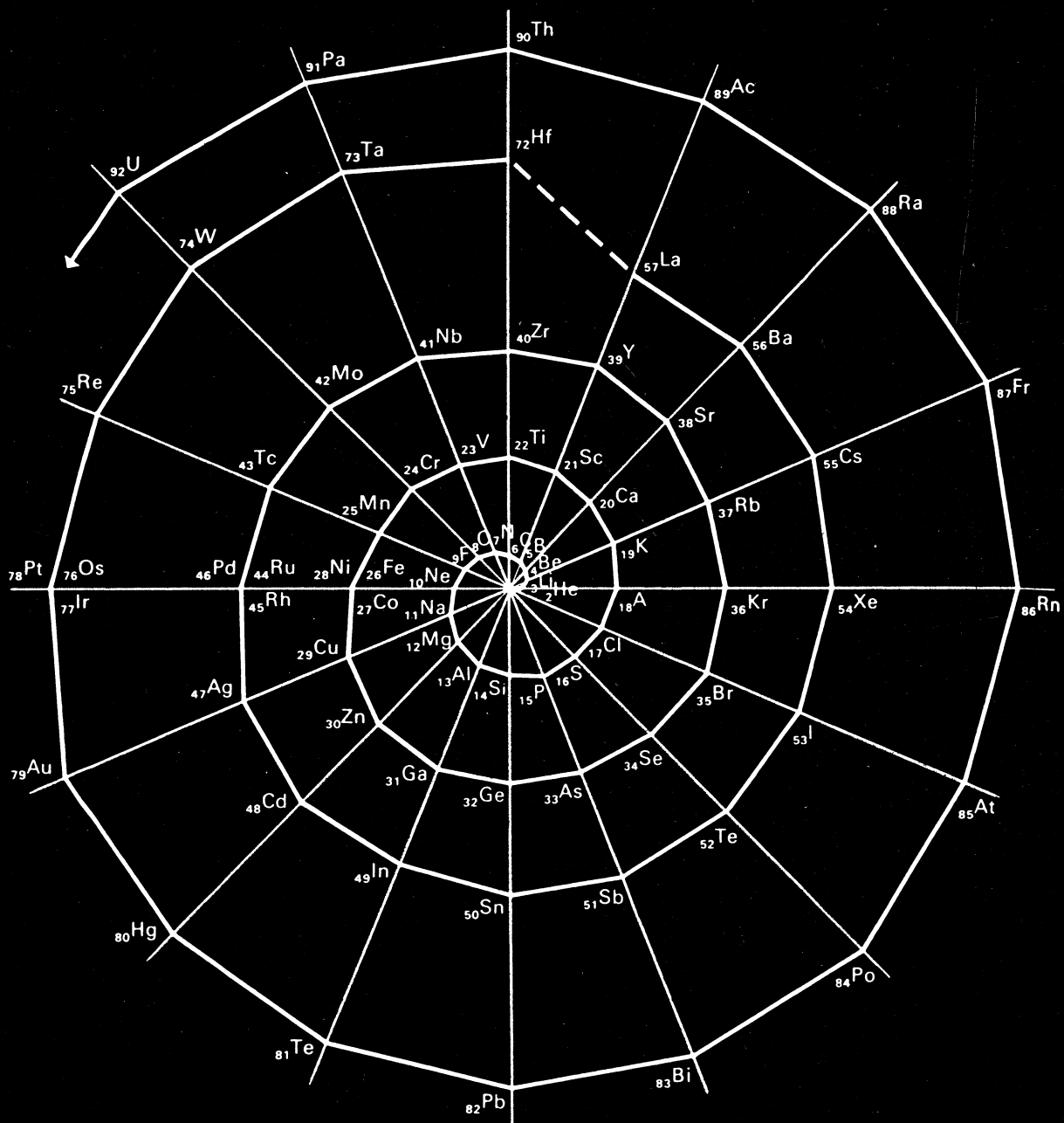


culture technique

n° 23



la chimie, ses industries et ses hommes

 <i>Espirit de Vibriol</i>	 <i>Grain</i>	 <i>Liquour de Saturne calciné</i>	 <i>Minum</i>
 <i>Estua</i>	 <i>Gros ou Dragme</i>	 <i>Lutarge</i>	 <i>Mois</i>
 <i>Farine de brique</i>	 <i>Heure</i>	 <i>Lutarge d'Argent</i>	 <i>Motte de Tanceur</i>
 <i>Ter</i>	 <i>Huile</i>	 <i>Lutarge d'Or</i>	 <i>Nitre</i>
 <i>Feu</i>	 <i>Huile de Christ</i>	 <i>Lut de Sapience</i>	 <i>Nuit</i>
 <i>Feu de Rouë</i>	 <i>Huile de Saturne</i>	 <i>Magister de Saturne</i>	 <i>Oeuf Philosophique</i>
 <i>Fien de Cheval</i>	 <i>Huile de Soufre</i>	 <i>Magnésie</i>	 <i>Or</i>
 <i>Figer</i>	 <i>Huile de Succin</i>	 <i>Manipule</i>	 <i>Or calciné</i>
 <i>Filtrer</i>	 <i>Huile de Vibriol</i>	 <i>Marcafide</i>	 <i>Or de Chimie</i>
 <i>Fixer</i>	 <i>Incorporer</i>	 <i>Meche</i>	 <i>Or de Mine</i>
 <i>Fleur d'Urain</i>	 <i>Jour</i>	 <i>Mercure</i>	 <i>Or en Feuille</i>
 <i>Fleur d'Antimoine</i>	 <i>Lact récent</i>	 <i>Mercure d'Antimoine</i>	 <i>Or Pinent</i>
 <i>Fleur de Saturne</i>	 <i>Lampe</i>	 <i>Mercure Précipié</i>	 <i>Partie avec Partie</i>
 <i>Gabmie</i>	 <i>Laiton</i>	 <i>Mercure de Saturne</i>	 <i>Perle</i>
 <i>Genievre</i>	 <i>Limaille d'Acier</i>	 <i>Mercure Sublimé</i>	 <i>Pierre Calcinée</i>
 <i>Gome</i>	 <i>Limaille de Fer</i>	 <i>Merc. de Vce</i>	 <i>Pierre Sanguine</i>

Caracteres de Chymie.

Éditorial

2 000 ans avant J. C., la Mésopotamie connaissait une certaine industrie chimique fabriquant du verre, des émaux, des teintures et même du savon ; il ne s'en suit pas que cette civilisation ait abouti à une science de la matière. Tout au contraire, on remarque que, parmi les techniques de l'Antiquité, celles qui nécessitent des transformations chimiques, et notamment par l'intermédiaire de la chaleur, se prêtent beaucoup mieux à l'interprétation magique que celles où le travail est plus directement naturel.

Dans *la Pensée sauvage*, Claude Lévi-Strauss nous fait remarquer que « *la chimie moderne ramène la variété des saveurs et du parfum à cinq éléments diversement combinés : carbone, hydrogène, oxygène, soufre et azote..... [ainsi] la cerise sauvage, la cannelle, la vanille et le vin de Xérès forment un groupe, non plus seulement sensible mais intelligible, parce qu'ils contiennent tous de l'aldéhyde, tandis que les odeurs germaniques du thé du Canada, de la lavande et de la banane s'expliquent par la présence d'esters* ».

La chimie est une des composantes fondamentales de notre culture scientifique et technique, au même titre que la mécanique et l'électronique, et il était légitime qu'elle fasse l'objet d'une livraison de notre revue.

Je tiens à exprimer ici toute ma reconnaissance à Pierre Bouy et à André Grelon qui ont accepté de prendre la responsabilité scientifique de composer un sommaire cohérent, et de choisir des auteurs avec beaucoup de discernement ; sans leur collaboration active, le Centre de recherche sur la culture technique n'aurait pu mener à bien un travail aussi délicat.

Je tiens également à remercier Rhône-Poulenc de sa contribution active et des moyens mis à notre disposition, qui ont facilité la réalisation matérielle de cet ouvrage tout en laissant une totale indépendance éditoriale à la revue.

Jocelyn de Noblet

* Caractères de Chymie », planche extraite de l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert.

SOMMAIRE DU N° 23 - JUIN 1991

ÉDITORIAL..... 3 }
Jocelyn de Noblet

INTRODUCTION..... 6
Claude Fréjacques

CHIMIE : UNE RÉFLEXION NÉCESSAIRE..... 8
Pierre Bouy et André Grelon

I - LA MONTÉE D'UNE INDUSTRIE

UNE OU DEUX CHIMIES ?
« Pur » et « appliqué » en version française..... 16
Bernadette Bensaude-Vincent

DES PRODUITS CHIMIQUES TRÈS RECHERCHÉS :
LES ACIDES GRAS POUR LA FABRICATION DES BOUGIES
La naissance de la lipochimie industrielle au cours du XIX^e siècle..... 32
Gérard Emptoz

PROFESSEURS ET MARCHANDS..... 46
Jean Jacques

L'INDUSTRIE CHIMIQUE FRANÇAISE AU TOURNANT
DE LA SECONDE INDUSTRIALISATION (1860-1939)..... 53
Jean-Pierre Daviet

II - UNE PRÉSENCE DISCRÈTE DANS LA VIE DE TOUS LES JOURS

LA CHIMIE ET LA SANTÉ HUMAINE..... 70
Lucien Penasse

LES ARÔMES
Produits chimiques ou naturels ?..... 84
Patrick Etievant

CHIMIE ET AGRICULTURE
L'exemple du vignoble français..... 91
Jean Grelon

LES MATÉRIAUX
Une histoire vieille comme celle de l'homme..... 102
Jacques Hui

LA CIVILISATION DES PLASTIQUES..... 121
Daniel Hatat

LA CHIMIE DANS L'ÉLECTRONIQUE..... 131 }
Jean-Claude Dubois

Culture technique

Publication éditée

par le C.R.C.T.

Revue semestrielle

69, bis rue Charles Laffitte

92200 Neuilly-sur-Seine

Tél. 47 47 95 27

Télécopie : 47 47 73 99

Il a été tiré de cet ouvrage :
2 000 exemplaires.

Directeur de la publication :
Maurice Magnien.

Directeur de la rédaction :
Jocelyn de Noblet.

Secrétaire scientifique :
Françoise Icikovics.

Conception graphique
et mise en page :

Jocelyn de Noblet.

Photocomposition :
Isabelle Garrone.

ISSN : 0223-4386

© C.R.C.T. 1991

Dépôt légal : 2^{ème} trimestre 1991

Tous droits de traduction, de reproduction et
d'adaptation réservés pour tous pays, y compris
l'U.R.S.S.

La revue du C.R.C.T. n'est pas solidaire des opinions
émises sous la signature des auteurs.

Flashage Studio 44 - Paris 75017

Imprimé par S.O.H.V. - Annonay (Ardèche)

III - CHIMIE ET ENVIRONNEMENT

ORDRE OU DÉSORDRE ?

Les métabolites secondaires : questions, réponses et énigmes..... 140

Guy Ourisson

INDUSTRIES CHIMIQUES ET ENVIRONNEMENT..... 150

Jacques Salamitou

IV - L'AVENIR DES INDUSTRIES CHIMIQUES, L'ENSEIGNEMENT ET LA RECHERCHE

QU'Y A-T-IL DE COMMUN ENTRE LE PÉTROLE, LE ROI NABUCHODONOSOR ET L'ORIGINE DE LA VIE ?

Vingt-cinq siècles de géochimie organique..... 158

Guy Ourisson

PLAIDOYER POUR L'ENSEIGNEMENT DE LA CHIMIE..... 165

François Mathey

ÉVOLUTION DE LA FORMATION DES INGÉNIEURS

CHIMISTES ET RÔLE DE LA RECHERCHE..... 172

Claude Quivoron

L'ENSEIGNEMENT DANS UNE ÉCOLE D'INGÉNIEURS CHIMISTES EN FRANCE

Le cas de l'École nationale supérieure de chimie de Lille..... 180

Alain Lablache-Combier

LA FORMATION EN CHIMIE

Le point de vue de l'employeur..... 192

Maurice Jaymond

PROMOTION DE L'IMAGE DE LA CHIMIE

Quelques actions collectives réussies..... 198

Paul Cadiot

LA RECHERCHE EN CHIMIE :

ÉVOLUTION ET PERSPECTIVES..... 209

Paul Caro

LA CHIMIE, SCIENCE DU MIXTE..... 218

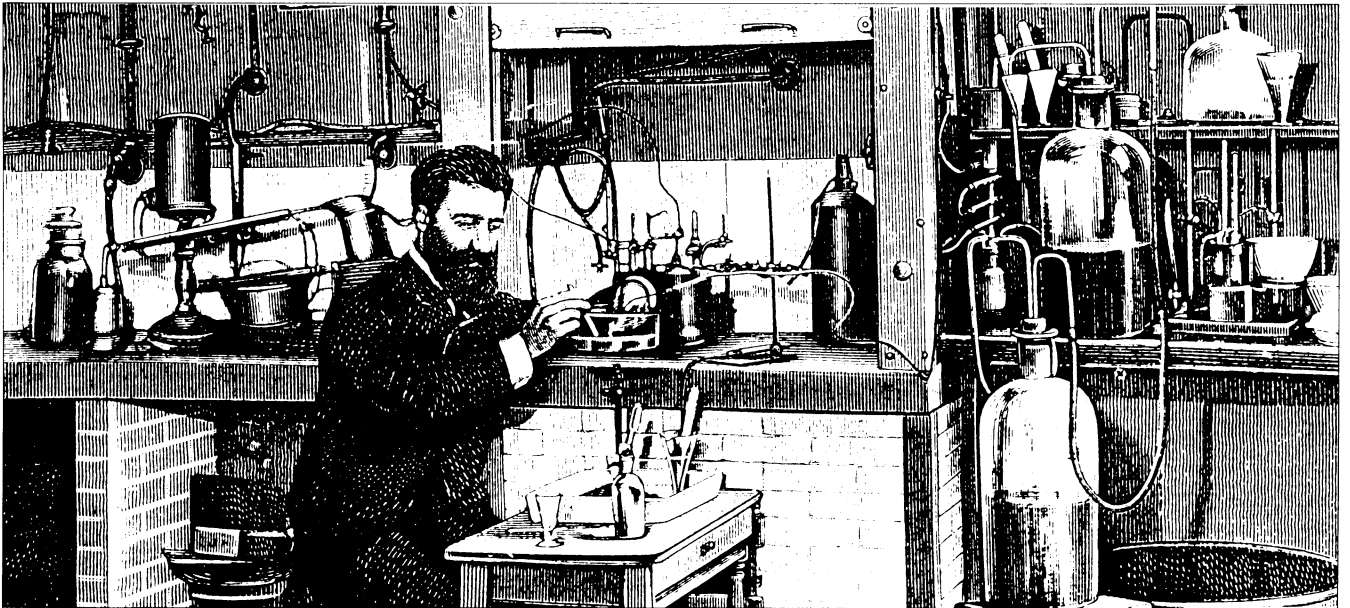
Isabelle Stengers

CHRONOLOGIE POUR LES MÉTIERS

ET LES INDUSTRIES CHIMIQUES..... 225

Roger Christophe

NOTES SUR LES AUTEURS..... 238



Introduction

Claude Fréjacques

La chimie, de par sa puissance d'intervention dans les industries du vivant et dans notre environnement, n'échappe pas aux soupçons et aux craintes, souvent irrationnelles, que font naître dans nos sociétés les progrès rapides des sciences et des techniques.

Et pourtant, la chimie moléculaire, science des assemblages d'atomes, de leurs structures, de leurs propriétés, de leurs transformations et de leurs interactions, permet, aujourd'hui même, plus que toute autre science, de comprendre le monde qui nous entoure, et contribue de manière déterminante à fournir à l'homme le moyen de répondre aux désirs et aux transformations dont il se veut l'auteur et reste le sujet.

Aux découvertes de la chimie du solide est dû le développement, non seulement des composants électroniques, et par là de l'informatique, mais aussi des matériaux nouveaux qui transforment sous nos yeux automobile et habillement, raquettes de tennis et fusées spatiales..., qui facilitent notre vie et souvent émerveillent.

La chimie organique compte à son actif les nouveaux médicaments et mille produits récents aussitôt entrés dans nos habitudes.

La chimie biologique moléculaire et supramoléculaire permet d'analyser et de comprendre les mécanismes du vivant pour agir sur eux, si bien que chimie et biologie, a-t-on dit, paraissent liées comme le solfège et la musique.

Enfin, phénomène nouveau dans notre histoire et sans doute menace la plus grave qui pèse sur notre planète, la « saturation démographique » soulève des problèmes qu'on ne peut négliger. Il est clair que la chimie, et sa fille naturelle la chimie biologique, pourraient contribuer de façon déterminante à leur solution en permettant d'une part la régulation des naissances et de l'autre l'accroissement de la production agricole, peut-être même par la synthèse de produits nutritifs.

Merci à *Culture technique* de faire mieux connaître les industries chimiques, leur rôle et leur évolution, et d'avoir élaboré ce numéro auquel je souhaite le plein succès.

1. *L'alchimiste, d'après une gravure sur bois du XV^e siècle.*

2. *M. Moissan préparant du fluor dans son laboratoire de l'École de pharmacie, à Paris. Extrait de la Nature, 22 février 1890.*

3. *La salle de chimie du laboratoire de l'Établissement Le Bourget, le 7 avril 1954. Doc. CEM.*



Chimie : une réflexion nécessaire

Pierre Bouy et André Grelon

LE MALAISE DES CHIMISTES

La chimie, plus que toute autre science, ne bénéficie pas, dans l'esprit de l'homme moderne, même cultivé, d'une image parfaitement claire et univoque. Nombreux sont ceux qui se retranchent derrière les difficultés de sa symbolique, les « formules », pour excuser leur ignorance, et pourtant quelle est la science qui n'a pas aujourd'hui son langage et sa symbolique ?

