurs apocryphe, attribuée au président du tribunal. Quant à voir du romantisme chez ce contrôleur des impôts particulièrement pointilleux, je dois avouer que ni ses œuvres publiées

ni son courrier personnel n'en laissent entrevoir l'ombre d'une trace.

De la révolution chimique

L'histoire rend donc un hommage bien curieux à Lavoisier, et il ne l'a pas volé, car lui-même rend un hommage bien maigre à l'histoire. En 1773, Lavoisier a 30 ans. Il écrit dans son registre de laboratoire : "L'importance de l'objet m'a engagé à reprendre tout ce travail qui m'a paru fait pour occasionner une révolution en physique et en chimie".

Lavoisier révolutionnaire ? C'est lui-même qui le dit, mais que le mot ne nous abuse pas : car de la révolution des astres sur leur orbite à la révolution permanente des trotskistes en passant par la terreur de la révolution française, le mot est riche d'une polysémie trompeuse. En 1773, le mot de révolution ne désigne pas encore cette rupture radicale et sanglante qui vient immédiatement à l'esprit aujourd'hui. Ce n'est plus non plus le mouvement régulier, périodique et presque circulaire qui caractérise le mouvement des astres et qu'utilise Newton.

Aux yeux de Lavoisier, la révolution est un moment de renaissance, de reconstruction, oserai-je dire de re-fondation qui caractérise la fin d'une époque et le début d'une autre. Quand une tradition scientifique, certains diraient un paradigme, a porté ses fruits, il convient de réorganiser l'ensemble du champ de connaissances pour espérer avancer à nouveau, à l'image de l'agriculteur qui laboure son champ pour préparer l'année nouvelle. La révolution n'est pas une guerre, une révolte, c'est un événement naturel, périodique, inéluctable et fragile dont l'avenir dépend.

Il faut donc tout refaire, les expériences, les interprétations, les calculs. La tâche est immense et son issue incertaine. Bien clairvoyant aurait été celui qui aurait pu prédire à l'aube de ce travail que le point central en serait l'abandon de la théorie du phlogistique qui avait tellement fait progresser la chimie. Là encore, notre regard ne doit pas se laisser abuser parce que de cette histoire, nous en connaissons la fin.

Des acteurs de la révolution Lavoisienne

Dans l'aventure, toutes sortes d'acteurs sont mis à contribution. Il y a l'aisance financière et la position sociale, certainement. En février 1785, la cour se presse à l'Arsenal. Pendant deux jours Lavoisier porte à l'attention des grands de ce monde les expériences de synthèse et de décomposition de l'eau qui

mettent à bas l'antique notion de l'eau élémentaire.

Au rang des acteurs, il faut aussi compter la langue. Lavoisier qui se recommande de la philosophie de Condillac récuse la nomenclature traditionnelle. Les noms des choses doivent exprimer ce que sont les choses. Dès lors, il ne néglige aucun effort pour orienter selon ses vues le projet de réforme de la nomenclature de Guyton de Morveau.

Au rang des acteurs humains, Madame Lavoisier mérite ici une attention particulière. Elle n'est certainement plus la très jeune fille épousée à (presque) quatorze ans dans des circonstances où la romance amoureuse ne semble jamais avoir eu de place. Elle n'est pas non plus la grande dame fortunée qui se pavane dans le laboratoire de son époux comme veut le laisser accroire le célèbre tableau de David [DOCUMENT2], maintenant à New York, que les Lavoisier ont fait peindre pour une somme extravagante. Cette toile sent fort la composition, l'image que l'on compte donner au monde.

En regardant les cahiers de laboratoires, on voit que c'est souvent madame qui écrit, et non l'inverse, c'est madame qui dessine les gravures du Traité, souvent signées Marie-Anne Paulze, c'est madame qui traduit l'anglais, c'est madame qui donne de sympathiques petits soupers au cours desquels il est question de convertir tel ou tel chimiste comme Guyton de Morveau. Lavoisier dit bien "convertir" et non "convaincre". Ce mot que l'on réserve généralement au domaine religieux éclaire sur la dimension de



Document 2

doute ou de foi que comportait cette démarche. Si l'on observe à nouveau le tableau de David, le regard de monsieur, le regard de madame - David est un excellent peintre - on sait où est la foi, et dans quel regard se lit le doute. Au rang des acteurs, il faut compter aussi la méthode et les instruments. Lavoisier commande chez les horlogers les plus célèbres des centaines d'instruments d'un niveau de qualité exceptionnel. Il y a la célèbre balance de Fortin, qui donne des mesures à 5 chiffres significatifs, beaucoup plus que n'en nécessite la chimie Lavoisienne. Il y a aussi les cuves à mercure, les eudiomètres, les gazomètres qui permettent de piéger l'ensemble des produits intervenant dans la réaction chimique. Ces instruments permettent une relecture de réactions chimiques anciennes, dans le cadre de systèmes clos qui rendent possible un bilan des poids, et c'est ce bilan des poids, ce bilan comptable, qui symbolise la chimie nouvelle. La réaction chimique équilibre l'avant et l'après comme les deux plateaux d'une balance.

De l'amnésie comme arme révolutionnaire

Le "Traité élémentaire de chimie présenté dans un ordre nouveau et d'après les découvertes modernes" [DOCUMENT3] est le terme de cette révolution. Insistons sur ce point qui ne peut que flatter les professeurs que nous sommes : Lavoisier qui n'a jamais eu d'élève écrit un manuel d'enseignement pour couronner son œuvre.

C'est donc au professeur que revient l'honneur de tracer de la science le portrait qu'elle compte donner d'elle-même. Lavoisier s'adresse à ceux qui se livrent "pour la première fois à l'étude de la science". Aux autres il conseille l'amnésie; il faut blanchir sa mémoire de toute la science passée, faire place nette et jeter l'histoire aux orties. La multiplicité foisonnante des acteurs qui interviennent dans le processus de production du dogme scientifique est occultée; comme est occultée aussi l'extrême sophistication des processus de construction des observations scientifiques que le professeur appelle curieusement les "données". Ce mensonge historique n'est pas un accident, il contribue à la construction du dogme, il en est la phase ultime.

On ne sera guère surpris dans ces conditions que Lavoisier ne cite à peu près jamais ses prédécesseurs. On ne sera guère surpris non plus que l'on ait tendance à attribuer à Lavoisier des grandes idées qui l'ont largement précédé comme la notion moderne d'élément ou le principe de la conservation

TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE DE CHIMIE,

PRÉSENTÉ DANS UN ORDRE NOUVEAU
ET D'APRÈS LES DÉCOUVERTES MODERNES;
Avec Figures :

Par M. LAVOISIER, de l'Académie des Sciences, de la Société Royale de Médecine, des Sociétés d'Agriculture de Paris & d'Orléans, de la Société Royale de Londres, de l'Institut de Bologne, de la Société Helvétique de Basle, de celles de Philadelphie, Harlem, Manchester, Padoue, &c.

TOME PREMIER.



A PARIS,

Chez CUCHET, Libraire, rue & hôtel Serpente.

M. DCC LXXXIX.

Sous le Privilège de l'Académie des Sciences & de la Société Royale de Médecine.

Document 3

de la matière : Ces notions sont siennes parce qu'il les utilise dans une construction de la science qui est sienne.

De la construction d'une science datée

Toutefois, si le Traité élémentaire de chimie est anti-historique, il est historiquement daté. Il est daté parce que, entre l'intention et la réalisation, il y a, pour le moins, une distance. Lavoisier entame le corps du discours par une série de chapitres parmi lesquels on trouve le calorique, l'atmosphère, l'eau, et enfin les substances terreuses avant d'aborder, p 192 seulement [DOCUMENT4], le tableau des substances simples. Il est difficile de ne pas voir dans ce plan, la rémanence des quatre éléments antiques (le feu devenu calorique, l'air devenu atmosphère, l'eau et la terre devenues substances terreuses), éléments antiques que Lavoisier récite.

On peut dire aussi que le Traité Élémentaire est daté parce que la définition des corps simples comme termes ultimes des expériences de décomposition est une notion contingente et datée. Il est difficile de ne pas voir, parmi les substances simples proposées la lumière et le calorique, substances auxquelles ce champion de la balance ne peut attribuer de poids, ainsi que les terres qui résistent encore à la décomposition. Le Traité ne peut être qu'une construction provisoire.

Comparons la liste des corps simples de Lavoisier à celle qui ouvre, le 14 novembre 18** - je ne donne pas l'an-

	Noms nouveaux.	Noms anciens correspondans.
	Lumière.....	Lumière. Chaleur.
	Calorique.....	Principe de la chaleur. Fluide igné.
Substances simples qui appartiennent aux trois règnes & qu'on peut regarder comme les éléments des corps.	Oxygène.....	Matière du feu & de la chaleur. Air déphlogistiqué. Air empyréal.
	Azote.....	Air vital. Bâse de l'air vital. Gaz phlogistiqué.
	Hydrogène.....	Bâse de la mofette. Gaz inflammable. Bâse du gaz inflammable.
Substances simples non métalliques oxidables & acifiables.	Soufre.....	Soufre.
	Phosphore.....	Phosphore.
	Carbone.....	Charbon pur.
	Radical muriatique.....	Inconnu.
	Radical fluorique.....	Inconnu.
	Radical boracique.....	Inconnu.
	Antimoine.....	Antimoine.
	Argent.....	Argent.
	Arsenic.....	Arsenic.
	Bismuth.....	Bismuth.
Cobalt.....	Cobalt.	
Substances simples métalliques oxidables & acifiables.	Cuivre.....	Cuivre.
	Étain.....	Étain.
	Plomb.....	Plomb.
	Or.....	Or.
	Platine.....	Platine.
	Magnésium.....	Magnésium.
	Manganèse.....	Manganèse.
	Mercure.....	Mercure.
	Molybdène.....	Molybdène.
	Nickel.....	Nickel.
Substances simples métalliques non oxidables & non acifiables.	Per.....	Fer.
	Manganèse.....	Manganèse.
	Mercure.....	Mercure.
	Molybdène.....	Molybdène.
	Nickel.....	Nickel.
	Or.....	Or.
	Platine.....	Platine.
	Plomb.....	Plomb.
	Tungstène.....	Tungstène.
	Zinc.....	Zinc.
Substances simples métalliques non oxidables & non acifiables.	Chaux.....	Terre calcaire, chaux.
	Magnésie.....	Magnésie, base du sel d'Éprou.
	Baryte.....	Baryte, terre pesante.
	Alumine.....	Argile, terre de l'alun, base de l'alun.
	Silice.....	Terre siliceuse, terre vitrifiable.

Document 4

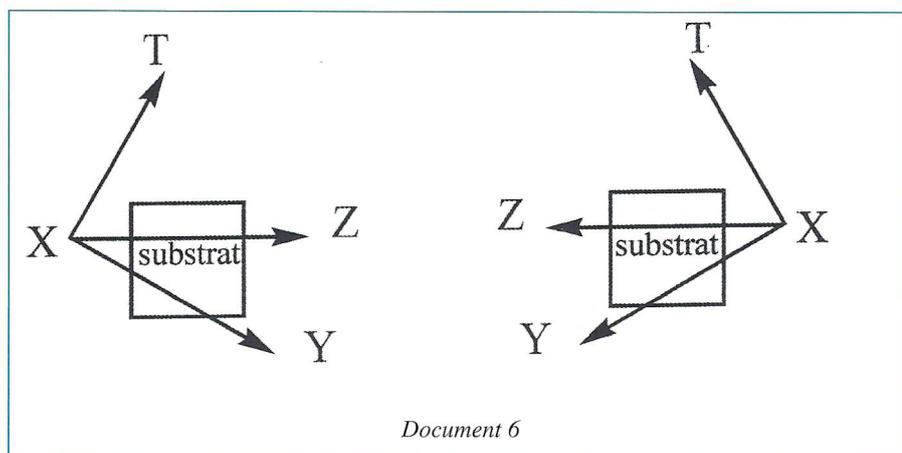
née - le cours de chimie donné à l'École Polytechnique à des étudiants quasiment débutants en chimie [DOCUMENT5]. La lumière et le calorique n'ont plus droit au statut de corps simple. Les terres indécomposées ont laissé la place au calcium, au magnésium, au baryum, au silicium. De plus la liste est beaucoup plus longue, les halogènes sont nés, le professeur cite même le fluor, il avoue exagérer, le corps simple n'existe pas encore.

Le thorium et le vanadium sont là, le niobium est en pleine éclipse, le lanthane et le ruthénium ne sont pas cités. Nous sommes sans aucun doute dans les années trente.

pour le verser dans un vase.

Hydrogène	H	Hydrogène	H
Oxygène	O	Phosphore ou holim	K
Acide muriatique	N	Sodium ou natron	Na
Fluor	F	Lithium	L
Chlore	Cl	Baryum	Ba
Brome	Br	Strontium	St
Iode	I	Calcium	Ca
Soufre	S	Magnésium	Mg
Silicium	Si	Glaucium	G
Tellurium	Te	Yttrium	Y
Arsenic	As	Thorium	Th
Phosphore	P	Zirconium	Zr
Carbone	C	Aluminium	Al
Bore	B	Strontium	St
Silicium	Si	Fer	Fe
Vanadium	V	Uranium	U
Chrome	Cr	Zinc	Zn
Antimoine	Ant	Cadmium	Cd
Molybdène	Mo	Cobalt	Co
Nickel	Ni	Nickel	Ni
Plomb	Pb	Plomb	Pb
Bismuth	Bi	Bismuth	Bi
Cuivre	Cu	Cuivre	Cu
Mercure	Hg	Rhodium	Rh
Argent	Ag	Iridium	Ir
Palladium	Pd	Strontium	St
Platine	Pt	Or (aurum)	Au

Document 5



C'est en effet le cours de Gay-Lussac de 1838. Sur les 54 éléments de la liste, 8 représentent une transformation profonde de la science Lavoisienne, 23 sont totalement nouveaux.