On fait aussi souvent remonter à Auguste Comte les difficultés que rencontre la chimie pour s'affirmer comme science et par là entrer dans la culture. Il est vrai que dans la classification des sciences qu'a donnée ce philosophe, au siècle dernier, la chimie n'a sans doute pas eu la place qu'elle méritait, tout spécialement dans un pays qui avait tant œuvré pour lui donner un statut de science à part entière. De là viendrait sa subordination à la physique que l'on constate dans notre enseignement et sa position de « nain culturel » dans l'esprit de gens par ailleurs très cultivés, pour reprendre l'expression du professeur Mathey.

Mais l'héritage n'est-il pas plus ancien ? Déjà, en 1751, Venel, le rédacteur de l'article « Chymie » de l'*Encyclopédie* de Diderot et d'Alembert commençait ses propos par ces mots :

« *La Chimie est peu cultivée parmi nous ; cette science n'est que trop médiocrement répandue même parmi les savans, malgré la prétention à l'universalité de connoissances qui fait aujourd'hui le goût dominant. Les Chimistes forment encore un peuple distinct, très-peu nombreux, ayant sa langue, ses lois, ses mystères, et vivant presque isolé au milieu d'un grand peuple peu curieux de son commerce, n'attendant presque rien de son industrie.* »

La « *chymie* » n'était d'ailleurs dans cette *Encyclopédie* qu'une sous-classe de la physique qui n'apparaissait dans l'ordre encyclopédique que comme « *physique des petits corps ou chimie* ». Deux siècles et demi plus tard, le propos de Venel n'est plus actuel en ce qui concerne l'impact de l'industrie chimique dont on verra qu'elle est devenue un segment majeur de l'activité industrielle du monde moderne. Mais qu'en est-il de la science qui soutient cette industrie ? Cette science reste-t-elle encore « *très peu cultivée parmi nous* », pour reprendre les termes mêmes de l'encyclopédiste ?

On note bien souvent chez les chimistes une certaine amertume envers le sort qui serait fait à la chimie : ni considération scientifique, ni reconnaissance industrielle, tel serait le triste lot de cette discipline. Qui plus est, on semble y voir une sorte de « mal français » auquel on opposerait volontiers la bonne santé morale de la chimie allemande. Ce mal serait dû à un travers fondamental de l'esprit (ou de l'enseignement, la chose n'est pas toujours claire) hexagonal, marqué par un mépris pour l'expérimental, le concret, le pratique, au profit de l'abstrait, de l'idéal, du théorique. Cette analyse se fonde sur plusieurs observations qui portent en particulier sur les choix des taupins en matière d'orientation disciplinaire, sur la part minimale des sciences expérimentales dans le secondaire, sur la méfiance du grand public envers tout ce qui est « chimique », sur la méconnaissance de l'importance économique et proprement industrielle des industries chimiques.

UN RÔLE ÉMINENT AU XIX^e SIÈCLE

Il serait absurde de nier la réalité de ce malaise, en tout cas tel qu'il est exprimé aujourd'hui par des acteurs importants du monde de la chimie. Pour autant, ce phénomène n'a rien de permanent. Dans l'histoire de la chimie en France, il n'en a pas toujours été ainsi. Au siècle dernier, les chimistes ont joué un rôle considérable non seulement dans le développement de leur science, mais encore dans l'organisation scientifique du pays : rappelons simplement le poids d'un Jean-Baptiste Dumas, l'un des fondateurs de l'École centrale, qui devient professeur à la Sorbonne, influence largement l'orientation scientifique de l'enseignement secondaire et supérieur sous le Second Empire après avoir été un temps ministre. Peut-on négliger le véritable empire qu'a exercé un Marcelin Berthelot à la fin du siècle ? Enfin, comment ne pas évoquer la haute stature d'Henry Le Chatelier, qui fondera un enseignement moderne de chimie industrielle à l'École des mines, organisera en permanence la liaison entre la science académique et les milieux industriels, se fera le

promoteur de l'Organisation scientifique du travail et lancera dès le début du XX^e siècle le débat sur l'organisation d'un corps spécifique de recherche en France – ce qui aboutira, après une histoire longue et compliquée, à la création du CNRS.

Par ailleurs, l'enseignement de la chimie a été très important au XIX^e siècle : on oublie souvent qu'avec la mécanique elle a été l'une des deux disciplines scientifiques les plus professées à travers tout le pays. La chimie est l'une des sciences constituant le programme originel de l'École polytechnique de 1794-1795. Elle est l'une des quatre spécialités offertes dès sa fondation en 1829 par l'École centrale des arts et manufactures. Elle constitue l'un des axes les plus féconds du haut enseignement ouvert au Conservatoire des arts et métiers en 1819 : des trois chaires fondatrices, l'une est consacrée à la chimie industrielle et attribuée à Nicolas Clément-Desormes. Mais très rapidement, d'autres chaires de chimie sont ouvertes dans cette institution vouée à la diffusion des sciences les plus élevées dans les milieux industriels. Ces nouveaux enseignements sont plus spécialisés : il s'agit de chimie des matériaux, de chimie agricole, etc. A la fin du siècle, il y a au Conservatoire national des arts et métiers quatre chaires officielles de chimie (sans compter celles qui abordent ces questions dans une part importante des cours). En revanche, il n'existe officiellement qu'une seule chaire de physique – dont le programme est si imposant que son titulaire, Edmond Becquerel, doit inscrire son enseignement sur deux ans. La place de la chimie est donc loin d'être minorée.

On retrouve cet intérêt pour la chimie dans les cours des associations philotechniques provinciales ou dans les enseignements proposés par les municipalités des capitales régionales, tout au long du XIX^e siècle. A Lille, ce cours de chimie industrielle est ouvert dès 1819 par un jeune chimiste alsacien, Frédéric Kuhlmann qui, on le sait, connaîtra un brillant avenir industriel. Quand les facultés des sciences ouvriront des cours de sciences appliquées à partir de 1854, l'enseignement initial dispensé dans la nouvelle faculté lilloise par son premier doyen, Louis Pasteur, portera sur des problèmes de chimie industrielle.

La création des universités régionales sous la troisième République sera à l'origine d'un nouvel élan pour l'enseignement supérieur de la chimie. En fait, le coup d'envoi avait été donné par la création, au début des années 1880, de la première de cette nouvelle génération d'écoles d'ingénieurs : l'École de physique et de chimie industrielle de Paris. On sait que l'idée en avait été lancée à la suite de l'Exposition universelle de Paris de 1878 qui avait fait prendre conscience du retard progressif de la chimie française par rapport à ses concurrentes européennes (et encore l'Allemagne n'était-elle pas représentée à l'Exposition). La formation de cohortes de chimistes industriels devenait indispensable. Si le ministère du Commerce qui avait été sollicité n'avait répondu que par un pesant silence, le projet avait été repris et réexaminé par une commission nommée à l'initiative du conseil municipal de Paris et comprenant les savants les plus éminents et les industriels les plus en pointe : il s'agissait de faire une école d'ingénieurs chimistes. Ce n'est qu'après l'Exposition in-

ternationale de l'électricité (1881) que le projet fut amendé et qu'on y adjoignit la physique. Mais, pour la première fois en France, il s'agissait de former dès l'origine des ingénieurs spécialisés.

C'est donc ce modèle qui est repris par les instituts annexes des facultés des sciences dont l'efflorescence est tout à fait remarquable à la fin du siècle dernier et au début de celui-ci. A Lille, Toulouse, Rennes, Bordeaux, Clermont-Ferrand, etc., des formations spécialisées d'ingénieurs et, en particulier, des instituts de chimie naissent au sein des universités, avec l'appui des pouvoirs politiques locaux et régionaux et l'aide, souvent très importante, des chefs d'entreprise des zones industrielles régionales. Loin d'être une discipline de second ordre, la chimie apparaît au contraire comme une pièce maîtresse pour l'essor des universités des provinces et pour le développement des économies régionales. Sur le plan scientifique, elle donnera en outre à la France d'avant-guerre deux prix Nobel.

LES PROBLÈMES RÉCENTS

Rappeler ces quelques éléments historiques ne veut pas dire qu'il faille nier les difficultés qui ont assailli la chimie et son enseignement à divers moments. Il importe simplement de signaler qu'il n'existe pas de fatalité historique à une mauvaise représentation de la chimie ou à une minoration de la discipline. Il est bien possible, au reste, que la chimie française ait contribué elle-même à ses propres difficultés. Dans un ouvrage récent, Jean Jacques a montré comment un Marcelin Berthelot avait pu bloquer les avancées de la chimie française sur un plan théorique au tournant du siècle (*Marcelin Berthelot*, Belin, Paris, 1990). Que l'on pense aussi aux freins mis par Henri Le Chatelier aux nouvelles hypothèses chimiques. Peut-on faire l'hypothèse qu'il y aurait un « péché originel » de la chimie au XX^e siècle ? Il y a en tout cas matière à réflexion pour les historiens de la chimie en France.

Il existe certes aujourd'hui un problème objectif d'enseignement de la chimie dans le secondaire qui n'a rien à voir avec un quelconque refus ou dégoût des élèves devant cette matière, mais qui tient plus à l'organisation des programmes et à la formation des professeurs. Mais on notera tout aussi bien la mauvaise place des sciences de la nature (la géologie par exemple), ou le rôle « secondaire » de la géographie par rapport à l'histoire : la chimie n'est donc pas la seule discipline à s'estimer lésée dans le découpage des programmes.

Les professeurs des écoles supérieures de chimie se plaignent de la qualité du recrutement. L'analyse a montré le rapport avec la question de l'enseignement dans le secondaire. Il ne faut pas oublier non plus les problèmes qu'ont connus les écoles de chimie au milieu des années 1970, en pleine crise pétrolière, lorsque les entreprises du secteur se débattaient dans les pires difficultés : les jeunes diplômés ne trouvaient plus d'emplois dans leur spécialité, et l'on s'avisa alors dans les hautes sphères ministérielles et industrielles qu'il existait sans doute trop d'établissements de formation et qu'il conviendrait d'en faire disparaître un certain nombre – politique qui commença d'être

appliquée, non sans une certaine confusion et non sans engendrer une vive inquiétude dans les milieux enseignants et étudiants de l'époque. Quinze ans après, nous n'en sommes plus là, les entreprises veulent recruter toujours plus d'ingénieurs chimistes, les écoles de chimie augmentent régulièrement les effectifs des promotions. Mais il ne faudrait pas croire pour autant que des périodes aussi difficiles ne laissent aucune trace dans les esprits. Des phénomènes sociaux de cet ordre se gravent dans la mémoire collective, dictant des comportements aux individus sans que ceux-ci en aient toujours une conscience nette, et leurs souvenirs ne s'estompent que peu à peu.

LA SCIENCE DE LA MATIÈRE ET DE SES TRANSFORMATIONS

Mais avant d'ouvrir ce numéro de *Culture Technique* consacré à la chimie, à ses industries et aux hommes qui la font, il n'est sans doute pas inutile de préciser l'étendue de notre propos et le cadre de notre réflexion.

A la rubrique « Chimie » que disent les dictionnaires ?

« CHIMIE ou CHYMIE, s.f. Science dans laquelle on étudie les lois de la composition des corps cristallisables ou volatils, naturels ou artificiels, et les lois des phénomènes de combinaison ou de décomposition résultant de leur action moléculaire les uns sur les autres », écrivait Littré qui enchaînait sur une citation très édifiante de Fontenelle : « Il n'y a pas encore longtemps que tous les raisonnements de la chimie n'étaient que des espèces de fictions poétiques, vives, animées, agréables à l'imagination, inintelligibles et insupportables à la raison. »

« CHIMIE. n.f. (1554 ; du lat. médiév. *chimia* et *alchimia*. V. *Alchimie*). Science qui a pour objet l'étude de la constitution intime des divers corps, de leurs transformations et de leurs propriétés », précise le Robert, dictionnaire alphabétique et analogique de la langue française, reprenant assez fidèlement la définition qu'en donnait en 1888 le Dictionnaire général de la langue française de Hatzfeld et Darmesteter.

« CHIMIE n.f. (gr *chēmeia*). Science qui étudie la nature et les propriétés des corps simples, l'action moléculaire de ces corps les uns sur les autres, et les combinaisons dues à cette action », préférerait le Larousse universel en 2 volumes de 1922, mettant déjà un peu l'accent sur le côté artificiel qu'ont pour beaucoup les produits de la chimie ; et en 1989 le petit Larousse illustré rajournait la formule en « Science qui étudie la constitution atomique et moléculaire des corps ainsi que leurs interactions. »

On s'accorde généralement aujourd'hui pour préférer la définition plus sobre de « science de la matière et de ses transformations », renonçant à la référence à la constitution intime de la matière qui pouvait sans doute s'admettre avant que la physique nucléaire ne fasse reculer les limites de cette intimité.

Cette définition a l'avantage de rattacher fortement la chimie à la matière sous toutes ses formes, telle que la nature nous la présente, et de rappeler que le chimiste ne fait que dégager des propriétés nouvelles en modifiant les assemblages des éléments.

Elle met aussi en valeur l'omniprésence et l'universalité de la chimie dans la vie de l'homme. Il suffit de rappeler que l'air que nous respirons n'est somme toute que de l'oxygène dilué dans de l'azote, et que la combustion qui nous nourrit, nous réchauffe et nous a si longtemps éclairés n'est autre que la réaction chimique d'oxydation de composés carbonés par ce même oxygène de l'air. Bien plus, et sans être réductionniste, on peut dire que les dernières décennies ont conforté la place de la chimie dans le vivant aussi bien que dans l'inanimé. Il serait peut-être puéril de dire que la chimie explique entièrement la vie, mais il n'est certainement pas exagéré de dire que la chimie est l'écriture sous-jacente à tout ce qui nous entoure. Cette présence universelle de la chimie dans nous-mêmes et notre environnement permet de mieux comprendre que la chimie puisse être la meilleure et la pire des choses. C'est parce que nous sommes écrits « en chimie » que le médicament de synthèse peut agir sur notre organisme et rétablir notre santé. Mais c'est aussi pour la même raison que les armes chimiques sont aussi redoutables. Et c'est encore pour cela que la chimie suscite tant d'espoir pour la solution des problèmes qui se posent à l'humanité.

Les industries chimiques constituent le prolongement naturel de la chimie, son bras séculier. Comme nombre d'industries dans leurs rapports avec les sciences, elles peuvent même se targuer d'une ancienneté plus grande que celle de la chimie pure, dans la mesure où l'industrie a pris la relève d'un art très ancien attesté depuis des millénaires, tant en Chine que dans les pays méditerranéens du Moyen-Orient. Elles mettent aujourd'hui en œuvre les résultats des chimistes en fabriquant des produits pour des utilisateurs qui n'appartiennent généralement pas à l'industrie chimique. Car c'est une caractéristique assez générale que le produit de la chimie n'apparaît pas tel quel chez l'utilisateur. Ce produit n'est souvent qu'un intermédiaire indispensable mais extrêmement discret. Cette confidentialité des produits de la chimie n'en facilite pas la perception par l'homme, même cultivé. Et cependant la chimie a envahi l'activité humaine, de façon consciente ou non, et l'humanité ne saurait s'en passer sans disparaître. Bien plus, la chimie s'est infiltrée dans l'ensemble des technologies au point d'y atteindre une certaine universalité que Jean C. Baudet rappelait en ces mots dans le numéro de mars 1991 de la revue belge *Ingénieur et Industrie* : « *La chimie est vraiment la science de base de toute technologie. On a cru longtemps que c'était la mathématique. Des programmes d'écoles d'ingénieurs ont même été entièrement basés sur cette idée du primat de la mathématique. Et certes, il faut une sérieuse formation mathématicienne pour faire un ingénieur digne de ce nom. Mais la chimie, science de la matière, est plus essentielle encore que la mathématique, qui n'est après tout que la science de la forme. Toute la science des matériaux n'est qu'une chimie appliquée, et que seraient l'informatique et l'électronique sans la connaissance des propriétés physico-chimiques du silicium et de GaAs ? Pas d'industrie sans connaissance des matériaux. Et donc, pas d'industrie sans chimie.* »

Mais, pourtant, quelle image cette industrie a-t-elle dans la culture de l'homme moderne ? Une représentation

souvent imprécise, floue, parfois négative. Il faut dire, toutefois, qu'il existe en cette fin de siècle un phénomène collectif d'examen des forces et faiblesses de notre civilisation industrielle. Cet examen prend des formes plus ou moins vives : entre autres questions, il tourne autour des problèmes de qualité de vie, qu'il s'agisse de nourriture, de l'air qu'on respire, du *stress* au travail, etc. On peut noter que si l'industrie chimique est interpellée à ce titre, elle n'est pas la seule industrie à être questionnée : on met aussi en cause la « civilisation de la bagnole » (industrie automobile), la qualité des logements (BTP), la destruction des sites par les lignes haute tension et les barrages (énergie), les risques causés par les centrales nucléaires (énergie). Il est néanmoins certain que la chimie, parce qu'elle se trouve au cœur de toutes les activités humaines, parce qu'elle sert d'industrie « mère » à toutes les autres industries, comme le montre abondamment ce numéro, se trouve toujours, à un moment ou à un autre, apostrophée et sommée de donner des réponses, sinon des solutions immédiates aux problèmes posés.