Ce sont encore les corps simples qui fondent la chimie de Gay-Lussac, et ces corps simples sont conformes à la définition classique de substances indécomposées, définition qui a encore de beaux jours devant elle puisqu'elle perdurera jusqu'à ce que les atomes eux-mêmes cessent d'être des indécomposables, et que la notion d'isotopie multiplie les catégories d'atomes. Les corps simples de Gay-Lussac sont pour moitié au moins des corps artificiels, issus des laboratoires depuis moins d'un demi-siècle.

Ces substances nouvelles sont autant de succès pour les chimistes, mais ce sont aussi des succès ultimes ou, si l'on change de regard, les premiers échecs. L'enseignement débute là où s'achève l'histoire de la recherche. La liste des corps simples est, une fois encore ouverte, provisoire et datée, même si, ici encore, l'histoire est presque totalement gommée: un nom, une date ponctuent pour tout potage l'introduction des monographies qui suivent sur les principaux corps simples.



LE CARBONE HISTORIQUEMENT ASYMETRIQUE

Tournons maintenant les projecteurs vers une autre page de l'histoire de la science qui intéressera probablement nos collègues mathématiciens: celle de l'intrusion de la géométrie en dimension 3 dans le champ scientifique du chimiste. L'histoire débute à l'automne 1874, quand deux jeunes chimistes, Le Bel et Van't Hoff proposent indépendamment l'un de l'autre de sortir la molécule chimique du plan du papier. Il ne s'agit pas d'une révolution, au

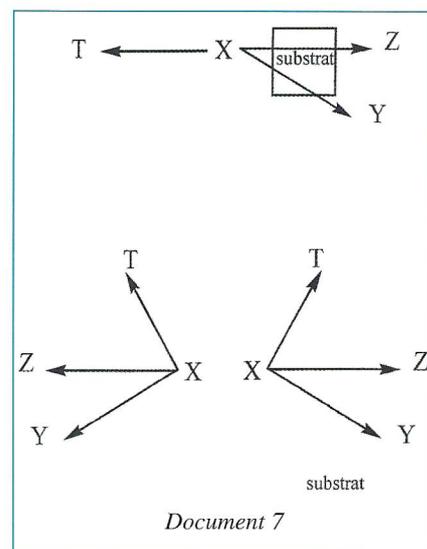
sens Lavoisien du terme. C'est au contraire l'œuvre timide de deux jeunes chercheurs débutants, une idée qui a percolé lentement dans la façon de penser des chimistes. Il faut dire qu'en 1874, surtout à Paris où règne l'anti-atomiste irréductible et tout-puissant Berthelot, faire des molécules un objet géométrique frisait l'inconvenance.

Le point de vue de Le Bel

Le Bel considère que les molécules sont des édifices de géométrie fixe. Si cet édifice n'est pas superposable à son image dans un miroir, la substance aura une activité optique, c'est-à-dire qu'elle déviara le plan de polarisation d'une lumière polarisée plane. C'est cette propriété physique observable qui est au centre de ses préoccupations.

Il considère le cas de molécules formées d'un substrat quelconque de quatre terminaisons ponctuelles [DOCUMENT6].

Ces terminaisons peuvent être des atomes d'hydrogène, des substituants monoatomiques ou des substituants polyatomiques pourvu qu'ils puissent être considérés comme ponctuels. Si ces quatre points sont différents, ils peuvent être classés arbitrairement selon une relation d'ordre. Ils permettent donc de définir un édifice non superposable à son image dans un miroir, c'est-à-dire un repère d'espace orienté. L'ensemble de l'édifice est alors asymétrique, la molécule est optiquement active.

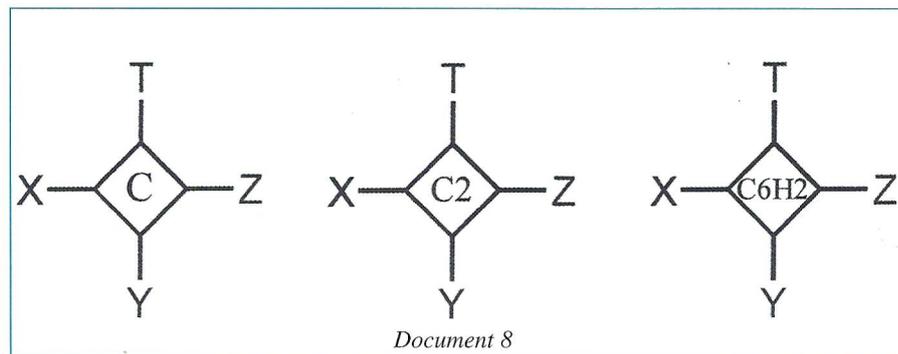


Il y a naturellement deux exceptions [DOCUMENT7]: d'une part, lorsque les quatre substituants sont coplanaires, et qu'ils ne forment alors pas un repère d'espace; d'autre part, lorsque l'introduction du substrat rétablit une symétrie de plan, par exemple quand il est ou quand il contient le symétrique de l'ensemble des substituants considérés.

Le lecteur contemporain pense immédiatement au cas du carbone lié à quatre substituants différents. Il s'agit d'une lecture a posteriori puisque les exemples de substrats cités dans le texte primitif sont C pour le méthane, C₂ pour l'éthylène et C₆H₂ pour le benzène [DOCUMENT8]. Pour le méthane, l'existence de dérivés actifs tri ou tétrasubstitués et l'inexistence de dérivés actifs disubstitués le conduisent à admettre pour le substrat C la géométrie du tétraèdre régulier. L'éthylène en revanche est plan: il illustre le premier cas d'exception cité.

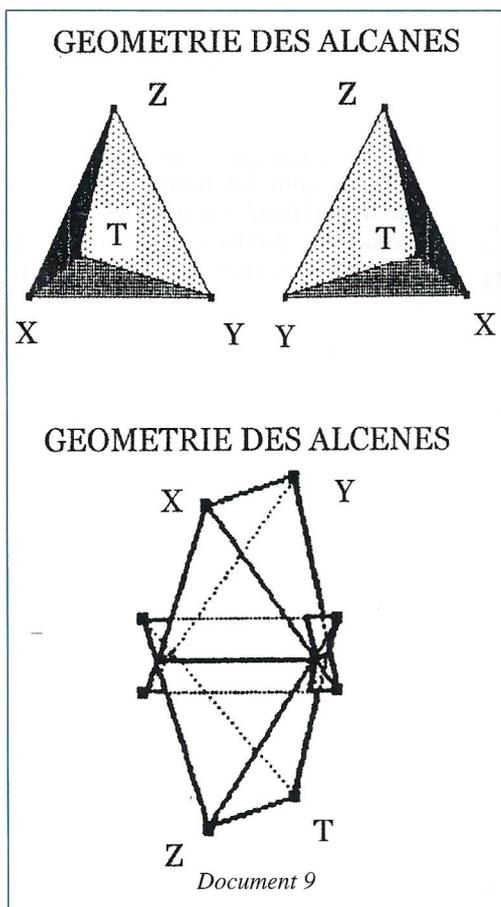
Le point de vue de Van't Hoff

Le but poursuivi par Van't Hoff est de nature différente. Il cherche à dénombrer les cas d'isomérisie, c'est-à-dire le nombre de substances différentes, ou pouvant être mises dans des flacons différents et correspondant à la même formule développée plane. C'est donc à un problème concret de la chimie organique de synthèse en plein développement à l'époque qu'il s'attaque.



Van't Hoff pose en principe que les affinités de l'atome de carbone sont dirigées vers les sommets d'un tétraèdre régulier, et que cette géométrie est fixe. Il confronte les déductions qui découlent de cette hypothèse avec les résultats expérimentaux.

Dans le cas du méthane substitué, on obtient bien un seul isomère si deux substituants sont identiques, deux s'ils sont tous différents [DOCUMENT9]. Il nomme "asymétriques" de tels atomes de carbone.



Dans le cas des alcènes, les atomes de carbone sont réunis par deux sommets. Les substituants sont donc dans un même plan, d'où l'existence d'une isométrie géométrique que nous appelons aujourd'hui Z/E si les substituants portés par chaque carbone sont différents. Pas d'isométrie en revanche pour les alcynes pour lesquels les tétraèdres partagent un plan et dirigent leur unique substituant le long du même axe C3.

Une histoire source de confusion ?

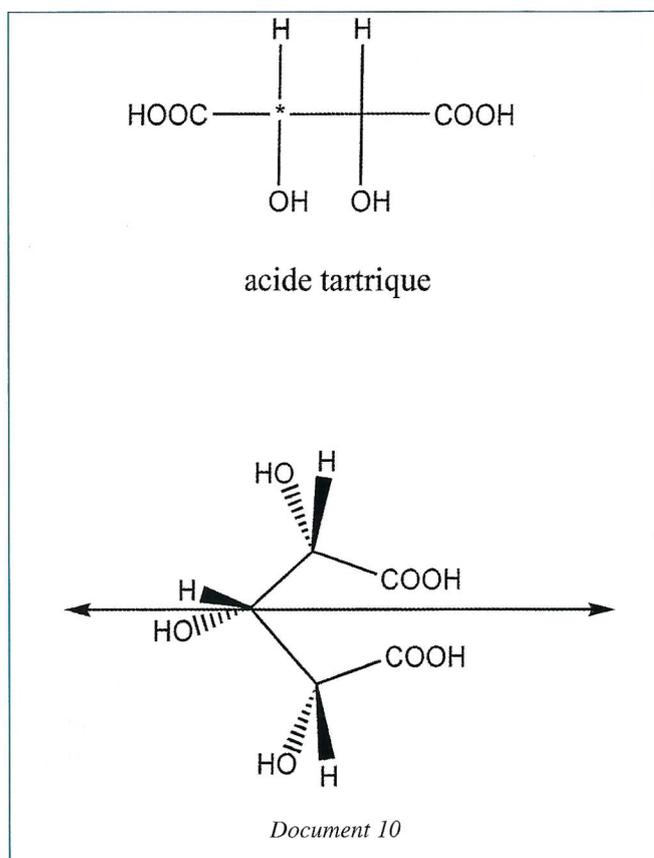
Les deux théories se rejoignent sur le cas particulier du méthane suffisamment substitué. Elles sont pourtant d'essence très différente. L'histoire montre qu'elles vont s'attirer, se mélanger jusqu'à l'incohérence, sans réécriture ou presque, jusque dans les ouvrages d'enseignement les plus récents où l'on

retrouve les définitions historiques, au mieux assorties de quelques prudentes réserves à l'évidence inaccessibles aux étudiants à qui le discours prétend s'adresser.

Le point de vue qui prime, dans la dernière partie du siècle, c'est certainement le point de vue de Van't Hoff, sans doute parce que les brillantes considérations de géométrie en dimension 3 sont plus familières aux polytechniciens dont le Bel fait partie qu'à l'ensemble de la communauté des chimistes de l'époque. Eux en revanche, maîtrisent parfaitement les formules développées, particulièrement multipliées et ardues chez les auteurs équivalents de l'époque.

Wurtz publie en 1883 une des éditions de son ouvrage pro-atomiste qui a été un grand classique: La théorie atomique. Il connaît bien Le Bel et Van't Hoff pour avoir été le professeur de l'un et de l'autre et il a certainement reçu leur travail avec la plus grande bienveillance. L'exposé qu'il fait de leurs travaux est cependant bien modeste: moins de quatre pages en fin d'ouvrage. Il évoque la pensée de MM Le Bel et Van't Hoff : L'assimilation est donc déjà faite. Le point de vue qu'il expose est en fait le point de vue de Van't Hoff, et il désigne le carbone tétraédrique substitué comme responsable de l'activité optique.

Parmi les rares exemples cités, on peut relever avec humour le cas de l'acide tartrique, donné comme actif parce qu'il possède un atome de carbone asymétrique. Or, l'un des substituants de l'atome de carbone asymétrique ainsi choisi ne peut en aucun cas être considéré comme ponctuel, il possède lui-même un atome de carbone asymétrique; il n'est donc pas invariant dans une symétrie plane.

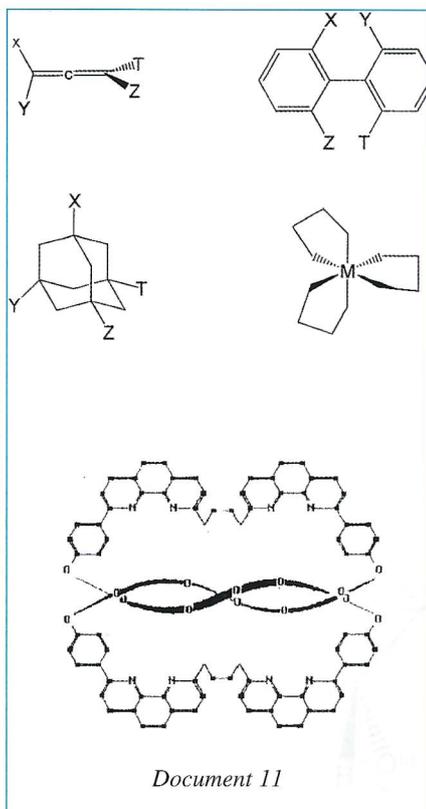


Le carbone désigné par Wurtz est asymétrique au sens de Van't Hoff, puisqu'il y a deux dispositions possibles des substituants autour de lui, c'est-à-dire qu'il est stéréogène. la structure globale n'est pas nécessairement asymétrique et donc pas nécessairement active. Wurtz qui connaissait sans nul doute l'acide méso-tartrique inactif et de même formule développée plane n'a pas saisi le point de vue de Le Bel [DOCUMENT10].