Cependant, cette image de marque ambiguë sinon mauvaise de l'industrie chimique est assez sectorisée. Toute une série de branches qui sont de son domaine ne soulèvent pas l'ombre d'une critique : il en est ainsi des produits pharmaceutiques (les pharmaciens sont des chimistes qui appliquent leur art au soin des êtres vivants – pharmacie humaine et vétérinaire – ils ne sont contestés ni dans leur savoir, ni dans leur position sociale ; ils disposent même souvent d'un monopole étonnant dans la direction des laboratoires de production pharmaceutique); des cosmétiques (L'Oréal, premier producteur mondial de produits cosmétiques, est une « fierté » nationale); du caoutchouc (la réputation d'un Michelin quant à la qualité de ses pneus est internationale, même s'il a du mal à digérer ses dernières acquisitions américaines); des peintures, vernis, encres et adhésifs divers. Les associations de consommateurs ont certes traqué le « chimique » dans l'alimentaire, avec un certain succès. Mais il est pour le moins piquant de voir le retour du « chimique » à l'état pur lorsque, pris de frénésie contre le contenu énergétique des sucres utilisés dans l'alimentation, les consommateurs exaltent l'usage de l'aspartame ! Cette situation pourrait d'ailleurs bien s'étendre un jour prochain aux graisses.

Enfin on ne peut passer sous silence que des événements accidentels ont eu lieu, qui se sont inscrits dans la mémoire collective. Ce sont ces « risques technologiques » majeurs auxquels nos contemporains sont beaucoup plus sensibles précisément parce que nous vivons désormais dans un monde totalement industriel et à cause de cette réflexion diffuse sur la nature de notre civilisation. Des catastrophes se sont produites, en taille et en nombre suffisamment importants pour qu'elles frappent les esprits, et en étant perçues comme des phénomènes cumulatifs : que l'on se souvienne du lancinant problème de la pollution au mercure de la baie de Minamata au Japon, de Seveso en Italie (où cependant on n'a pas eu à déplorer un seul décès, même si les scientifiques s'interrogent sur les effets à long terme), de Bhopal en Inde, ou de la plus récente pollution du Rhin. Il est normal que les citoyens du monde demandent alors des comptes aux responsables

industriels. On ne peut évidemment exclure que de nouveaux incidents graves surviennent en chimie comme dans n'importe quelle autre activité humaine. Mais dans les dix dernières années, la perception de ces problèmes par les industriels et les ingénieurs et la façon de les traiter ont considérablement évolué. Dans son dernier ouvrage (*Les Industriels et les risques pour l'environnement*, L'Harmattan, 1991), Denis Duclos montre ainsi la prise de conscience des dirigeants d'entreprise français sur les problèmes d'environnement : nous sommes dans une période de « saut symbolique » dû aussi bien à la pression de l'opinion publique, à des effets de concurrence internationale (on est aussi vertueux que les autres) qu'à des prises de position personnelles (tout dirigeant est en même temps un citoyen et un consommateur). En ce sens, par exemple, il est intéressant de noter la rapidité de réaction des entreprises à la question des CFC mis en cause (sans preuve absolue) dans l'élargissement du fameux trou d'ozone. Par ailleurs, face aux problèmes de pollution, de traitement des déchets, c'est précisément très largement aux industries chimiques que les solutions sont demandées pour que nous disposions de plus de bien-être et de sécurité.

UNE ORIENTATION POUR CE VOLUME

Il est difficile de donner la liste précise des champs couverts par l'industrie chimique. Les classifications usuelles en cours dans la profession¹ les limitent à trois secteurs :

- la chimie de base : substances de base, intermédiaires, solvants, monomères, colorants, pigments, molécules de base de la parachimie et de la pharmacie, engrais, matières plastiques, etc ;

- la parachimie : savons et détergents ; parfums et produits de beauté ; peintures, vernis, laques, encres d'imprimerie ; produits d'entretien et produits ménagers ; liants, colles et adhésifs ; produits phytosanitaires ; surfaces sensibles pour le cinéma, la photo, la reprographie ; céramiques ; abrasifs ; charbons actifs ; explosifs ;

- la pharmacie : préparation de médicaments pour l'homme et les animaux ;

Mais l'emprise de la chimie est sans aucun doute beaucoup plus vaste, et on ne peut ignorer son rôle dans des branches d'industrie comme le secteur de l'énergie, celui du verre et de l'emballage, la métallurgie, l'industrie textile, l'électronique, etc.

En élaborant ce numéro, il n'était pas question pour nous de chercher à suivre un ordre encyclopédique ni de vouloir prétendre couvrir l'ensemble des secteurs concernés par la chimie. Nous avons plutôt voulu proposer une série de réflexions à l'attention des lecteurs, en suivant trois pistes. Dans une première partie, les travaux présentés indiquent que dans l'histoire de la chimie depuis la révolution industrielle, l'industrie, l'enseignement et la recherche ont été intimement mêlés, même si l'historiographie ne l'a pas toujours montré : la chimie « pure » n'est jamais éloignée de la chimie « appliquée ».

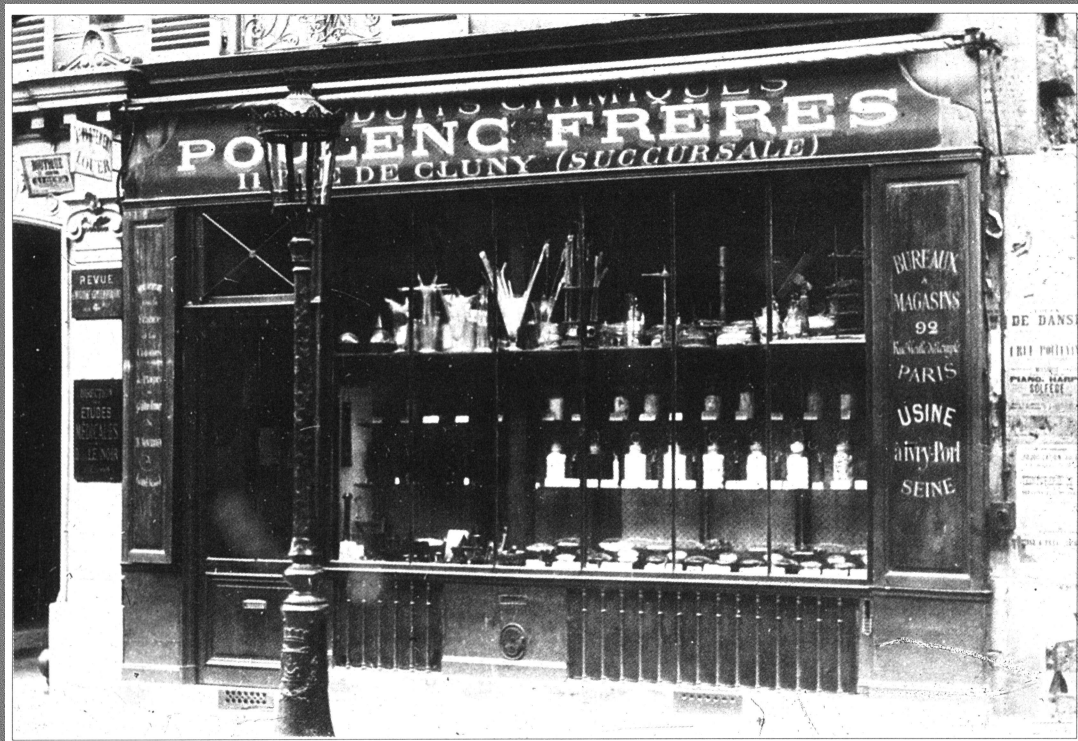
Un second volet veut illustrer deux des traits de la chimie d'aujourd'hui par une série d'exemples pris dans différents secteurs : tout d'abord son caractère quasi permanent dans les activités manufacturières et son extension dans les domaines plus divers des activités économiques, en même temps que sa présence se fait le plus souvent discrète ; ensuite, la question de ses rapports avec l'environnement qui est naturellement un sujet essentiel. Mais ce dernier problème à lui seul justifierait un développement important. Nous l'avons volontairement limité (un numéro de *Culture technique* est précisément prévu sur ce thème), en évitant que l'analyse de la chimie soit réduite à la seule problématique de l'environnement.

Il nous a paru important, en nous tournant vers l'avenir de la chimie et de ses industries, de mettre l'accent sur les questions d'enseignement et de formation par la recherche, problèmes essentiels à traiter et à résoudre si l'on veut que la chimie de demain soit encore plus performante et que son utilisation soit, plus encore qu'aujourd'hui, au service des hommes.

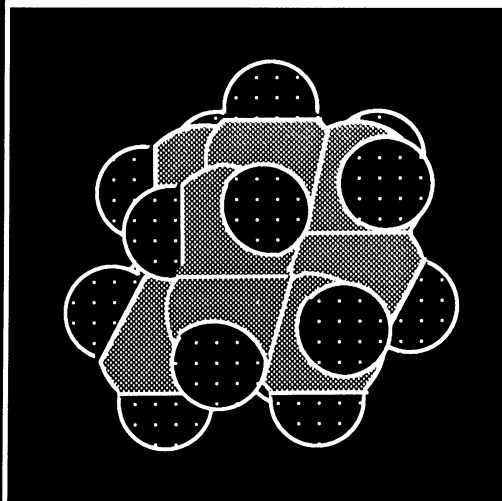
Enfin, il vaut d'être signalé que ce numéro rassemble des articles écrits par des acteurs industriels, des enseignants, des chercheurs en chimie et des historiens des sciences qui, apportant des éclairages différents, collaborent à la construction d'une approche pluridisciplinaire indispensable pour cet objet complexe qu'est la chimie, et ainsi contribuent à l'élaboration de cette culture scientifique et technique vivante indispensable à la compréhension de nos sociétés du tout proche XXI^e siècle.

Note

1. « Industries chimiques, richesse et progrès de la France », numéro spécial de *Molécule*, nov. 1986.

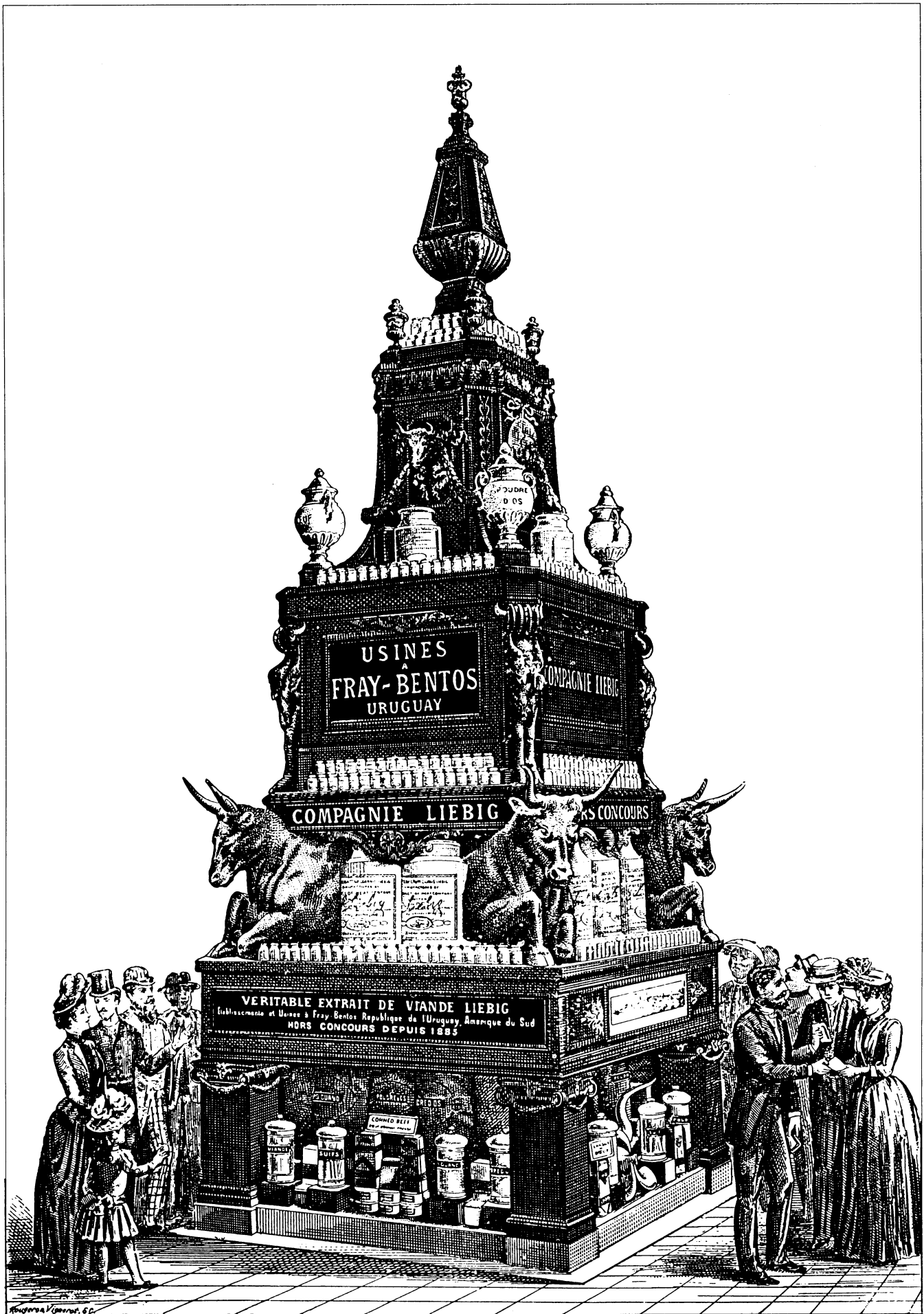


I^{re} PARTIE



LA MONTÉE D'UNE INDUSTRIE

*Magasin de vente des Éts Poulenc Frères, société anonyme constituée en 1900.
Molécule d'adamantane réalisée sur ordinateur grâce au logiciel MOLDRAW créé par J.-M. Cense.*



Une ou deux chimies ?

« *Pur* » et « *appliqué* » en version française

Bernadette Bensaude-Vincent

A nos yeux, la distinction entre « pur » et « appliqué » est une évidence : d'un côté, une recherche à finalité cognitive ; de l'autre, une exploitation des connaissances acquises dans un but utilitaire. Pourtant, il n'est pas évident que savoir et technique soient deux aspects d'une même discipline. L'affirmation d'une identité commune entre la science et les arts chimiques est une idée relativement récente et durement conquise. En effet, dans la littérature chimique du début du XVIII^e siècle dominent deux couples de notions – théorie et pratique ; science et art –, qui seront évincés au milieu du XIX^e siècle par les expressions de chimies « pure » et « appliquée ». Or ce glissement sémantique présente une particularité : les catégories qui organisent la chimie au XVIII^e siècle sont philosophiques, l'une issue de la philosophie grecque, l'autre de la scolastique. Au contraire, les concepts de pur et d'appliqué ne semblent pas empruntés à une philosophie et ne sont même pas, semble-t-il, intégrés aux discours philosophiques contemporains.

Un bref rappel des catégories philosophiques voisines, en vigueur à la fin du XVIII^e siècle et au début du XIX^e éclaire le problème. Chez Kant, le « pur » s'oppose à l'« empirique » et non à l'« appliqué ». C'est justement parce que la chimie n'est pas « pure » que Kant lui refuse le titre de science en 1786, dans

Exposition de la Compagnie Liebig au pavillon de l'Uruguay, pays où sont installées les principales usines de la Compagnie, créée en 1865 avec la coopération du baron Justus von Liebig (1803-1873). Extrait de l'Exposition universelle de 1889 d'E. Monod, Paris, 1890.

la préface des *Premiers Principes métaphysiques de la Science de la Nature*¹. En 1797, Kant semble revenu sur ce jugement puisqu'il déclare qu'il n'« y a qu'une seule chimie, celle de Lavoisier », ce qui revient à la traiter comme une science rationnelle reposant sur des principes. Plus loin, Kant avoue qu'en chimie comme en physique, des principes dérivés de l'expérience peuvent être admis comme universels, bien qu'ils ne présentent pas le même caractère de nécessité que des principes *a priori*². Ces deux allusions suggèrent que la révolution lavoisienne a profondément transformé le statut philosophique de la chimie, mais pas au point de conduire Kant à qualifier la chimie de « pure ».

En 1830, Auguste Comte, définissant l'objet de son *Cours de philosophie positive*, utilise à plusieurs reprises la notion d'application, mais non celle de science pure. D'une part, il distingue deux types de sciences naturelles : « les unes abstraites générales ont pour objet la découverte des lois... les autres concrètes, particulières, descriptives et qu'on désigne quelquefois sous le nom de sciences naturelles proprement dites, consistent dans l'application de ces lois à l'histoire effective des différents êtres existants ». Il mobilise, d'autre part, la distinction générale entre « spéculation » et « action », à laquelle il fait correspondre deux catégories de connaissances « théoriques » et « pratiques », sous-jacentes à la fameuse formule du positivisme « science d'où prévoyance ; prévoyance d'où action ». Tout en admettant que, au temps de Bacon, on a progressé en concevant la connaissance « comme véritable base rationnelle de l'action de l'homme sur la nature », Comte déplore l'utilitarisme de son siècle qui réduit les sciences à cette fonction, ignorant leur « destination plus directe et plus élevée » : connaître les lois des phénomènes³. L'autonomie des recherches théoriques par rapport aux besoins pratiques appelle, dit Comte, un médiateur entre science et arts, concrétisé dans une forme sociale nouvelle : l'ingénieur, « dont la destination spéciale est d'organiser les relations de la théorie et de la pratique³ ». On ne trouve toujours pas l'expression « science pure ».