Il y a plus choquant encore. On connaît maintenant des exemples de molécules dans lesquelles un atome de carbone est substitué, entre autres, par deux groupements qui sont image l'un de l'autre dans un miroir et qui sont non superposables.

Alors que cet atome doit être appelé "asymétrique" selon la définition malheureuse de Van't Hoff, la molécule globale possède un plan de symétrie passant par cet atome. L'atome de carbone asymétrique appartient au plan de symétrie de la molécule. C'est sans doute pourquoi on lui donne parfois le qualificatif un peu gêné avouons le, de "pseudo-asymétrique".

A l'inverse l'ensemble des substances optiquement actives et ne comportant pas de carbone asymétrique, ensemble qui était en 1874 un ensemble vide, et qui intéressait donc peu les chimistes plutôt orientés vers le concret, est



Document 11

maintenant riche d'éléments aussi intéressants que variés [DOCUMENT11]: allènes, biphényles, adamantanes tous judicieusement substitués, complexes octaédriques des métaux de transition ou encore molécules à chiralité topologique.. A l'évidence, la définition du carbone asymétrique donnée par Van't Hoff en 1874 ne survivrait pas à une réécriture à la Condillac ou une refondation à la Lavoisier du champ scientifique concerné.



LA SYNTHÈSE DE L'AMMONIAC

Cette synthèse dans les programmes d'enseignement

Pendant des dizaines d'années, le programme de chimie des classes préparatoires a comporté un chapitre sur la synthèse de l'ammoniac, un exemple de chimie industrielle minérale de poids. Entre 1960 et 1965 plus de deux sujets de concours par an portaient sur ce thème, en moyenne. C'était le type même du sujet bateau que le professeur pouvait réciter avant même qu'il ne soit sorti des enveloppes.

Il faut dire que le sujet est vaste et qu'avec le calcul d'un état d'équilibre, de l'influence de la pression, de la température, de la composition, il permet de décliner un gros morceau de la thermodynamique d'équilibre. C'étaient les gammes, arpèges et renversements du taupin. Les questions sur l'utilité d'une telle synthèse en revanche étaient rares.

Enfin, cet exemple a disparu du programme. Ce n'était pas parce qu'il avait épuisé la patience des professeurs de Spé, pourtant mise à rude épreuve, mais parce qu'il avait fait son apparition dans le programme de seconde au chapitre " l'industrie chimique et les engrais ". Au moins n'était-il plus question à ce niveau d'effectuer les calculs taupins des années antérieures. Nouveauté encore au BOEN du 29 octobre 1998 dans lequel on lit: la rubrique est supprimée; seule la synthèse de l'ammoniac est conservée et placée dans les " éléments chimiques du globe et de l'univers. "

Je ne sais pas qui est l'auteur de cet avatar, encore que le titre de la rubrique suscite quelque intuition, mais il faut avouer que c'en est trop ! Passons sur la confusion entre corps simple et élément, un peu regrettable quand il s'agit de traiter des éléments " hors globe ", domaine dans lequel la nucléosynthèse et le rapport isotopique D/H jouent un rôle central, mais présenter la synthèse de l'ammoniac comme une utilisation de ressources naturelles du globe en corps simples, c'est manquer l'essentiel.

La nature de l'enjeu

La synthèse de l'ammoniac à partir d'azote et d'hydrogène a constitué un enjeu crucial à la fin du XIX^e siècle en raison de l'explosion démographique qu'a connue l'Europe à cette période. 21 millions d'habitants en Angleterre en 1815, 50 % de plus en 1870, ce sont 50 % de plus de bouches à nourrir avec une surface cultivable à peu près inchangée. Passer d'une agriculture traditionnelle à une production forcée est une question de survie.

L'idée d'un apport en engrais visant à compenser le prélèvement dû aux récoltes est une idée déjà ancienne, soutenue par Lavoisier - encore une question de bilan - puis par Liebig. La nécessité d'un apport en azote est en revanche une surprise puisque l'azote moléculaire constitue 80 % de l'atmosphère. En fait, l'azote moléculaire ne peut pas être assimilé par les végétaux, à quelques rares et peu performantes exceptions près et c'est sous forme de nitrate que l'azote peut être assimilé. Les nitrates sont des sels très communs, et le problème n'est à l'évidence pas un problème qualitatif. C'est un problème purement quantitatif: il faut utiliser des tonnages énormes de nitrates.

Une solution intelligente consiste à utiliser l'ammoniac qui est un sous-

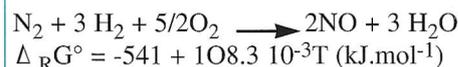
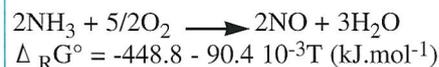
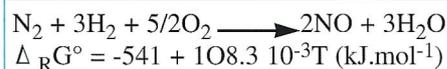
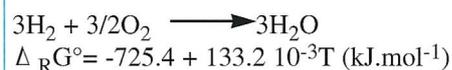
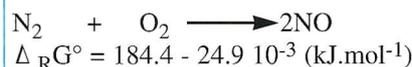
produit de la distillation de la houille. L'oxydation de l'ammoniac en acide nitrique via l'oxyde d'azote NO est connue et ne pose pas de difficultés particulières. Elle n'est d'ailleurs pas indispensable au niveau de l'industrie chimique, car elle peut être sous-traitée aux bactéries qui vivent dans l'humus et qui effectuent cette opération de bonne grâce. La lente transformation obtenue de cette façon présente même de sérieux avantages au niveau de la disponibilité du produit.

Malheureusement, la distillation de la houille ne produit pas des quantités suffisantes.

Une autre solution a vu le jour avec l'exploitation des nitrates naturels du Chili à partir des années 1870. En 1902, ce sont 1.3 millions de tonnes qui sont exportées à bord des caphorniers. Cette production massive a fait quelques brillantes fortunes, mais les gisements sont peu importants et donc vite épuisés. L'unique solution restante est d'utiliser la source inépuisable d'azote, l'atmosphère.