Le couple de notions « science pure » et « science appliquée » ne s'inscrit pas dans une réflexion d'ensemble sur la finalité des sciences mais semble très fortement attaché à une localité du savoir : la chimie. En effet, d'après une étude de C. Meinel, ses premières occurrences, dès la fin du XVII^e siècle se rapportent aux mathématiques, mais il est manifeste que ces concepts sont empruntés au vocabulaire des chimistes de l'époque, puisqu'on distinguait la « *mathematica pura* » de la « *mathematica impura sive mixta*⁴ ». Quant à la distinction entre « *chimia pura* » et « *chimia applicata* », Meinel établit qu'elle est introduite par un chimiste d'Uppsala, Wallerius, en 1751⁵. Elle correspond à une tentative de légitimation de la chimie comme discipline académique renversant, en quelque sorte, la priorité chronologique des arts en une dépendance logique. Elle s'inscrit, selon Meinel, dans la tradition scandinave et allemande de relations étroites entre la chimie, le mercantilisme et le « kammeralisme » de l'Aufklärung qu'illustre un titre de Wallerius, *De nexu chemiae cum utilitate reipublicae*. Avec les multiples traductions des ouvrages de Wallerius, les expressions « pur »

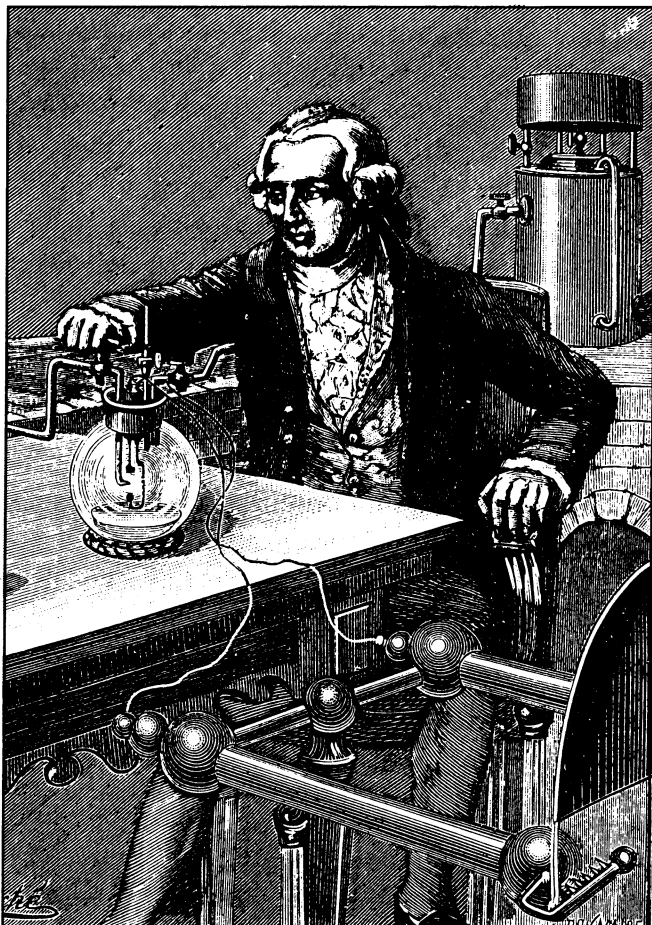
et « appliqué » se répandent très rapidement en Allemagne puis en Angleterre. Mais leur diffusion en France est beaucoup plus tardive. Bien qu'on trouve dans l'Encyclopédie l'idée générale d'application d'une science à d'autres domaines, la notion d'exploitation utilitaire d'un savoir autonome n'apparaît qu'à l'époque révolutionnaire. Le premier ouvrage intitulé *Chimie appliquée* est publié en 1807⁶. On observe en France un certain décalage entre ce qu'on appelle l'« esprit des lumières » et l'apparition des catégories de « pur » et d'« appliqué ».

Tel est le problème qu'on se propose d'examiner dans cet article en suivant la chimie française sur près d'un siècle, de 1750 à 1850. Ce décalage signifierait-il qu'en France la chimie n'a pas été promue comme une discipline académique autonome avant la fameuse révolution chimique de Lavoisier ? Ou bien que les relations entre économie et chimie manquaient dans la France du XVIII^e siècle ?

Lavoisier et Leblanc

Deux portraits de fondateurs habitent la mémoire collective des chimistes français, qui ne jouissent pas d'une égale renommée. La chimie moderne a été fondée par Lavoisier, c'est une certitude pour les Français, rappelée à satiété depuis deux siècles. Elle n'est pas forcément partagée par les chimistes anglais qui ont d'autres prétendants au titre de fondateur. Et l'évidence française se trouve périodiquement contestée par les Allemands, chaque conflit entre les deux nations rallumant d'après controverses sur la patrie de la chimie⁷. Quelles que soient les variantes nationales sur la personne du fondateur, toutes ces recherches en paternité reposent sur le même présupposé : il existe un moment fondateur à partir duquel la science chimique devient moderne. Dès lors, elle progresse irréversiblement, accumule lois et découvertes qui tout naturellement débouchent sur de mirifiques applications industrielles ou agricoles.

Tout en situant le tournant à la même époque, les historiens de l'industrie proposent un autre récit des fondations. Ils admettent couramment que l'industrie chimique lourde démarre avec le procédé Leblanc pour la fabrication de la soude artificielle à partir du sel marin. En effet, autour de la soudière Leblanc se greffent d'autres industries : une vitriolerie en amont, et une fabrique de produits chlorés pour le blanchiment, récupérant l'acide chlorhydrique dégagé lors de la première phase, en aval. C'est un véritable « système technique » qui stimule plusieurs secteurs de production et règle la cadence de l'industrie chimique pendant presque un siècle⁸. Bien que le procédé Leblanc ait été mis au point peu après la révolution chimique, il n'est pas directement en relation avec la nouvelle théorie chimique. Au contraire, le nom même du produit fabriqué par Leblanc symbolise une rupture : la soude factice du manufacturier est du carbonate de sodium pour le chimiste de l'Académie. Le devenir du procédé Leblanc accuse encore l'impression de divorce. Adopté dans tous les pays, continuellement perfectionné, il reste pourtant mal expliqué⁹. Quand les soudières Leblanc commencent à fermer vers l'année 1870 à cause de la



concurrence du procédé Solvay, les chimistes disputent encore sur la suite des réactions qui aboutissent à la formation de carbonate de sodium. Comme l'oiseau de Minerve, la théorie chimique prend son vol à la tombée de la nuit. Et, si l'on songe au mystère qui longtemps plane sur la fameuse chambre de plomb, utilisée depuis le XVIII^e siècle, dans la production d'acide sulfurique, on voit que ce retard de la science sur la technique n'est pas un cas isolé.

Voici deux récits de fondations qui impliquent des positions très différentes sur les relations entre science et industrie. Or il n'y a pas vraiment de concurrence entre les deux fondateurs contemporains malgré quelques similitudes dans leurs destins. Par leur condition sociale, Lavoisier et Leblanc figurent comme derniers représentants d'une époque où la chimie n'est pas un métier¹⁰. Tous deux ont été durement frappés par la Révolution française. En dépit de sa renommée, de son rôle à la commission des poids et mesures, Lavoisier est guillotiné le 8 mai 1794 au titre de fermier général de l'Ancien Régime. Nicolas Leblanc, qui avait monté une fabrique à Saint-Denis avec le soutien financier du duc d'Orléans en 1791, se retrouve sans ressources après la nationalisation de sa fabrique et le don de son brevet au Comité de salut public. Il se suicide en 1806, bien qu'on lui ait rendu sa fabrique, parce qu'il n'a plus de capitaux ni de moyens pour la gérer. Victime des convulsions révolutionnaires, comme Lavoisier, mais pas directement, Leblanc est plutôt anéanti, dépassé par les événements. La postérité accuse le contraste. Lavoisier est célébré comme un héros : une légende rapporte qu'il aurait, avec sa balance, chassé les ténèbres de l'alchimie. Au contraire, l'invention de Leblanc est souvent expliquée par les guerres et le blocus économique. D'un côté, le génie créateur qui fonde un édifice et transcende son époque ; de l'autre, un pâle inventeur effacé derrière un rideau de circonstances.

Ces versions populaires ont été rectifiées par les historiens des doctrines et des techniques chimiques du XVIII^e siècle. Depuis longtemps déjà, Hélène Metzger a souligné que la chimie pré-lavoisienne forme un système rationnel, cohérent, loin de l'alchimie, et elle a mis en pièces la tradition historiographique qui réduit la doctrine de Stahl au phlogistique pour mieux le balayer d'un coup d'oxygène¹¹. Les biographes de Leblanc montrent l'antériorité de l'invention par rapport aux événements invoqués. Le procédé est en effet présenté à l'Académie royale des sciences de Paris en 1789, en réponse à un offre de prix lancée depuis 1775. Quant à Leblanc, chirurgien de formation, cristallographe à ses heures de loisir, il est membre de plusieurs sociétés savantes, intégré au milieu scientifique de son époque¹².

Déconstruire les légendes par la précision des analyses est une entreprise historique capitale mais il faut encore comprendre leur signification. Le contraste entre



Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794) - déterminant la formation de l'eau en faisant éclater des étincelles électriques au sein d'un mélange de gaz hydrogène et oxygène venant de réservoirs de gazomètres placés à droite et à gauche de la figure - Extrait de Physique populaire d'É. Desbeaux, Paris, 1891.

Statue de Nicolas Leblanc (1742-1806) inaugurée à Paris, au Conservatoire des arts et métiers, le 28 juin 1887.

ces deux figures de pionniers révèle une dissymétrie dans les façons de concevoir l'invention scientifique et l'invention technique. Le prestige monopolisé par Lavoisier suggère que la science est l'unique moteur du progrès technique et sert l'image d'une recherche pure éternellement féconde, avec des retombées techniques miraculeuses.

En quoi l'œuvre de Lavoisier peut-elle vraiment soutenir pareille conception ? Dans quelle mesure la révolution chimique a-t-elle réorganisé les rapports entre science et industrie ? Dans la multitude des articles parus sur la révolution chimique depuis une trentaine d'années, on trouve seulement deux études traitant des relations entre le changement observé dans la science et le développement des techniques¹³. Tout se passe comme si ces questions avaient été gelées, dans le climat de guerre froide des années 50, par la riposte d'Henry Guerlac à une tentative d'interprétation marxiste de la révolution chimique¹⁴. Guerlac reconnaissait que les techniques métallurgiques et minières avaient stimulé les études de chimie dans la deuxième moitié du XVIII^e siècle, mais il refusait absolument d'établir une relation entre les problèmes métallurgiques et le renversement de la théorie du phlogistique. Mon intention n'est pas de rouvrir le débat en ces termes, mais simplement de voir comment la révolution chimique se traduit dans l'espace social.

1750, SCIENCE ET ARTS EN INTERACTION

En France comme ailleurs, au XVIII^e siècle, une majorité de traités comportent une partie théorique et une partie pratique. La distinction est admise par tradition et n'est jamais remise en question. L'action – *praxis* – étant bien distincte de la production – *poiesis* – ou de la *technè*, la chimie pratique ne correspond pas aux arts chimiques. Elle traite des opérations chimiques et des instruments de laboratoire. Ainsi P.J. Macquer publie en 1749 des *Elémens de Chymie théorique* qui exposent la théorie des affinités et deux ans plus tard des *Elémens de Chymie pratique*¹⁵. La division entre les deux traités correspond moins à une différence de contenu – Macquer inclut beaucoup d'opérations et de descriptions d'expériences dans le corps de la théorie – qu'à une différence de présentation. La chimie théorique suit un ordre logique, tandis que la chimie pratique échappe à une présentation systématique.

Une réalité quotidienne

Quant au lien avec les arts, Macquer le noue dans la vie quotidienne, en tant qu'inspecteur général des teintures du royaume. L'union du laboratoire et de l'atelier est encouragée en France par le gouvernement qui confie à des savants de l'Académie royale des sciences de Paris la solution de problèmes pratiques. Tel est le cas de la teinturerie : en 1731 débute une dynastie de chimistes, grands commis d'État, qui unissent étroitement dans leur carrière la connaissance et l'action. C.F. de Cisternay du Fay, puis Jean Hellot auquel succèdent P.J. Macquer puis

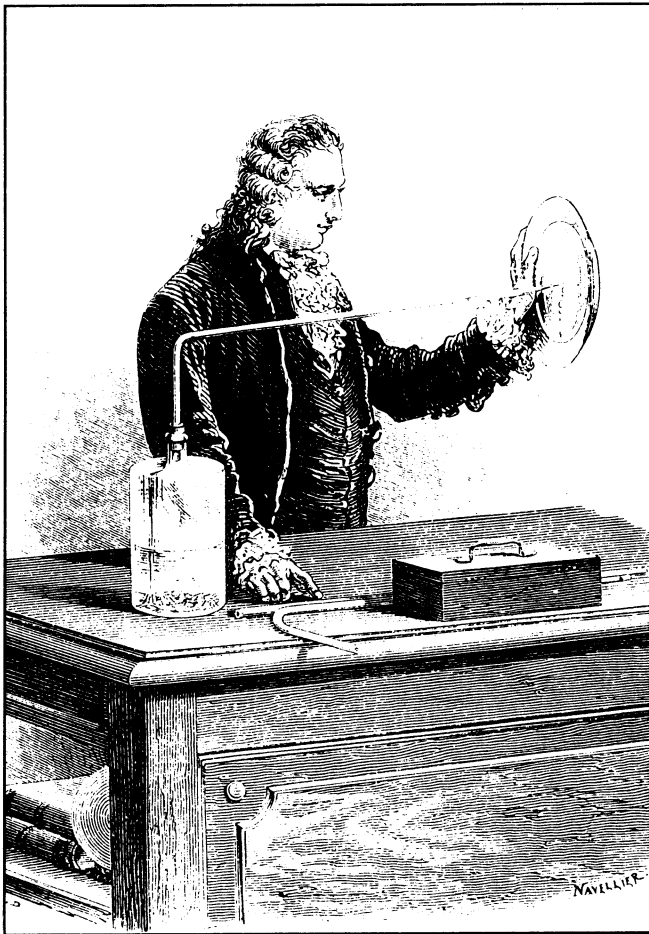
C. L. Berthollet, ont tous contribué à développer la concertation entre savants et fabricants¹⁶.

S'il est vrai que cette interaction a répandu parmi les fabricants la conviction que les lumières d'un chimiste étaient utiles dans l'atelier, il semble que les progrès importants réalisés dans la teinturerie au cours du XVIII^e siècle doivent plus au pragmatisme et à l'empirisme des artisans qu'aux brillants théoriciens. Quel est l'apport effectif de ces chimistes à la production ? Mis à part l'*Art de la teinture des laines* de Jean Hellot, qui, traduit en plusieurs langues et largement diffusé, a réellement servi de guide dans les ateliers, les chimistes ont surtout fourni, après coup, des interprétations théoriques de ce qui se passe dans les ateliers : Macquer avance une explication de la teinturerie en termes d'affinités et une classification des couleurs¹⁷. Berthollet, dans ses *éléments de l'art de la teinture*, propose une vaste synthèse ordonnée des procédés observés, recueillis dans les ateliers. Il n'a pas l'ambition de diriger les artistes, ni même d'améliorer leurs techniques, mais, comme le précise le rapport de Lavoisier, d'« éclairer les artistes sur les principes de leur art pour qu'ils puissent ensuite le perfectionner dans leur pratique »¹⁸. Intégrer la pratique dans un cadre théorique général, classer, systématiser les phénomènes, telles sont les missions des savants. D'innovation technique suscitée par la théorie chimique, il n'est pas question.

L'enjeu est ailleurs. Il y va du statut de la chimie. Autant les rapports entre science et art ne posent pas de problème dans la réalité, autant, comme le remarque Meinel, ils deviennent un sujet sensible au niveau symbolique de la lutte pour la reconnaissance et la dignité académique des chimistes. Or ce combat, illustré en France par l'article « Chymie » de Venel dans l'*Encyclopédie* de Diderot, ignore les catégories de « pur » et d'« appliqué » et mobilise une conception bien différente de la chimie et des rapports entre science et art¹⁹.

Chimie d'artiste

Venel commence par dénoncer quelques préjugés nuisibles à l'image sociale de la chimie. Le premier, répandu parmi les « gens peu instruits », consiste à confondre le chimiste et l'artiste verrier ou céramiste. Le second, plus grave car il procède non de l'ignorance mais de la lecture de mauvais traités de chimie, consiste à confondre le chimiste et le « manœuvre de l'expérience ». Contre la réduction de la chimie aux arts et contre l'empirisme aveugle, Venel présente la chimie comme une doctrine générale, rivale et non servante de la mécanique par sa puissance explicative, par la profondeur de ses principes et par l'extension de son territoire « au laboratoire de la nature et de l'art ». La critique de la mécanique s'accompagne de la volonté d'affirmer l'originalité de la chimie dans ses rapports entre science et art. Si Venel combat la confusion entre la science chimique et les arts, ce n'est pas pour affirmer qu'ils sont étrangers l'un à l'autre ni même indépendants. Il pense leur différence en termes de général et de particulier. La chimie – toujours au singulier – est « une vaste source de connaissances natu-



relles » dont les arts ou d'autres sciences font « une application particulière » (p. 420).

Mais au lieu d'envisager la relation entre la science générale et ses applications à sens unique, Venel définit une interaction sous la forme d'une double question :

« Les arts chimiques étant liés à la chimie générale comme à un tronc commun, il se présente ici deux questions très importantes, ce me semble. 1°) Jusqu'à quel point chacun de ces arts peut-il être corrigé et perfectionné par la science chimique ? 2°) Combien la science chimique peut-elle être avancée à son tour par les connaissances particulières puisées dans l'exercice de chacun de ces arts. Quant à la première question, il est évident que le chimiste le plus éclairé, le plus instruit, dirigera, reformera, perfectionnera un art chimique quelconque avec un avantage proportionnel à ses connaissances générales, à sa science, à condition néanmoins que sur l'objet particulier de cet art il aura acquis cette faculté de juger par sentiment, qui s'appelle « coup d'œil » chez l'ouvrier, et que celui-ci doit à l'habitude de manier son sujet ; car aucun moyen scientifique ne saurait suppléer à cette habitude, c'est un fait, une vérité d'expérience » (p. 420).

A la première question, la réponse est positive mais conditionnelle : les lumières de la science n'éclairent l'atelier que si le chimiste possède en outre l'habitude, la familiarité, la longue expérience de l'ouvrier. En revanche, à la deuxième question, la réponse est franche : la science chimique ne peut se passer des ressources de l'art. Généralité et prévisibilité, ces deux caractères des phénomènes

scientifiques ne peuvent être atteints sans l'empirisme, l'habileté opératoire, le « coup d'œil » d'un artiste. Pour éliminer les singularités, les caprices de la nature, les résultats parfois aberrants d'une expérimentation, il faut, plus que de bons instruments, le « bon sens » d'un artiste qui a « un thermomètre au bout des doigts et une horloge dans la tête ».

« En un mot, il faut être artiste, artiste exercé, rompu, ne fût-ce que pour exécuter, ou pour diriger les opérations avec cette facilité, cette abondance des ressources, cette promptitude qui en font un jeu, un délassement, un spectacle qui attache et non pas un exercice long et pénible [...]. Tous ces phénomènes isolés, ces prétendues bizarreries des opérations, ces variétés des produits, toutes ces singularités dans les résultats des expériences, que les demi-chimistes mettent sur le compte de l'art, ou des propriétés inconnues des matières qu'ils employent, peuvent être attribuées assez généralement à l'inexpérience de l'artiste, et elles se présentent peu au yeux du chimiste exercé. Il n'arrivera que très rarement à celui-ci, peut-être même ne lui arrivera-t-il jamais, d'obtenir un certain produit, et de ne pouvoir jamais parvenir à le retirer une seconde fois des mêmes matières » (p. 420).

L'interaction entre science et art présente donc une dissymétrie : l'art est source de savoir pour la science puisqu'il n'est de savoir chimique sans savoir-faire, de vue d'ensemble sans curieuse minutie des détails. Mais la relation inverse reste problématique. La science est utile pour perfectionner, corriger, étendre les procédés de l'art. « Quant à l'invention directe et systématique des arts, de ceux surtout qu'on peut regarder comme chefs, loin de convenir qu'elle soit due aux sciences, c'est une question de savoir si elle peut l'être » (p. 425).

Pour Venel, promouvoir la chimie comme science digne de figurer dans l'*Encyclopédie* ne signifie pas renoncer à un passé empirique. Recettes, cuisine, astuces et saleté des manipulations, tout ce qui fut jugé honteux par les tenants de l'explication mécanique devient un titre de noblesse. La « *sapientia chimica* » est à la fois un savoir et une pratique. Elle « a dans son corps la double langue, la populaire et la scientifique » (p. 419). La science n'est ni antérieure ni supérieure aux arts. Ce sont deux manifestations de l'identité de la chimie, deux modes d'expression qui font son originalité parmi les autres sciences de la nature.

1800 : « LE GÉNIE DE LA SCIENCE CHIMIQUE »

Dans le « Discours préliminaire » de son monumental *Système des connaissances chimiques*, Fourcroy, ancien conventionnel, membre du Comité de salut public aux heures les plus chaudes, rappelle les exploits des chimistes révolutionnaires pour défendre la patrie en danger :

Expérience de Pierre-Joseph Macquer (1718-1784) : « Combustion du gaz hydrogène à l'air, contre une soucoupe de porcelaine ». Extrait des *Merveilles de l'industrie de L. Figuier, Furne et Jouvet édit., Paris, 1873-1877, vol. 3.*

« Sans le génie de la science chimique, elle [la France] était menacée d'une disette absolue dans ses moyens de défense. Une administration active, et accoutumée à vaincre toutes les résistances [...] conçoit l'espoir de trouver dans la chimie ce que la routine des ateliers ne peut lui fournir, et ce que le commerce interrompu lui refuse. Elle appelle les chimistes les plus éclairés, elle les réunit, leur fait connaître ses besoins pressans autant qu'étendus, la confiance qu'elle a placée dans leurs lumières et les secours qu'elle leur demande. Son attente n'a pas été trompée : ses espérances se sont réalisées au-delà même du point où elle les avait portées ²⁰. »

Une théorie et des accessoires

Changement de décor. Plus d'artiste habile et créatif inspirant les lumières de la science. Non seulement la science guide, éclaire, simplifie, rationalise la production, mais elle innove. De l'atelier ne peut sortir que la routine, au point que l'artiste n'est plus l'interlocuteur du savant éclairé. Entre le fabricant et le savant s'interpose l'administration.

Toute la fonction d'utilité de la chimie semble transférée des arts vers la science. D'où une inversion des rapports décrits par Venel. Évoquant la collecte du salpêtre dans les caves, Fourcroy conclut : « *Voilà donc un fonds inépuisable de la matière la plus utile à la défense, et la plus avantageuse à une foule d'ateliers et de manufactures, trouvé pour jamais dans les connaissances chimiques.* » (p. xxij). L'art n'alimente plus le savoir ; la science, en revanche, fournit aux ateliers leur matière première.

Science-providence de la France. La chimie, tout naturellement, répond aux besoins sociaux. Cette adaptation miraculeuse de l'offre à la demande passe, en fait, par quelques intermédiaires – entre autres la présence de chimistes dans les comités révolutionnaires – dont Fourcroy ne dit rien ici. Cela lui procure un bon argument pour obtenir des crédits ou des postes : en quelque sorte un échange de services entre la patrie et la chimie « *C'est à la France que sont dus le renouvellement, la restauration complète et la perfection de cette belle science ; et s'il était juste qu'elle en recueillît les fruits dans une grande occasion où il s'agissait de son existence et de son soutien, il est aussi naturel qu'elle voie former dans son sein les plus grandes entreprises destinées à augmenter les progrès de la chimie et à en étendre les avantages.* » (p. xxiiij).

En quoi consiste cette science, bonne à tout faire pendant la Révolution française ? Elle est profondément transformée par sa propre révolution. Fourcroy la présente comme une science autonome, affranchie du joug de la pharmacie, émancipée enfin de l'histoire naturelle. Elle se partage toujours entre théorie et pratique, mais la distinction entre science et art semble effacée. Le plan qu'expose Fourcroy pour la construction d'un système de chimie s'organise en quatre parties : Théorie de la science, Histoire de la science, Pratique (opérations de laboratoire) et Applications. Mais ce plan idéal est impraticable. En dépit de ses dix épais volumes, le *Système* est présenté comme un ouvrage incomplet, inachevé. Seule la première

partie est intégralement traitée. Pour les autres, quelques traits d'histoire et plusieurs faits de pratique ou d'applications aux sciences et arts sont évoqués chemin faisant. Au bilan, la chimie qu'apprennent les étudiants consiste en un système théorique avec des « accessoires » (p. xxxviii). S'il est vrai que Fourcroy a, comme il le prétend, recueilli les matériaux de cet ouvrage pendant vingt ans, alors cette distribution des contenus est plus pertinente pour définir la chimie que le plan idéal conçu au départ. En effet, le but des menues injections d'histoire, de pratique et d'applications n'est point de faire connaître ces domaines par de brefs aperçus, mais plutôt de valoriser la puissance de la théorie moderne : « *faire apercevoir en quoi les procédés actuels de l'art chimique diffèrent de ce qu'ils étaient autrefois* », « *exposer les grands avantages dont la culture et l'étude approfondie de la chimie sont accompagnées* ». La théorie est autonome, simplement embellie par la pratique et les applications.

Un double déplacement s'est donc opéré par rapport à la chimie de Venel : dans l'espace de la science chimique, un mouvement de bascule vers la théorie qui définit l'essence de la chimie, tandis que la pratique et les applications deviennent de simples accessoires ; et corrélativement un déplacement de la fonction d'utilité des arts vers la science chimique.

Ce paysage de 1800 prend d'autant plus de relief qu'il succède à quelques années tourmentées où les sans-culottes exigeaient la fermeture des académies et la censure des recherches sans utilité publique ²¹. Que les propos de Fourcroy constituent une riposte à ces lourdes charges contre la science au nom des arts, une sorte de liquidation d'un passé jacobin, cela n'est pas improbable.

Mais dans quelle mesure sont-ils commandés par la révolution interne à la chimie ? Sans entrer ici dans les débats d'interprétation sur la révolution chimique, on peut repérer dans l'œuvre de Lavoisier ce qui a pu induire ces deux déplacements et modifier les rapports entre science et art.

Espace académique

La réforme de la nomenclature, en 1787, est un premier geste lourd de conséquences ²². D'une part, cette langue forgée dans le cadre de l'Académie et diffusée dans les milieux savants français ou étrangers entraîne une rupture de dialogue avec la langue parlée dans les ateliers. Si les matières premières utilisées et les produits fabriqués ne portent plus le même nom, il faut ou bien prévoir un médiateur-traducteur entre l'artisan et le chimiste, ou bien assurer une formation des artisans qui ne soit pas simplement un apprentissage « sur le tas » mais un enseignement de la chimie. Telle est la rançon d'une langue rationnelle.

D'autre part, le clivage dans l'espace social entre catégories professionnelles de la chimie est la conséquence d'une volonté explicite de rupture dans le temps avec un passé jugé honteux ou encombrant. La langue d'usage forgée au long des siècles, enrichie par de multiples traditions – antiques, médiévales, renaissantes ou plus récentes, méditerranéennes ou nordiques – est



perçue comme un fardeau, à la fois obstacle à la communication et véhicule d'erreurs. L'initiative de créer une langue nouvelle et rationnelle suggérée par Bergmann, compatriote de Linné, est mise en œuvre par Guyton de Morveau. Dès 1782, il énonce clairement le principe fondamental : « *la dénomination d'un composé chimique n'est claire et exacte qu'autant qu'elle rappelle les parties composantes par des noms conformes à leur nature* ²³ ». Éliminer les noms qui rappellent l'inventeur, l'origine géographique ou historique, bref le passé, l'anecdote, l'événement. Avec un tel mot d'ordre, les chimistes se dépouillent de leur histoire pour se tourner vers la nature : « *les dénominations doivent être autant qu'il est possible conformes à la nature des choses* ».

Qu'est ce que la nature des choses ? Le chimiste peut-il espérer la connaître et doit-il attendre cette heure pour forger un nouveau langage ? C'est sur ce point que Lavoisier transforme profondément le projet initial. Sa réponse passe par une philosophie du langage empruntée à Condillac.

« *Les langues n'ont pas seulement pour objet, comme on le croit communément, d'exprimer par des signes, des idées et des images : ce sont de plus de véritables méthodes analytiques, à l'aide desquelles nous procédons du connu à l'inconnu, et jusqu'à un certain point, à la manière des mathématiciens* ²⁴ ».

La nomenclature n'est pas une simple collection de signes, mais une méthode d'investigation. Mieux, une méthode d'apprentissage puisque le chimiste débutant est, dit Lavoisier, dans une situation analogue à celle de l'en-

fant qui forme ses premières idées (p. 9). Ce détour philosophique permet de résoudre sans hésitation le défi de l'entreprise des réformateurs. On peut forger une langue qui soit un « miroir fidèle » de la nature des choses alors qu'on ne la connaît pas encore. Lavoisier ne sait pas de quoi est faite la réalité, mais il sait comment elle est faite : par composition et elle est connue par décomposition. Telle est, dit-il, la « logique naturelle ». En d'autres termes, la nature d'une chose est sa composition établie par le chimiste au terme d'une analyse.

D'où un programme unique assigné à la science chimique : « *La chimie, en soumettant à des expériences les différents corps de la nature, a pour objet de les décomposer et de se mettre en état d'examiner séparément les différentes substances qui entrent dans leur combinaison [...]. La chimie marche donc vers son but et vers sa perfection en divisant, subdivisant et resubdivisant encore et nous ignorons quel sera le terme de ses succès* ²⁵ ».

Les notions de corps simple et composé forment l'axe directeur de la théorie chimique, tandis que celles de principes et de mixtes perdent peu à peu leur pertinence.

En centrant la chimie sur les opérations d'analyse et de synthèse, Lavoisier lui fixe un territoire. Les substances ne se définissent plus par leur appartenance à un règne de la nature, minéral, végétal ou animal. Si la composition établie au terme d'une analyse de laboratoire épuise la définition des substances, le chimiste n'a plus à se promener en plein air, à être attentif aux détails, aux circonstances. Il n'est plus soumis aux caprices de la nature, aux aléas du terrain. Il peut s'enfermer dans le laboratoire, où il contrôle les événements grâce à des instruments de mesure tels que la balance ou le gazomètre, pour établir des bilans de réaction. Ainsi le chimiste cultive-t-il le voisinage de la physique et prend-il ses distances à l'égard des géologues, minéralogistes, botanistes... tous hommes de terrain renvoyés dans la catégorie des applications avec les pharmaciens, les métallurgistes et les artisans.

Former des chimistes professionnels

Lavoisier modifie la façon même de poser le problème entre science et art par ses vues sur la recherche et l'enseignement de la chimie. Comment former des chimistes ? Cette question préoccupe Lavoisier tout au long de sa carrière, bien qu'il n'ait jamais enseigné. Dès la fin des années 70 du XVIII^e siècle, il travaille avec son collaborateur Jean Bucquet à la rédaction d'un traité élémentaire et déclare : « *Ce sera l'ouvrage de ma vie* » ²⁶. Dans ses derniers jours, Lavoisier prépare encore un *Cours de chimie expérimentale* ²⁷, tandis qu'il rédige, au nom du Bureau des Arts et Métiers, des *Réflexions sur l'instruction publique* pour la Convention nationale ²⁸. Un manuscrit de cette époque, intitulé *Sur la manière d'enseigner la chimie*, suggère une liaison forte entre le projet pédagogique et la révolution chimique ²⁹. A la manière de Descartes, au début du *Discours de la Méthode*, Lavoisier présente son

Jean Antoine Chaptal (1756-1832). Extrait des Merveilles de l'industrie de L. Figuier, Furne et Jouvet édit., Paris, 1873-1877, vol. 1.

entreprise comme fruit d'une insatisfaction à l'égard de l'enseignement qu'il a reçu et d'une volonté de « *refaire son instruction chimique* ». Le reproche essentiel adressé à ses professeurs est le manque de progression pédagogique dans leurs cours : ils ne procèdent pas du connu à l'inconnu :

« *Ainsy deux premières questions sont à faire aux élèves en commençant à enseigner : que sçavez-vous ? Que voulez-vous sçavoir ? Celui qui enseigne doit à plus forte raison se faire deux questions à lui-même : où commence et où finit le livre que je me propose de parcourir ?*²⁶ »

Lavoisier définit les conditions d'un bon enseignement dans les mêmes termes que la chimie qu'il promeut. La méthode des bilans mise en œuvre pour peser ce qui entre et ce qui sort de l'enceinte réactionnelle au laboratoire doit s'appliquer à la situation pédagogique. La marche du simple au complexe, déjà consacrée « *logique naturelle* » dans la réforme du langage, est aussi une logique didactique.

D'où le pari lancé dans le Discours préliminaire au *Traité élémentaire* : former des chimistes en un an. Partir de rien, ne rien supposer qu'un entendement vierge, une table rase comme l'esprit d'un enfant, et l'informer progressivement, en partant des faits pour aller aux idées, des notions les plus simples aux plus complexes (pp. 4-5). Lavoisier présente clairement le prix à payer pour ce résultat : laisser de côté tout ce qui concerne les affinités, car cela obligerait à « *supposer, dès les premiers pas des connaissances que l'élève ou le lecteur ne doivent acquérir que dans les leçons subséquentes* » (p. 4) ; laisser de côté tout ce qui concerne les principes ou éléments des corps, car cela introduirait des spéculations métaphysiques dans une bâtisse que l'on veut fonder exclusivement sur des faits ; enfin, éliminer l'histoire de la chimie qui compliquerait inutilement la tâche des « commençants ». Bref, conduire l'élève par la main sur un chemin balisé, aplani, débarrassé des obstacles, ménageant une progression régulière, tel est le projet pédagogique de Lavoisier. Certes, vers la fin de sa vie, Lavoisier semble avoir modifié ses plans puisqu'il admet que la chimie exige un savoir préliminaire, « *un esprit formé* », « *des hommes faits*²⁶ ». Reste qu'il a défini les conditions d'un programme de formation permettant de faire l'économie de la longue familiarité avec l'expérience que préconisait Venel.

Enfin, c'est sous forme d'un programme d'enseignement que Lavoisier expose dans les *Réflexions sur l'instruction publique* sa conception des rapports entre la science chimique et les arts³⁰. Il introduit la chimie seulement au niveau de l'enseignement secondaire, qu'il partage en deux divisions d'orientation professionnelle : un enseignement de langue, science et littérature, sensiblement analogue à celui des collèges et universités préparant aux fonctions publiques ; pour ceux qui se destinent aux « arts », Lavoisier prévoit un enseignement nouveau, avec un tronc commun, le dessin, indispensable à tous les arts, puis une bifurcation vers les arts mécaniques ou les arts chimiques.