Une voie détournée vers les nitrates

L'oxydation de l'azote par l'oxygène pour former l'oxyde d'azote NO est une réaction qui ne marche pas. Toute personne ayant une connaissance même modeste de la composition de l'atmosphère ne s'en étonnera pas. une étude plus quantitative [DOCUMENT12] montre que c'est l'extraordinaire stabilité de la molécule d'azote qui piège cet élément dans un état dont il est très difficile de sortir. Une élévation de température améliore le rendement de cette réaction très endothermique, on franchit glorieusement la barre psychologique des 1% vers 2000 K, tout juste



Document 12

de quoi polluer l'atmosphère de nos villes par les gaz d'échappement des voitures. C'est pourtant cette synthèse catastrophique qui fut mise en œuvre en 1910, en Norvège, où les chutes d'eau permettent d'obtenir de l'électricité à bas prix, mais la solution n'est pas là.

On peut aussi coupler cette réaction à une autre, thermodynamiquement favorable, pour donner un ensemble acceptable. La synthèse de l'eau, déjà rencontrée avec Lavoisier a l'inconvénient d'utiliser de l'hydrogène, qu'il faut fabriquer, et de fournir de l'eau, ce qui ne présente aucun intérêt synthétique, mais sa thermodynamique est fastueuse. Pour coupler ces deux réactions, c'est avec l'hydrogène que l'on fait réagir l'azote pour former l'ammoniac, qui sera ensuite oxydé par l'oxygène. Au lieu d'oxyder l'azote, on le réduit donc au degré d'oxydation -III avec l'hydrogène pour oxyder l'ammoniac formé, passer, " sans escale " au dessus du degré d'oxydation zéro et atteindre le degré II. La suite de la synthèse se faisant sans difficulté.

Chacune des étapes est alors thermodynamiquement viable. Tout juste viable, car pour la synthèse de l'ammoniac, il faut soigner les conditions, travailler à haute pression, à relativement basse température, trouver un bon catalyseur. Dès 1901 des conditions de fonctionnement acceptables avaient été arrêtées et un brevet avait été pris par Le Châtelier. L'enjeu n'était donc plus ni qualitatif ni théorique mais quantitatif et technique: le travail à haute pression avec de l'hydrogène représentait encore un obstacle majeur. C'est l'Allemand Fritz Haber [DOCUMENT13], que la BASF met sur projet, secondé par l'ingénieur Bosch. La synthèse se fait au stade du laboratoire en 1909, l'unité pilote fonctionne en 1911, la production de masse démarre en 1913.

Très peu de temps après, le procédé connu sous le nom de procédé Haber-Bosch va jouer un rôle encore plus important que prévu dans l'histoire politique de l'Europe, parce que, si les plantes aiment bien les nitrates, c'est aussi le cas des militaires qui en font, par moments, un usage intensif. Sans ce procédé, l'Allemagne coupée des approvisionnements chiliens n'aurait pas pu soutenir l'effort de guerre plus de quelques mois.

La synthèse de l'ammoniac est donc au cœur de l'histoire de l'Europe, et le rôle qu'elle y joue est plus inattendu, plus ambigu, plus contesté qu'on ne pouvait le croire. Plus contesté encore est le

rôle personnel de Fritz Haber, lourdement impliqué dans la fabrication et l'usage des gaz de combat, et qui reçoit en 1918 le Prix Nobel pour la synthèse de l'ammoniac avec le titre de bienfaiteur de l'humanité. On est loin, fort loin, des calculs standardisés et stériles que nous évoquions tout à l'heure, mais on touche, enfin au cœur du problème.



CONCLUSION

Notre promenade s'achève ? Les trois épisodes que nous avons observés ne nous ont pas conduits aux mêmes conclusions quant au rôle de l'histoire. Délibérément écarté par Lavoisier du processus interne de refondation du dogme scientifique, l'exposé historique est même apparu comme source de confusion quand, au cours de temps plus sereins, il a réussi à perdurer. En revanche, l'éclairage historique a semblé indispensable quand, loin des débats théoriques internes, la chimie est devenue un acteur incontournable de la vie politique et sociale.

Faut-il en déduire que l'histoire n'a pas de place à côté d'une science internaliste et qu'elle s'impose dès lors que la science s'ouvre au monde ? Il faudrait pour cela prétendre que les exemples ici exposés peuvent être généralisés sans réserve. Je ne m'y risquerais pas. Il faudrait aussi prétendre qu'une science internaliste vit aux côtés d'une science externaliste sans contact et



Document 13

sans échanges. Comment prétendre à une telle schizophrénie ? La frontière est sans doute plus diffuse, plus floue que je ne l'ai fait voir. Plus diffus et plus flou, plus paradoxal encore est alors pour nous le rôle de l'histoire. N'est-ce pas ce que nous voulions comprendre ?

BIBLIOGRAPHIE PRINCIPALE

LIVRES

- Aftalion F.: 1988: *Histoire de la chimie*, ed Masson, Paris.
- Bensaude-Vincent B. : 1993 : *Lavoisier*, ed Flammarion, Paris.
- Bensaude-Vincent B. : 1992 : *Histoire de la chimie*, ed La Découverte, Paris.
- Lavoisier 1789, 1965 : *Traité élémentaire de chimie*, ed Cuchet réédition Culture et civilisation Bruxelles.
- Pasteur L; Van't Hoff J. H., Werner, A., : réédition de 1986 sous la direction de Jacques J.: *Sur la dissymétrie moléculaire*, ed Christian Bourgois, Paris.
- Wurtz Ad: 1883: *La Théorie atomique*, ed Germer Baillière et Cie, Paris.

PERIODIQUES

- Compain J.C.: *Les travaux de Le Bel et Van't Hof de 1874 et notre enseignement in: Bulletin de l'Union des Physiciens*, 1992 N° 741 Février 1992.
- Compain J. C.: *L'eau: la fin d'un élément*, in: *L'actualité chimique*, mars-avril 1994.

ILLUSTRATIONS

- Brun: cahier de cours manuscrit de l'école polytechnique, collection privée.
- Rival M.: 1996: *Les apprentis sorcières*, ed Seuil, Paris.
- Roob Alexander: 1997: *Alchimie et Mystique*, ed Taschen, Paris.
- Goupil M.: 1992: *Lavoisier et la révolution chimique*, ed Sabix-Ecole polytechnique.



Nos activités au cours du 4^e trimestre 2000

◀ Françoise Paladian au cours de sa conférence

- Conférences

Le 13 septembre 2000 : "La compatibilité électromagnétique" par Françoise Paladian

Maître de conférences à l'Université Blaise Pascal.

Le 18 octobre 2000 : "Nuages, pollution, climat" par Nadine Chaumerliac, directeur de recherche au CNRS.

Le 15 novembre 2000 : "Les codes secrets de l'antiquité à nos jours" par Paul-Louis Hennequin, Professeur émérite à l'Université Blaise Pascal.