« *Le cours relatif aux arts chimiques devra commencer par une exposition des corps naturels qui sont en usage dans les arts, par une description de leurs qualités extérieu-*

res, par quelques explications sur leur origine. Passant ensuite à l'emploi de ces substances simples, le professeur fera voir que les opérations chimiques relatives aux arts peuvent se classer, se décomposer comme les machines ; que ces opérations se rapportent à des combustions, à des décombustions, à des dissolutions, à des cristallisations, à des précipitations, à des fermentations. Il aura comme dans le cours des arts mécaniques, l'attention de commencer par les généralités qui sont communes à un grand nombre d'arts, et de réserver pour la fin de son cours les instructions relatives aux arts qui exigent des développements particuliers » (p. 525).

L'exposé diffère sensiblement de celui de la science chimique, et la marche logique du simple au complexe est par deux fois traduite : les substances simples par où l'on doit commencer ne sont pas des résidus d'analyse mais des matières premières de transformation dont on évoquera l'origine naturelle. La logique de décomposition et de classification du simple au complexe est déplacée des substances vers les opérations, du matériau vers le geste.

Après avoir traité de l'« *éducation des individus* », Lavoisier, dans une deuxième partie, pose le problème d'une politique de la recherche en termes d'instruction « *de la nation elle-même, prise collectivement, celle de l'humanité tout entière* » (p. 527). Il ne s'agit plus de transmettre des connaissances mais de les acquérir, de les augmenter, pour le profit de la société. Prenant l'Angleterre pour modèle, Lavoisier explique que la prospérité industrielle ne dépend pas des seules ressources matérielles mais aussi de l'avancement de la recherche scientifique, « *de l'emploi des facultés de l'esprit* » (p. 528). Il propose donc de créer un corps de chercheurs fonctionnaires, sans aucune charge d'enseignement, uniquement consacré à l'invention et à la publication, et de regrouper ses membres, pour faciliter l'interaction en « *assemblées communes, à des époques déterminées* ».

Ce projet, élaboré en août 1793, peut être lu comme une riposte circonstancielle au décret de fermeture des académies, puisqu'il reprend les arguments adressés à Lakanal dans les *Observations sur l'Académie des sciences*. Lavoisier y distinguait trois éléments de la puissance d'une nation : les ressources naturelles, l'industrie qui les met en mouvement et la science qui donne l'impulsion à tout le système. Cette hiérarchie étant posée, la seule question à examiner, dit Lavoisier, est celle de savoir dans quelle mesure les sociétés savantes contribuent aux progrès des sciences. Bref, l'utilité politique des sciences est indiscutable ; discutons politique scientifique. Et Lavoisier préconise un corps de savants salariés par la République, une recherche financée par l'État³¹.

On voit donc qu'en plus des transformations qu'il apporte à la théorie et à la pratiques chimiques, Lavoisier a renouvelé le problème de la liaison entre science et art en posant deux conditions : un nouveau type de formation et la professionnalisation de la recherche.

Dialogue rompu

Mais cette façon d'envisager les rapports entre science et arts ne fait pas l'unanimité dans l'école française de

chimie. Chaptal, partisan de la révolution chimique et auteur du premier traité français intitulé *Chimie appliquée aux Arts* (1807), dénonce un effet pervers de la chimie lavoisienne. Ayant la double casquette de professeur à l'École de santé de Montpellier et de manufacturier, Chaptal est sensible aux difficultés de communication entre les divers métiers de chimistes. Tout en adoptant la logique analytique du savant, il connaît celle du fabricant et s'inquiète du divorce entre laboratoire et atelier. Le *Discours préliminaire* balance entre les deux points de vue. Chaptal souligne d'abord les avantages qu'apporte la nouvelle chimie à la conduite des arts³². Elle n'est plus seulement un flambeau qui éclaire et perfectionne l'atelier, elle crée de nouveaux arts : blanchiment, aérostation, etc. Grâce aux principes généraux auxquels se ramènent toutes les opérations de chimie, elle permet de faire l'économie d'une description détaillée de chacun des procédés techniques. La chimie est « *devenue tout à coup une science centrale d'où tout dérive et vers qui tout se réunit* » (p.xij).

Mais cette chimie ne répond pas aux besoins du fabricant :

« *Le fabricant pourrait aisément compromettre sa fortune et sa réputation s'il réglait sa conduite, ou fondait ses spéculations, sur quelques résultats de laboratoire ou sur des apparences trompeuses. Ce n'est qu'avec la plus grande circonspection qu'on doit porter dans les ateliers les innovations, quelque avantageuses qu'elles paraissent* » (p. xv).

Chaptal encourage chez le manufacturier une attitude circonspecte et méfiante – que le théoricien qualifie d'entêtement ou de préjugé aveugle – parce qu'il estime que le chimiste de laboratoire ne maîtrise pas tous les paramètres dont dépend le succès d'une innovation industrielle : marché, main d'œuvre, approvisionnement en matière première... Chaptal souligne le « *pouvoir des localités* ». La prospérité d'une fabrique dépend d'une foule de petits détails circonstanciels : la composition particulière d'un minerai en tel lieu, la configuration du paysage, un microclimat... bref une « niche ». Si chaque industrie a son terroir, les principes généraux dégagés par le savant ne peuvent normer la pratique de production : « *Le chimiste propose, le fabricant juge et décide* » (p. xx).

En soulignant la spécificité irremplaçable du savoir des fabricants, Chaptal est en un sens plus proche de Venel que de son collègue Fourcroy. Comme son maître de Montpellier, il maintient une priorité du savoir-faire sur le savoir : « *ma conviction est que les lumières de la pratique doivent arriver après elle* » (p. l). Ce savoir, acquis par l'expérience et la familiarité, est un préalable obligé : « *J'ai voulu, en un mot, éclairer un artiste et je n'ai pas prétendu former un ouvrier ; j'ai constamment supposé que j'écrivais pour l'artiste qui exécute et non pour l'apprenti qui entre dans un atelier* » (p. xlix).

Le discours d'un professeur à l'École polytechnique comme Fourcroy n'est pas celui d'un provincial, professeur et manufacturier. La révolution chimique n'a pas suffi à établir un nouveau consensus sur les rapports entre science et arts ; elle semble, dans l'immédiat, avoir perturbé le dialogue et exacerbé les tensions.

1850 : UNE CHIMIE À DEUX FACES : PURE ET APPLIQUÉE

Résumons : dès le milieu du XVIII^e siècle, la littérature chimique évoque de nombreuses applications dont la visée peut être cognitive ou technique. Au début du XIX^e siècle celles-ci sont présentées comme des sortes d'accès-soires d'une science nouvelle et originale. Mais c'est seulement au XIX^e siècle que cette science est dite « pure ».

L'invention de la « chimie pure »

Quelle que soit l'importance de la soude, du blanchiment, des colorants... des industries chimiques, on aurait tort de caractériser le XIX^e siècle par le triomphe de la chimie appliquée. La multiplication des chaires de chimie, des journaux spécialisés et des sociétés savantes, bref le triomphe de la chimie pure sur la scène académique, est un phénomène aussi capital, qui touche tous les pays d'Europe.

Dans le cas de l'Allemagne, ce phénomène est lié à la réforme du système universitaire, inspirée, entre autres, par Humboldt et Fichte. Plus qu'une formation professionnelle utile à l'État, l'Université doit procurer une authentique culture scientifique et former à la recherche³³. La promotion de la chimie universitaire est dominée par la figure de Liebig. Pendant plus de vingt-cinq ans, de 1824 à 1852, dans son laboratoire-école de Giessen, il forme des chimistes qualifiés venus étudier du monde entier³⁴. Contre la conception baconienne et utilitaire de la science, Liebig défend la science pure et déclare que le degré de civilisation d'un peuple peut se mesurer par ses recherches pures³⁵. La réaction contre l'utilitarisme est un mouvement si affirmé que peu à peu dans la majorité des universités la chimie appliquée disparaît³⁶.

En Angleterre, malgré une importante école de recherche fondée par Thomas Thomson à Glasgow, c'est plutôt le modèle Liebig qui préside à la création du Royal College of Chemistry à Londres³⁷. Si les fondateurs invoquent les bénéfices de la chimie appliquée pour intéresser les industriels au financement de l'entreprise, très vite les professeurs orientent les cours vers la chimie pure. Dans un ouvrage intitulé *Science versus practice*, Bud et Roberts présentent la distinction entre pur et appliqué comme la pièce maîtresse d'une stratégie académique : « *The concepts of pure and applied science... justified the institutions and in turn they acquired institutionalized validity. Ironically the discipline of chemistry, promoted as intrinsically useful, prospered as a pure science* »³⁸.

En France, « pur » et « appliqué » sont aussi des catégories pédagogiques utilisées dans l'élaboration des programmes pour l'ouverture de nouveaux cours. Mais à la différence de l'Allemagne, l'Université joue un rôle mineur en France dans l'essor de l'enseignement de la chimie. On crée certes beaucoup de chaires de chimie mais peu dans les facultés de sciences. La chimie s'implante dans des établissements à vocations diverses : à l'École polytechnique lors de sa création, dans les écoles de

médecine, de pharmacie, d'agriculture, à l'École des mines, à l'École normale supérieure, au Conservatoire national des arts et métiers, à l'École centrale des arts et manufactures³⁹... La chimie se répand, elle s'« applique » au sens premier de ce verbe qui désigne une action de superposition d'où résulte le recouvrement d'un espace. Comme la peinture appliquée sur un mur, la chimie couvre un vaste champ du savoir. Loin de produire une chimie éclatée, diversifiée suivant les registres, ces multiples applications laissent dans l'enseignement une empreinte, une sorte de dénominateur commun aux diverses pratiques professionnelles de la chimie. Ce que l'on appelle « chimie appliquée » n'est souvent qu'un squelette de la chimie pure. Une rapide consultation d'une douzaine de manuels de chimie appliquée, publiés en France entre 1800 et 1850, montre que la chimie élémentaire constitue l'essentiel de ces ouvrages et que la description des procédés de fabrication des produits tels que l'acide sulfurique, la soude ou les chlorures décolorants est bien souvent réduite à quelques lignes. En outre, ce silence sur les techniques est plus marqué dans les ouvrages d'enseignement que dans les ouvrages de popularisation. Les descriptions techniques de procédés industriels sont plus abondantes dans le *Cours de chimie élémentaire et industrielle destiné aux gens du monde*, de Payen, ou dans les *Leçons de chimie élémentaire faites le dimanche à l'école municipale de Rouen*, de J. Girardin⁴⁰.

L'invasion de la chimie académique dans tous les domaines de la formation se traduit dans la carrière des chimistes par le cumul des fonctions ; pratique favorisée à Paris par la forte concentration d'écoles et d'instituts, et par la pauvreté des revenus des enseignants. Il n'est pas rare qu'un chimiste cumule trois ou quatre charges d'enseignement auxquelles s'ajoutent des postes dans l'industrie. Or dans la rhétorique des éloges académiques, ces savants cumulards sont dépeints comme chevaliers de la vérité méprisant honneurs et richesses. Plus les savants se répandent dans l'industrie, l'agriculture ou la politique, plus les éloges académiques exaltent une image bucolique du savant : personnage austère, humble, frugal, sans ambition⁴¹. Ainsi une nuance morale de pureté au sens de désintéressement se trouve-t-elle associée à la promotion de la chimie pure au XIX^e siècle.

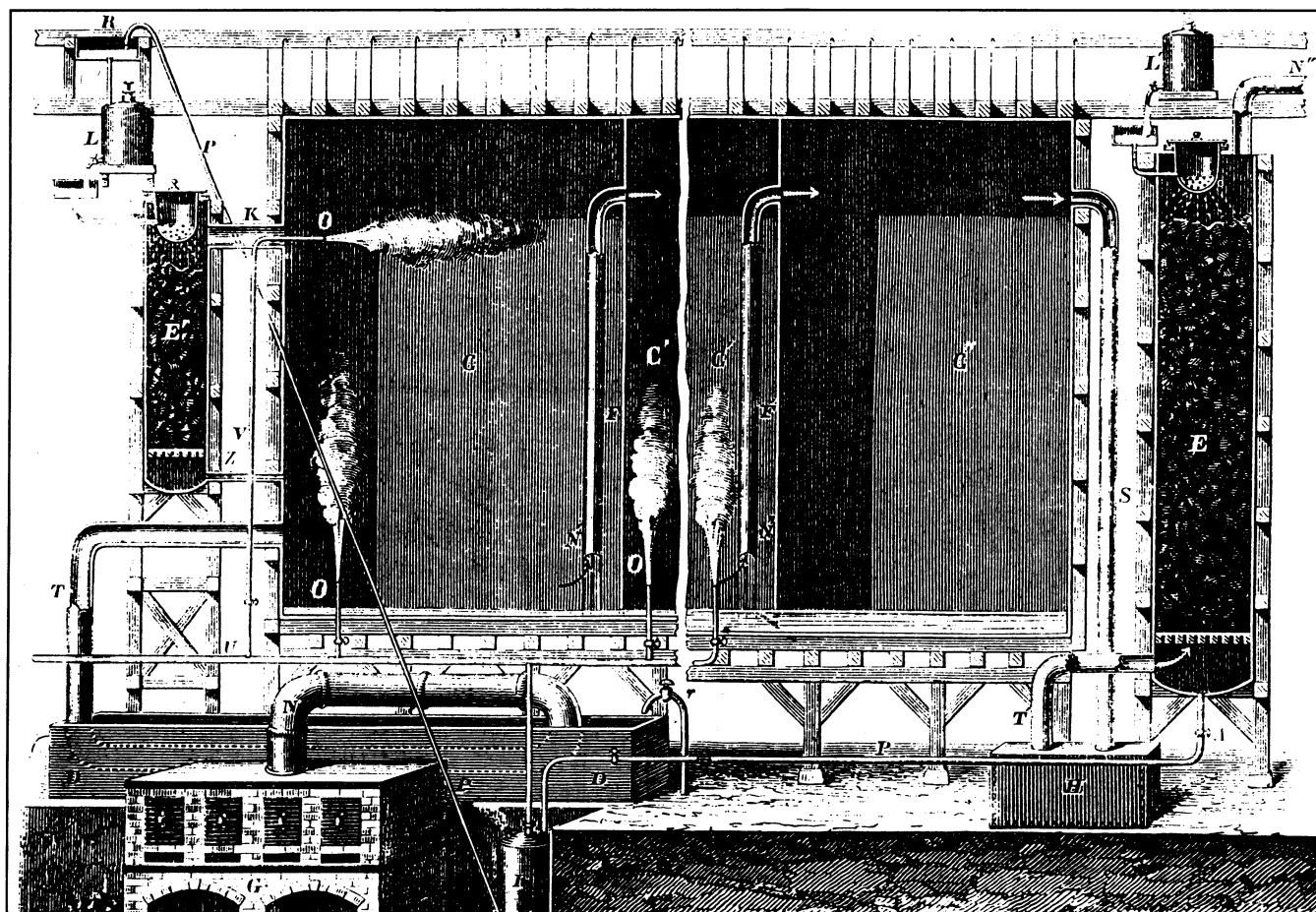
Au laboratoire comme à l'usine, des protocoles

Est-ce à dire que les concepts de chimies pure et appliquée sont une simple fiction pédagogique forgée pour servir une stratégie professionnelle ? Plus qu'un enjeu social ou un fétiche académique, la distinction semble correspondre à une évolution réelle des contenus cognitifs. Les chimistes professeurs ne se contentent pas d'exploiter l'utilité des arts chimiques pour promouvoir leur discipline, obtenir des chaires et des crédits. La perspective des applications oriente leurs recherches et leur enseignement vers l'acquisition de techniques d'analyse et de purification répondant à la demande industrielle – voire la devançant. A cet égard, les chimistes français semblent ouvrir la voie.

La carrière de Gay-Lussac illustre de manière exemplaire la transformation profonde de la théorie chimique induite par une liaison permanente entre des activités enseignantes et industrielles⁴². Il est professeur à la faculté des Sciences, à l'École polytechnique, membre de l'Académie des sciences, du Bureau consultatif des Arts et Métiers, directeur des *Annales de chimie et de physique*, puis professeur au Museum ; il occupe aussi de multiples fonctions dans l'industrie, au Bureau consultatif des Poudres et Salpêtres, au Bureau de garantie de la Monnaie, et surtout à Saint-Gobain où il devient président du conseil d'administration en 1839. Gay-Lussac se fait connaître aussi bien par des résultats fondamentaux comme la fameuse loi sur les volumes gazeux ou les études sur l'iode et le cyanogène que par des *Instructions* pour les praticiens. Cette double activité détermine un style de chimie. Dans la science pure, Gay-Lussac est avant tout un expérimentateur qui se tient à l'écart des discussions théoriques. Son travail essentiel consiste à perfectionner l'art de l'analyse en mettant au point de nouvelles méthodes quantitatives précises – la volumétrie, et surtout la titrimétrie qu'il applique à divers domaines tels que l'évaluation de l'argent, l'alcalimétrie, la sulfurométrie, la chlorométrie – essentielles pour l'industrie. Pure ou appliquée, la chimie de Gay-Lussac est une seule et même recherche qui vise l'analyse, la mesure, les contrôles fins. Pure ou appliquée, la chimie est avant tout un art expérimental qui exige la description de protocoles détaillés et qui s'apprend par le laboratoire.

Mais la carrière de Gay-Lussac montre également que l'interaction entre chimies pure et appliquée ne suffit pas pour créer une collaboration entre science et industrie. Après avoir contribué à l'essor de Saint-Gobain par une innovation technique importante dans la production de l'acide sulfurique – la « tour de Gay-Lussac » qui permet de récupérer les gaz nitreux, pour les faire servir à une nouvelle combustion du soufre, et donc de réduire la consommation de nitrates – Gay-Lussac est nommé président du conseil d'administration de la compagnie en 1844. Ce poste suprême lui donne cependant peu de pouvoir : Gay-Lussac est obligé de céder tous les droits sur ces brevets à Saint-Gobain qui s'arroge le monopole d'exploitation en France et négocie avec l'Angleterre. En 1847, invoquant des raisons de santé, Gay-Lussac offre sa démission. La réaction de la compagnie indique le genre de service que l'industrie française attend des savants : elle offre à Gay-Lussac une bonne indemnité et un poste honorifique en déclarant : « *A nos yeux, votre nom n'est pas moins utile que votre présence à la bonne marche des affaires*⁴³. » En dépit de sa prestance et de son infatigable activité, Gay-Lussac n'a pas réussi à créer les conditions d'une coopération entre recherche et industrie.

La carrière de son collègue allemand Liebig met en lumière, par contraste, une condition essentielle d'alliance : la formation d'une école de recherche. Là où un individu – si prestigieux soit-il – peut échouer, une armée de chimistes bien formés a toutes les chances de réussir. Poursuivant l'œuvre de Gay-Lussac, Liebig a perfectionné et simplifié les méthodes d'analyse élémentaire étendues aux composés organiques, notamment aux alcaloïdes,



grâce à la mise au point d'un appareil de combustion. Tous ces efforts pour simplifier et pour raccourcir les procédures d'analyse sont aussitôt transmis dans l'enseignement au laboratoire de Giessen. La pédagogie mise en œuvre par Liebig réactualise en plein XIX^e siècle un des thèmes favoris de Venel : la nécessité d'une familiarité avec l'expérience pour faire un bon chimiste. Faire et refaire chaque jour des expériences pour acquérir la maîtrise des opérations les plus fines et reconnaître les produits. Mais, chez Liebig, la familiarité s'acquiert selon un plan pédagogique avec un entraînement intensif : à raison de huit heures de travaux pratiques par jour, les étudiants s'initient à la recherche par un programme progressif d'exercices d'analyse quantitative, qualitative, et de manipulations d'appareils. Retrouvant les vertus de la relation maître-apprenti, Liebig se trouve constamment parmi ses élèves, menant ses propres recherches et confiant des travaux aux étudiants les plus avancés. Ainsi, des analyses délicates, jusque-là réservées à des expérimentateurs chevronnés, deviennent une routine. Les étudiants de Giessen – venus parfois d'Angleterre ou des États-unis – forment une pépinière de chimistes compétents aussi bien pour des recherches académiques que pour l'industrie. C'est ainsi que la chimie universitaire offre à l'industrie allemande un potentiel de main d'œuvre qualifiée qui précède en quelque sorte la demande ⁴⁴.

Coupe des trois chambres de plomb de la colonne de Gay-Lussac et de la dénitrante. Extrait des Merveilles de l'industrie de L. Figuier, Furne et Jouvett édit., Paris, 1873-1877, vol.1.

- G. Fourneau à soufre et à nitre.
- N. Tube conduisant les gaz sulfureux et hypoazotique dans le réfrigérant.
- DD. Réfrigérant.
- T. Tube amenant les gaz sulfureux et hypoazotique dans la première chambre.
- C. Première chambre ou premier tambour.
- C'. Deuxième chambre.
- C''. Troisième chambre.
- N' F, N'F. Tubes de plomb faisant communiquer entre elles les chambre de plomb.
- S. Tube conduisant les gaz de la troisième chambre dans le réservoir condensateur H.
- H. Réservoir condensateur.
- T. Tube conduisant le gaz du réservoir condensateur dans la colonne de Gay-Lussac.
- r. Robinet alimentant d'eau courante le réfrigérant D.
- E. Colonne de Gay-Lussac.
- L. Vase de Mariotte déversant de l'acide sulfurique faible dans la colonne de Gay-Lussac.
- N''. Tube évacuant dans la cheminée de l'usine l'air et gaz résidus de l'opération.
- APD. Tube amenant l'acide sulfurique chargé de gaz nitreux dans le monte-acide.
- I. Monte-acide agissant par la pression de la vapeur venant du tube U.
- PPR. Tube amenant l'acide du monte-acide dans le réservoir R, d'où l'acide coule dans la colonne dénitrante E', au moyen du vase de Mariotte L.
- E'. Colonne dénitrante.
- K. Entrée des vapeurs nitreuses provenant de la colonne dénitrante dans la première chambre C.
- Z. Retour de l'acide sulfurique débarrassé des vapeurs nitreuses dans la première chambre C.
- O, O. Jets de vapeur dans les chambres.



Un public pour la chimie appliquée

L'œuvre de Liebig met en relief un autre contraste entre Allemagne et France sur la destination de la chimie appliquée. Au début des années 1840, Liebig publie successivement deux ouvrages de chimie appliquée, traduits en plusieurs langues et très populaires⁴⁵. Pendant ce temps-là, J.B. Dumas publie un *Traité de chimie appliquée aux arts*, en huit gros volumes et un petit *Essai de statique chimique des êtres organisés*⁴⁶. Le traité, issu d'un cours à l'Athénée, expose d'une manière théorique l'ensemble de la chimie. Malgré un timide effort d'adaptation au niveau du plan, qui montre un compromis entre une classification des substances chimiques et un regroupement par familles d'industries, c'est de la chimie générale. Pour justifier cette orientation très académique, Dumas fabrique le public-cible de sa chimie appliquée en prenant position dans le débat de politique scolaire sur la part des sciences et des humanités classiques :

« Beaucoup de personnes trouveront que j'ai donné trop de détails de chimie pure, que j'ai eu tort de traiter les questions d'art d'une manière théorique, enfin que j'aurais dû éviter l'emploi des atomes. A tout cela je répondrai que ce livre s'adresse aux jeunes gens et non point aux fabricants déjà formés ; que mon intention n'a pas été de décrire la pratique des arts, mais bien d'en éclairer la théorie, et que ces détails scientifiques qui effarouchent les fabricants d'un certain âge ne seront qu'un jeu pour leurs enfants, quand ils auront appris dans leurs collèges un peu plus de mathématiques et un peu moins de latin, un peu plus de

physique ou de chimie et un peu moins de grec. » (p. viii).

L'*Essai de statique chimique des êtres organisés*, fruit d'une collaboration avec Boussaingault, est le résumé d'un cours professé à l'école de médecine. Il aborde des problèmes vitaux pour l'agriculture – tels que la fixation des éléments minéraux par les plantes – dans le cadre d'une réflexion théorique sur les échanges entre le minéral et le vivant. Adoptant le style emphatique des leçons universitaires du XIX^e siècle, Dumas donne libre cours à son art des belles formules et développe une vision très poétique du cycle des éléments entre les règnes minéral, végétal et animal. Quant aux données quantitatives résultant d'expériences analytiques qui peuvent constituer une source d'informations pour le lecteur confronté à des problèmes agricoles, elles sont regroupées sous forme de documents annexes.

Tout autre est l'approche des mêmes problèmes par Liebig dans sa *Chimie appliquée à la physiologie végétale et à l'agriculture*. Contrairement à Dumas, il fait de réels efforts d'adaptation à un public agricole. Tout en adoptant un plan induit par la question théorique générale des rapports entre le minéral et le vivant, Liebig aborde des problèmes très pratiques sur les rôles respectifs de l'humus et des minéraux pour favoriser la culture, et il s'intéresse tout particulièrement à la fixation de l'azote par les plantes. Son hypothèse – que la source de l'azote consommé par

Vue d'ensemble d'un laboratoire à l'école de physique et de chimie industrielle de la Ville de Paris, fondée en 1882. Extrait de la Nature, 10 mai 1884.

les plantes est l'air atmosphérique – est très vite démentie. Mais cela ne nuit pas à la popularité de l'ouvrage. Peu importe, en fait, la thèse que soutient Liebig ! Son succès tient moins à ce qu'il démontre qu'à la manière dont il le démontre. Sur chaque question abordée, il produit une série d'analyses systématiques – d'eaux de pluie, de sols, d'urines et d'excréments de bovins, de chevaux, d'hommes... A la fin de chaque démonstration, il donne des conseils pratiques aux agriculteurs. Il les présente clairement, en italiques, et les énonce parfois comme de véritables préceptes : « *Dans l'agriculture, le principe fondamental, c'est de rendre toujours à la terre, en pleine mesure, n'importe sous quelle forme, tout ce qu'on lui enlève par les récoltes et de se régler en cela sur les besoins de chaque espèce de plante en particulier* » (p. 264).

A chaque occasion, Liebig place un couplet sur les relations entre science et arts, scandant un invariable message : agriculteurs, vous ne pouvez vous passer des services d'un laboratoire de chimie. Fustigeant la folie des fermiers non avertis, Liebig prêche une nouvelle éthique agricole : « *Beaucoup de nos agronomes ressemblent aux anciens alchimistes ; car comme ceux-ci, ils cherchent la pierre philosophale, la semence merveilleuse qui puisse centupler les récoltes sans que le sol, à peine assez riche pour les plantes qu'ils y cultivent, reçoive d'autres substances nutritives. De véritables principes scientifiques les préserveraient sans doute de ces idées superstitieuses* » (pp. 233-234). Le savoir du chimiste répond à toutes les questions que pose la culture des plantes. Il donne la sagesse à l'agriculteur.

En fait, l'apport effectif de Liebig consiste surtout à expliquer – éventuellement corriger – des pratiques ancestrales de labourage, de jachère, d'assolement, de fumure, plâtrage, etc. Liebig sait bien que tant qu'elle ne produit pas d'engrais artificiels, la chimie n'a rien d'autre à offrir qu'un principe de conservation de la matière qui prescrit d'apporter à la terre toutes les substances nutritives qu'on lui enlève sous diverses formes. Mais, justement, Liebig utilise ce principe pour convaincre l'agriculteur qu'il a besoin d'analyses chimiques. C'est la technique d'analyse qui, selon Liebig, définit l'expertise du chimiste professionnel en matière d'agronomie, qui lui permet de ne pas s'en tenir, comme Dumas, aux formules générales, mais de donner une formule d'engrais adaptée à chaque situation particulière, à chaque terroir. Aussi Liebig peut-il transférer sur le chimiste de laboratoire la maîtrise du local, la connaissance du paysage qui, pour Chaptal, marquait la supériorité de l'homme de terrain⁴⁷.

Alors que pour Dumas la chimie appliquée reste un discours universitaire avec d'infimes concessions à un public plus large, Liebig fait de la chimie appliquée une œuvre de propagande pour la chimie professionnelle. Son attitude ressemble à celle de Pasteur créant le besoin d'un laboratoire de microbiologie dans les pratiques agricoles, industrielles et médicales⁴⁸.

Ouvertures sur le XX^e siècle

Que ces conceptions divergentes de la chimie appliquée aient eu des conséquences importantes sur les

industries allemande et française, c'est une question qui déborde les limites de cet article. Signalons seulement que dans la deuxième moitié du XIX^e siècle plusieurs villes françaises – Lille, Nancy, Mulhouse, Lyon – ouvrent des instituts de chimie destinés à former de véritables praticiens répondant à la demande des industries locales. La nécessité de dépasser la chimie appliquée « à la Dumas » au profit de la chimie industrielle est enfin clairement exprimée lors de la création de l'école municipale de Physique et de Chimie industrielle de la ville de Paris en 1882, et de l'ouverture en 1896 d'un laboratoire de chimie industrielle à la faculté des Sciences de Paris⁴⁹. Les mesures sont fructueuses puisque les publications françaises de chimie appliquée progressent de 600% et conquièrent droit de cité dans les vénérables *Annales de chimie et de physique*⁵⁰.

Mais quand, dans les années 1920, la France dispose enfin d'un potentiel de chimistes dans l'industrie, l'Union nationale de chimie lance un cri d'alarme, parce qu'elle craint que cette prolifération de chimistes praticiens ne discrédite l'image sociale de la chimie. Et l'on perçoit, au lendemain de la Première Guerre mondiale, les échos du débat mené au siècle des lumières, dans l'*Histoire de l'enseignement de la chimie en France*. Cet ouvrage de commande vise ouvertement à influencer la commission ministérielle chargée de la réforme de l'enseignement⁵¹. On propose d'éliminer les écoles médiocres, les instituts trop orientés vers la pratique professionnelle, afin de revaloriser le titre de chimiste. Et cet objectif conduit à redéfinir « à la française » les rapports entre chimie pure et appliquée : « *Il n'y a pas deux chimies. Il n'y a pas la chimie pure et la chimie appliquée. Il n'y a qu'une chimie. Les applications de la chimie sont l'extension à l'industrie des découvertes de la chimie pure. L'industrie est fille de la science* »⁵².

On voit donc que la distinction entre chimie pure et appliquée suit un parcours singulier, en France. Elle n'est pas mobilisée, comme en d'autres pays, au plus fort du combat pour la dignité encyclopédique de la chimie vers le milieu du XVIII^e siècle. C'est avec la conjonction de la révolution chimique et de la Révolution française que la distinction s'introduit en même temps qu'un nouveau langage : du savoir au pouvoir la conséquence est bonne.

Le partage de la discipline en chimie pure et appliquée correspond à une montée en puissance des professeurs, durant la première moitié du XIX^e siècle. Dans la plupart des enseignements en France, la chimie appliquée colle à la chimie pure et aux normes universitaires. Elle ne forme pas un nouveau savoir, pas même un nouveau public. Il y a une chimie que tous, savants, industriels et agriculteurs, doivent apprendre.

Cette indifférenciation entre chimie pure et chimie appliquée recouvre, en fait, une certaine indifférence aux contraintes techniques. La formule rhétorique si fréquente – que l'industrie est fille de la science – laisse entendre que la science, dans son mouvement propre, engendre naturellement, par surcroît, des progrès techniques. Or cette vision unilatérale peut produire un effet paradoxal de stérilisation, en bloquant l'avance de la science et de la technique. Par contraste, une différenciation nette entre les deux domaines pur et appliqué, comme chez Liebig par

exemple, semble plus favorable à une réelle interaction, à la formation de logiques communes de contrôle, standardisation, purification, rendement... qui suscitent des nouveaux concepts théoriques aussi bien que des innovations techniques.

Notes

1. Kant, *Premiers Principes métaphysiques de la Science de la Nature*, 1786, trad. J. Gibelin, Paris, Vrin, 1971, p.9 : « Aproprement parler, on ne peut appeler science que celle dont la certitude est apodictique ; une connaissance qui n'offre qu'une certitude empirique, n'est appelée qu'improprement savoir. La totalité de la connaissance qui est systématique peut déjà, pour cette raison, être appelée science et même science rationnelle si la liaison de la connaissance dans ce système constitue un enchaînement de raisons et de conséquences. Mais si finalement ces raisons ou ces principes sont, comme dans la chimie par exemple, simplement empiriques et si les lois, en vertu desquelles on explique par raison les faits donnés, ne sont que des lois d'expérience, ils ne comportent pas dans ce cas la conscience de leur nécessité (et ne sont pas certains apodictiquement) et au sens strict la totalité ne mérite pas le nom de science ; c'est pourquoi la chimie devrait s'appeler art systématique plutôt que science. »

2. E. Kant, *Doctrine du Droit*, 1797, trad. A. Philonenko, Paris, Vrin, 1979, pp. 81 et 89.

3. A. Comte, *Cours de philosophie positive*, 1830-42, Leçon 2, Paris, Hermann, 1975, pp. 45 à 48. « L'intelligence humaine, réduite à ne s'occuper que de recherches d'une utilité pratique immédiate, se trouverait [...] tout à fait arrêtée dans ses progrès, même à l'égard de ces applications auxquelles on aurait imprudemment sacrifié les travaux purement spéculatifs ; car les applications les plus importantes dérivent constamment des théories formées dans une simple intention scientifique, et qui ont été cultivées pendant plusieurs siècles sans produire aucun résultat pratique », p.46.

4. C. Meinel, « Theory or Practice ? The Eighteenth-Century Debate on the scientific status of chemistry », *Ambix*, 1983, 121-132, note 36, page 131 ; voir aussi « Reine und angewandte Chemie, Die Entstehung einer neuen Wissenschaftskonzeption in der Chemie der Aufklärung », *Berichte zur Wissenschaftsgeschichte*, 8, 1985, pp.25-45. Sur les concepts chimiques au début du XVIII^e siècle, voir Pierre Duhem, *le Mixte et la combinaison chimique*, Paris, 1902 ; réédition Fayard, 1985.

5. Johann Gottschalk Wallerius, *Bref om Chemiens rätta Beskaffenhet, Nyttan och Wärde*, Stockholm, Uppsala, 1751 ; cité par Meinel, *Ambix*, 1983, p.126.

6. C. Chaptal, *Chimie appliquée aux arts*, Paris, 1807, 4 vol. Meinel situe dans l'*Esquisse d'un tableau historique des progrès de l'esprit humain* de Condorcet la première occurrence en langue française de l'expression science appliquée, en s'appuyant sur le passage suivant de Condorcet : « Il s'agit d'appliquer ces vérités à la pratique, et de déduire de la science l'art qui en doit être le résultat utile. » Mais ce texte ne contient pas encore le couple d'adjectifs « pur » et « appliqué », *Berichte zur Wissenschaftsgeschichte*, p. 35.

7. Voir Hélène Metzger, « Introduction à l'étude du rôle de Lavoisier dans l'histoire de la chimie », *Archeion*, 14, 1932, pp.21-50 ; B. Bensaude-Vincent, « A founder myth in the History of Science ? The Lavoisier case », in L. Graham, W. Lepenies, P. Weingart (eds), *Functions and Uses of Disciplinary History*, Reidel, Dordrecht, Boston, 1983, pp. 53-78 ; H.G. Schneider, « The Fatherland of chemistry : early nationalistic currents in late eighteenth century German Chemistry », *Ambix*, 36, 1989, pp.14-21.