Le 6 décembre 2000 : "Imagerie médicale et isotopes radioactifs" par le Professeur Jean Maublant du Centre Jean Perrin.

- Visite

Le 18 octobre 2000 : visite de la sucrière Bourdon à Aulnat.

- Le forum des associations

L'A.D.A.S.T.A. était présente parmi cent quarante deux associations. La manifestation a eu lieu à Polydôme les 7 et 8 octobre 2000.

- La Fête de la Science du 16 au 21 octobre 2000.

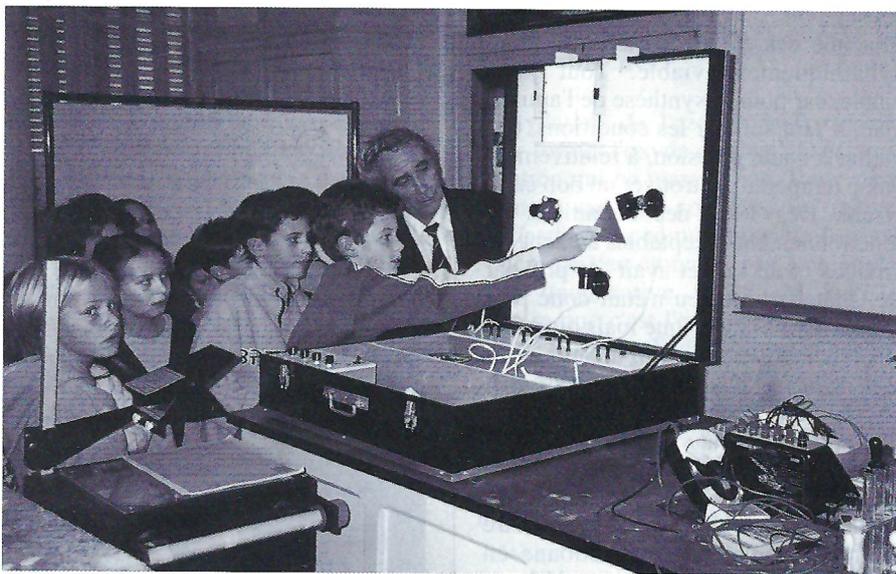
Notamment grâce au prêt de matériel scientifique l'A.D.A.S.T.A. a assuré un partenariat auprès des établissements scolaires suivants :

- Le lycée Professionnel Pierre Boulanger à Pont-du-Château,

- Le lycée Descartes à Cournon,
- Le lycée privé Sainte Marie de Riom,
- Le lycée privé Godefroy de Bouillon à Clermont-Ferrand,
- Les collèges de Gelles, Giat, et Pontaurmur.

- A l'ADASTA

Présentation sur rendez-vous d'expériences de physique.



La couleur au collège de Giat

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

Président
Premier Vice-Président
Second Vice-Président
Troisième Vice-Président
Secrétaire Générale
Secrétaire adjoint
Trésorier

Jean-Claude CAPELANI
Paul AVAN
Alain COULOMBEAU
Marcelle PROFIT
Pierrette TOURREIX
Guy ROBERT
André PROFIT

Chargée de la communication et de la Vidéo
Rédactrice en chef de la Revue
Chargé de l'informatique
Chargée de la communication avec les établissements scolaires
Chargé de la communication avec les universités
Chargé des relations avec les professeurs des Sciences de la Vie et de la Terre
Chargé de l'Astronomie

Marcelle PROFIT
Jocelyne ALLEE
Bernard RAGOUT

Suzanne GELY
Paul-Louis HENNEQUIN

Guy ROBERT
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

Michel DOLY

Guy DURAND

Roland JOUANISSON

Marie-Colette MORENAS

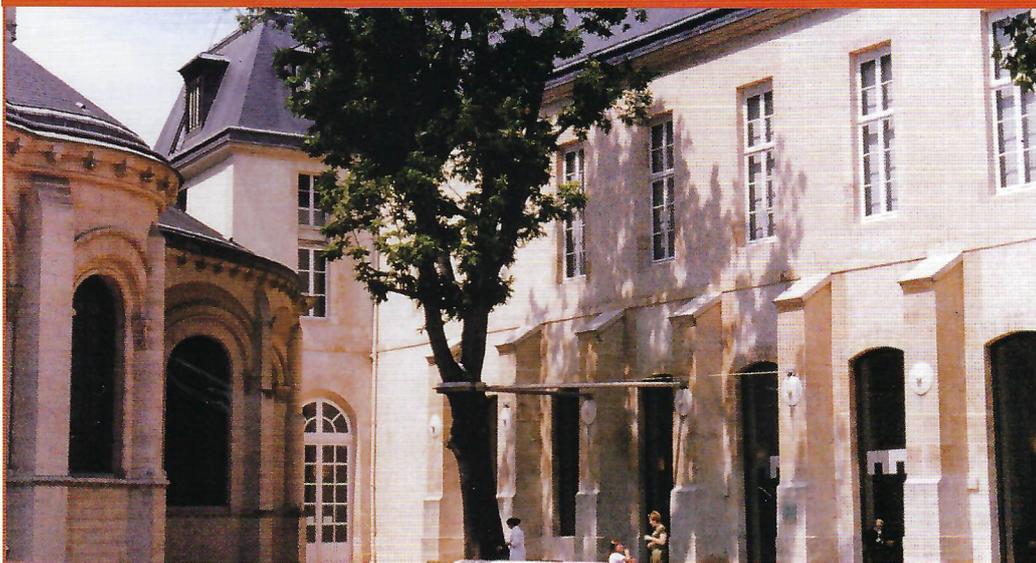
Maryse POINTUD

Dominique TURPIN

Elyane YACINE

VISITE

AU MUSÉE DES ARTS ET MÉTIERS



Entrée du Musée des Arts et Métiers

Pour vous rendre au Musée des Arts et Métiers dans le troisième arrondissement de Paris, le mieux est d'emprunter le métro et de descendre à la station Arts et Métiers, qui, toute tapissée de cuivre, rappelle les noms et dates de savants et ingénieurs célèbres, et d'ores et déjà met le visiteur dans l'ambiance. Au 292 de la rue Saint-Martin, se situent les édifices chargés d'histoire de l'ancienne abbaye Saint-Martin-des-Champs : c'est là que s'implanta le Conservatoire des Arts et Métiers fondé en 1794 par l'abbé Henri Grégoire. On accède au Musée par le square du Général Morin, rue de Réaumur. Les bâtiments, conformément au projet de l'architecte Andrea Bruno, viennent de subir une importante rénovation qui a duré une dizaine d'années, à l'issue de laquelle le Musée a rouvert ses portes en mars 2000. Afin de mieux mettre en valeur les nombreux objets et documents techniques, une partie des collections du Musée a été transférée dans des locaux modernes à Saint-Denis, où ils constituent des réserves accessibles aux chercheurs.

L'exposition permanente du Musée est une véritable mémoire de cinq siècles de Sciences et Techniques, réparties en sept domaines. La visite commence au deuxième étage, dans les anciens combles, avec un ensemble consacré aux instruments scientifiques et à l'exploration de l'infiniment petit à l'infiniment grand, de la machine à calculer inventée en 1642 par

Pascal dans le but d'aider son père, jusqu'aux appareils modernes, entre autres le cyclotron du Collège de France utilisé par Frédéric et Irène Joliot-Curie (1937), et le supercalculateur Cray 2 (1985). Nous admirons également les instruments du XVIII^e siècle : microscopes, machines pneumatiques, toute une collection d'horloges et astrolabes, le laboratoire de Lavoisier et sa balance de précision...



Microscope (1751)

Du domaine des instruments scientifiques nous passons à celui des matériaux, où sont évoquées les techniques liées aux industries du bois, du verre, de la porcelaine, des textiles, du papier, des métaux. Remarquons au passage les œuvres d'Emile Gallé qui a profondément marqué l'art de la verrerie. Et mentionnons tout spécialement le métier à tisser (1746), construit par Jacques de Vaucanson, mécanicien célèbre également pour la réalisation d'automates, et qui a donné son nom à la salle du Musée qui abrite les expositions temporaires. Première machine entièrement automatique, destinée à tisser la soie, elle ne fut en réalité jamais utilisée, en raison sans doute de son caractère trop novateur pour l'époque.

Nous descendons ensuite au premier étage pour explorer le domaine de la construction où nous attend une impressionnante collection de maquettes mettant en évidence les prouesses techniques des ingénieurs. A voir en particulier la galerie des ponts, située sur la mezzanine.



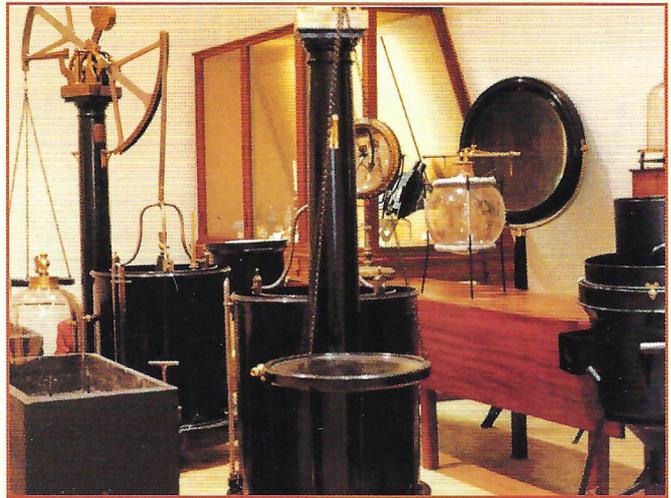
Métier à tisser de Vaucanson (1746)

Avec la communication nous pénétrons dans un domaine très large qui recouvre tout ce qui concerne l'écrit, tout ce qui a trait à la reproduction des images et des sons, tout ce qui permet la transmission de l'information. Toutes sortes de machines et d'instruments sont rassemblées : presses d'imprimerie, téléphones, télégraphes, phonographes... Et l'on peut découvrir les techniques de l'imprimerie, de la photographie, du cinéma, de la télévision, jusqu'aux télécommunications numériques actuelles.

L'histoire de l'énergie est abondamment illustrée par un ensemble de techniques et d'instruments très variés : moulins, machines à vapeur, moteurs, et machines électriques... Quant à la mécanique, domaine d'activité privilégié de l'homme, elle est aussi parfaitement

représentée par de nombreux mécanismes et machines. Avec ses tableaux animés très en vogue à la fin du XVIII^e siècle, le cabinet des automates apporte dans ce domaine une part de rêve. L'un des plus célèbres automates est la joueuse de tympanon, construite pour la reine Marie-Antoinette (1785), minutieusement restaurée, qui peut exécuter huit mélodies différentes sur son instrument à 46 cordes.

Dernière étape de la visite, nous arrivons au rez-de-chaussée dans la partie dédiée aux transports. Nous y retrouvons les divers moyens de locomotion produits par l'homme au cours des ans : bateaux, locomotives, voitures, avions. Le chœur de la chapelle du XII^e siècle accueille le pendule



Laboratoire de Lavoisier (fin XVIII^e siècle)

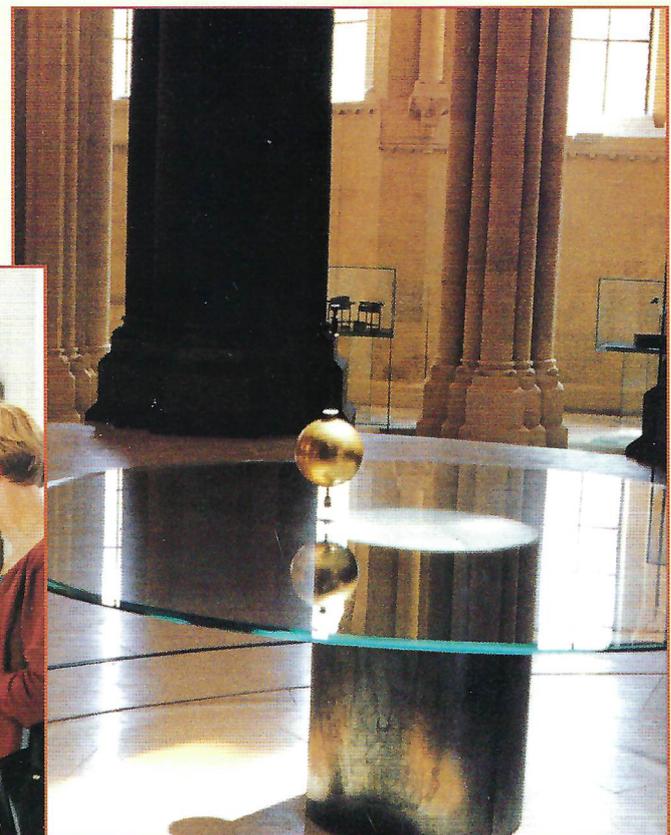
grâce auquel Léon Foucault a démontré expérimentalement la rotation de la terre (1851). Dans la nef, parcourue par une passerelle en pente qui permet l'observation sous un angle original, sont rassemblés des véhicules légendaires. Citons le fardier de Cugnot, l'Obéissante d'Amédée Bollée, les avions de Clément Ader et Louis Blériot...

Avec ses riches collections et la diversité des objets présentés, le Musée des Arts et Métiers constitue une visite particulièrement passionnante pour tous les publics curieux de l'histoire des Sciences et Techniques. Pour plus d'information on peut consulter le site du Musée (www.cnam.fr/museum/)

J. ALLEE



Projecteurs sonores (1910)



Pendule de Foucault dans le chœur de la chapelle