8. Le procédé peut être schématisé en trois phases : 1) traitement du sel marin avec de l'acide sulfurique ; 2) calcination du mélange de sulfate de sodium finement broyé avec du charbon de bois et du calcaire dans des proportions de 1 ; 1 ; 1/2 pour obtenir une masse de « soude brute » ; 3) filtrage, lessivage, évaporation, cristallisation pour obtenir, suivant la nature de l'opération du sel de soude, du sel noir, des cristaux de soude, ou de la soude caustique.

9. Dumas propose une première interprétation en 1830 qui postule la formation d'un oxy-sulfure de calcium. Unger suggère en 1847 que la vapeur d'eau joue un rôle déterminant. Ce que conteste Scheurer-Kestner, tandis que Kynaston et Gossage critiquent aussi la théorie de l'oxy-sulfure.

10. Lavoisier finançait ses recherches grâce à ses revenus personnels de fermier général, et Leblanc grâce au patronage d'un aristocrate, le duc d'Orléans.

11. H. Metzger, *les Doctrines chimiques en France du début du XVII^e à la fin du XVIII^e siècle*, Paris, 1923, réimprimé 1969, Blanchard ; *Newton, Stahl, Boerhave et la doctrine chimique*, Paris, Alcan, 1930, réimprimé Blanchard, 1974. *La Philosophie de la matière chez Lavoisier*, Paris, Hermann, 1935 ; J.B. Gough, *Lavoisier and the Fulfillment of the Stahlian Revolution*, Osiris, 2nd Series, 1988, 4, pp. 15-34.

12. A. Anastasi, *Nicolas Leblanc, sa vie*, Paris, Hachette, 1884 ; J.B. Dumas, « Éloge de Nicolas Leblanc », in R. Jagnaux, *Histoire de la chimie*, T.2, Paris, 1891, pp. 102-110. P. Baud, *l'Industrie chimique en France*, Paris, Masson, 1932.

13. T.M Porter, « The Promotion of mining and the advancement of science : The Chemical Revolution of mineralogy », *Annals of Science*, 38, 1981, pp. 543-570. Anders Lundgren, « The Changing role of numbers in eighteenth century chemistry », in T. Frangsmyr, J.L. Heilbron, Robin Rider (eds), *The Quantifying Spirit in the Eighteenth Century*, California University Press, 1990, pp. 245-266.

14. Henry Guerlac, « Some French Antecedents of the chemical revolution », *Chymia*, 5, 1959, pp. 73-113.

15. P.J. Macquer, *Elémens de chymie théorique*, Paris, 1749 ; *Elémens de Chymie pratique, contenant la description des opérations fondamentales de la Chymie*, Paris, 1751, 2 vol. ; voir aussi Meinel, *Ambix*, 1983, p. 122.

16. D. Todericiu, *Constitution de la chimie des colorants en France ; le rôle exemplaire de la Société industrielle de Mulhouse*, thèse de doctorat d'État, Paris, 1985.

17. P.J. Macquer, *Prospectus et plan d'une description générale de l'art de la teinture*, Paris, 1782, et *Dictionnaire de Chymie*, Paris, Lacombe, 1766, 2^e édition, 1778.

18. C.L. Berthollet, *éléments de l'art de la teinture*, Paris, 1791 ; 2^e édition, 1804 ; rapport de Lavoisier, in *Œuvres*, T. IV, p.545. Voir aussi, Michelle Sadoun-Goupil, *Le Chimiste Claude Louis Berthollet 1748-1822*, Paris, Vrin, 1977 ; pp. 139-143.

19. G. Venel, article « Chymie », *Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*, Paris, 1^{re} édition, T. 3, 1753 ; reprint Stuttgart, 1966, pp. 408-437. Voir aussi J.C. Guédon, *Chimie et matérialisme : la stratégie anti-newtonienne de Diderot, dix-huitième siècle*, 11, 1979, pp.185-200 ; Isabelle Stengers et Judith Schlanger, *Les Concepts scientifiques*, Paris, éd. la Découverte, 1989, pp.24-40.

20. A. F. de Fourcroy, *Système des connaissances chimiques*, Paris, 10 vol., 1800, T.1, p. xxj.

21. C.G. Gillispie, « The Encyclopédie and the Jacobin Philosophy of Science : A study in Ideas and Consequences », in Marshall Clagett (ed) *Critical Problems in the History of Science*, The University of Wisconsin Press, Madison, 1959.

22. Guyton de Morveau, Lavoisier, Berthollet, Fourcroy, *Méthode de nomenclature*, Paris, 1787, in Lavoisier, *Œuvres*, T.V, Paris, Imprimerie Nationale, 1892, p.350. Voir M.P. Crosland, *Historical Studies in the Language of Chemistry*, Dover Public. New York, 1962, 2nd ed. 1978. F. Dagognet, *Tableaux et Langages de la chimie*, Paris, Vrin, 1969.

23. L.-B. Guyton de Morveau, *Mémoire sur les dénominations chimiques, la nécessité d'en perfectionner le système, les règles pour y parvenir, suivi d'un tableau d'une nomenclature chimique*, Dijon, 1782. Voir B. Bensaude-Vincent, « A propos de Méthode de nomenclature chimique », *Cahiers d'histoire et de philosophie des sciences*, n°6, 1983, pp. 1-36.

24. Lavoisier, in « Méthode de nomenclature », p.6.

25. Lavoisier, *Traité élémentaire de chimie*, 1789, in *Œuvres*, T.1,

1862, pp. 136-137.

26. Dossier Lavoisier, Carton 1259, Archives de l'Académie des sciences de Paris. Voir aussi M. Daumas, *Lavoisier théoricien et expérimentateur*, Paris, 1955 ; E. Mc Donald, « The Collaboration of Bucquet and Lavoisier », *Ambix*, 13, 1966, pp.74-83 ; C.E. Perrin, « The Lavoisier-Bucquet collaboration : a conjecture », *Ambix*, 36, 1989, pp. 5-13.

27. Deux projets manuscrits, datés de décembre 1792, se trouvent dans le dossier Lavoisier, Carton 1260, archives de l'Académie des sciences.

28. Lavoisier, *Réflexions sur l'instruction publique présentées à la Convention nationale par le Bureau de Consultation des arts et métiers, suivies d'un projet de décret*, Août 1793, in *Œuvres*, T.IV, pp.516-540.

29. Lavoisier, *Sur la manière d'enseigner la chimie*, manuscrit sans date, archives de l'Académie des sciences, Carton 1259 ; mémoire transcrit in B. Bensaude-Vincent, « A view of the Chemical Revolution through contemporary textbooks : Lavoisier, Fourcroy and Chaptal », in *British Journal for the History of Science*, décembre 1990.

30. Lavoisier, *Réflexions sur l'instruction publique présentées à la Convention nationale par le Bureau de Consultation des arts et métiers, suivies d'un projet de décret*, Août 1793, in *Œuvres*, T.IV, pp.516-540.

31. Lavoisier, *Observations sur l'Académie des sciences*, *Œuvres*, IV, p. 617.

32. C. Chaptal, *Chimie appliquée aux Arts*, Paris, 1807, 4 vol.

33. R.S Turner, « The Growth of Professorial research in Prussia, 1818 to 1848, Causes and Context », *Historical Studies in the Physical Sciences*, 3, 1971, pp.137-182. K. Hufbauer, *The formation of the German chemical Community*, Berkeley, 1982.

34. R.S Turner, « Justus Liebig versus Prussian Chemistry. Reflections on early Institute-building in Germany », *Historical Studies in the Physical Sciences*, 13, 1982, pp. 129-162; J.B. Morrell, « The Chemist breeders : The Research Schools of Liebig and Thomas Thomson », *Ambix*, 19, 1972, pp. 1-46.

35. J. Liebig, *Lord Bacon*, Paris, sans date, p.119.

36. Meinel, *Berichte zur Wissenschaftsgeschichte*, 8, 1985, pp. 40-42.

37. D.S.L Cardwell, *The Organisation of Science in England*, London, Heineman Educational Book, 2nd ed. 1972 ; voir aussi Morell op. cit (31).

38. R.F. Bud, G.K. Roberts, *Science versus Practice, Chemistry in Victorian Britain*, Manchester University Press, 1984, p. 16.

39. R. Fox and G. Weisz, *The Organisation of Science and Technology in France, 1800-1914*, Cambridge University Press, 1980. Voir T. Shinn, « The French Science Faculty System, 1808-1914: Institutional Change and Research Potential in Mathematics and the Physical Sciences », *Historical Studies in the Physical Sciences*, 10, 1979, pp. 271-333.

40. Voir R. Christophe, *Guide des sources concernant la formation des ouvriers des métiers et industries chimiques (1750-1870)*, Chambre Syndicale des Industries chimiques d'Ile-de France et CRHST de la Cité des Sciences et de l'Industrie, 1989. Payen, *Cours de chimie élémentaire et industrielle destiné aux gens du monde*, Paris, 1832-33, 2 vol. En 1849 Payen publie également un *Précis de chimie industrielle*, Paris, Hachette, réédité jusqu'en 1877. Les *Leçons* de J. Girardin, publiées en 1835, sont aussi rééditées sept fois jusqu'en 1877, et, à partir de la troisième édition, le titre devient *Leçons élémentaires de chimie appliquée aux arts industriels*.

41. Voir Dorinda Outram « The language of power : the Eloges of Georges Cuvier and the public language of the nineteenth century science », *History of Science*, 14, 1976, pp. 153-187 ; C.B. Paul, *Science and Immortality : the Eloges of the Paris Academy of Science (1699-1791)*, California University Press.

42. M.P. Crosland, *Gay-Lussac, scientist and bourgeois*, Cambridge University Press, 1978 ; voir aussi *Actes du Colloque Gay-Lussac*, 11-13 décembre 1978, École polytechnique, Palaiseau, 1980.

43. A. Thépot, « Gay-Lussac et la compagnie de Saint-Gobain », *Actes*

du Colloque Gay-Lussac, pp. 241-253.

44. J.B. Morell, *Ambix*, 19, 1972, pp. 1-46 et R.S. Turner, *Historical Studies in the Physical Sciences*, 13, 1982, pp. 129-162.

45. J. Liebig, *Chimie appliquée à la physiologie végétale et à l'agriculture*, trad. Charles Gerhardt, 1840 ; 2^e éd. 1844. L'édition allemande, *Die Organische Chemie und ihre Anwendung auf Agricultur und Physiologie*, Brunswick 1840, est rééditée neuf fois jusqu'en 1876. On compte en outre quatre éditions anglaises ; *Chimie appliquée à la physiologie animale et à la pathologie*, trad. Gerhardt, Paris 1842. Voir M. Rossiter, *The Emergence of agricultural Science : Justus Liebig and the Americans, 1840-1880*, Yale University Press, 1975.

46. J.B. Dumas, *Traité de chimie appliquée aux arts*, Paris, 8 vol. et atlas, 1828-1846 ; *Essai de statique chimique des êtres organisés*, Paris, 1842, reprint Bruxelles, Culture et civilisation, 1972.

47. « Lorsque l'agriculteur, sans se diriger par de véritables principes scientifiques, se livre à des expériences pour rendre ses terres propices à une plante qu'elle ne porte pas autrement, il n'a qu'une faible chance de succès. Des milliers d'agriculteurs font de semblables essais dans tous les sens ; ils finissent par un certain nombre d'expériences pratiques qui, réunies, forment une méthode de culture par laquelle, il est vrai, on atteint quelquefois, pour une seule localité, le but proposé ; mais cette méthode fait déjà défaut au plus proche voisin et ne présente aucun avantage pour d'autres contrées. Quelle quantité prodigieuse de temps et d'argent se perd ainsi, si l'on néglige de suivre la voie prescrite par la science ! » (p. 182). Malgré ses principes scientifiques, Liebig a essayé un échec cuisant dans ses essais d'agriculture expérimentale en Angleterre. Mais on peut toujours incriminer la pluie, le vent, la sécheresse. Les chimistes qui contrôlent les réactions dans l'univers aseptisé du laboratoire auront toujours raison, en rejetant la faute sur les mauvaises conditions atmosphériques. L'air, la terre, la nature sont des laboratoires chimiques à grande échelle que perturbent de temps en temps les météores. C'est à ce prix que l'on peut traiter l'agriculture comme simple application d'un savoir venu d'ailleurs.

48. Voir B. Latour, *les Microbes, guerre et paix*, Paris, A. Métaillé 1984. Dans *la Chimie appliquée à la physiologie animale et à la pathologie*, Liebig soutient des positions radicales. Il traite la physiologie de science décadente qui ne trouvera son salut que par la chimie et ses laboratoires (T.1, p. lxxxij). Il reconnaît cependant qu'à l'heure actuelle la chimie n'a pas beaucoup d'applications directes et son pouvoir d'explication est encore limité.

49. T. Shinn, « Des corps de l'État au secteur industriel: genèse de la profession d'ingénieur, 1750-1920 », *Revue française de sociologie*, 19, 1979, pp. 39-71 ; « Des sciences industrielles aux sciences fondamentales, la mutation de l'École supérieure de physique et de chimie », *Revue Française de Sociologie*, 22, 1981, pp. 167-182. A. Grelon, « les Universités et la formation des ingénieurs en France (1870-1914) », *Formation-Emploi*, n° 27-28, pp. 65-88.

50. T. Shinn, *Historical Studies in the Physical Sciences*, 10, 1979, p. 329.

51. René Sordes, *Histoire de l'enseignement de la chimie en France*, Paris, 1928 ; préface de Georges Urbain.

52. Rapport Marquis au congrès de L'Union nationale de chimie, 28 mai 1920, cité par R. Sordes, *Histoire de l'enseignement de la chimie en France*, pp. 169-170.



Le doyen des Étudiants de France :

E. Chevreul

Des produits chimiques très recherchés : les acides gras pour la fabrication des bougies

La naissance de la lipochimie industrielle au cours du XIX^e siècle

Gérard Emptoz

O bjet à la fois familier, simple d'emploi et accessible à tous, la bougie est toujours présente dans notre monde contemporain. Réservee surtout à la célébration des anniversaires, à la décoration de nos maisons ou encore aux cultes, elle peut aussi servir d'éclairage de secours en cas de panne d'électricité. Alors, dans cette situation particulière, elle apparaît comme une sorte de retour sur une longue histoire, celle de l'éclairage domestique. Là, sous la dénomination de bougie stéarique, elle a joué un rôle remarquable. Issue de l'industrie des corps gras, cette bougie a nécessité la mise en œuvre de produits chimiques qui ont attiré toute l'attention des chercheurs et des industriels de la chimie au cours de l'époque concernée. C'est donc une étape particulière de l'histoire des produits chimiques qui sera évoquée ici.

Fabriquée à partir des composés de la famille chimique des acides gras ¹, dont l'acide stéarique est l'un des représentants les plus connus ², la bougie est apparue dans la première moitié du siècle dernier, et son succès a été très grand. Les événements qui marquent cette histoire quelque peu oubliée de nos jours montrent que, pour le domaine des objets à usage domestique, la bougie stéarique constitue un cas intéressant d'invention-innovation.

*Michel Eugène Chevreul (1786-1889).
Extrait de la Nature, 28 août 1886.*

LA FONDATION DE LA CHIMIE DES CORPS GRAS PAR M.-E.CHEVREUL

L'invention de la bougie stéarique est issue de recherches purement scientifiques. De ceux qui ont participé à ces travaux, le véritable fondateur de la chimie des corps gras, à partir de laquelle l'invention a été rendue possible, est Michel-Eugène Chevreul (1786-1889). Scientifique de premier rang dans l'histoire de la chimie française au siècle dernier, passionné pour les problèmes de son temps, autorité incontestée dans son domaine, Chevreul est toujours considéré comme le père fondateur de la lipochimie contemporaine³.

Une recherche sur la composition des graisses

Il convient ici de rappeler brièvement comment Chevreul a découvert les acides gras et leur nature. A l'époque où il a entrepris ses recherches, en 1811, on ne savait pas grand-chose sur ces produits naturels extraits depuis des siècles de nombreuses espèces animales et végétales, et qui avaient de multiples emplois, dont la fabrication des savons. C'est justement à partir d'un savon de potassium issu d'une graisse de porc que Chevreul réussit pour la première fois à obtenir, après une séparation très soignée, deux composés. Ces deux sels, traités par un acide, donnaient naissance à deux composés organiques. Chevreul nomma le solide « margarine », qu'il renomma ensuite acide « margarique », et le liquide « oléine », qu'il renomma acide « oléique »⁴. Ces premiers résultats, publiés en 1813, entamaient une série de recherches systématiques, poursuivies jusqu'en 1823, qui amenèrent Chevreul à découvrir que toutes les graisses animales étaient composées en quantités variables de trois acides gras : stéarique, « margarique » et oléique. Le résultat de ces travaux est la naissance d'un pan entier de la chimie organique.

L'analyse chimique était encore très limitée. Pour celle des composés organiques, elle venait d'être perfectionnée par Joseph-Louis Gay-Lussac (1778-1850) et son collègue Jacques Thénard (1777-1857), dont les travaux furent publiés en 1811 dans leur ouvrage *Recherches physico-chimiques*⁵. C'est dire combien la tâche de Chevreul était difficile, à une époque où les connaissances en chimie organique étaient extrêmement limitées.

Une recherche bien menée et très remarquable

Chevreul travaillait dans un excellent environnement scientifique, au laboratoire de chimie du Muséum d'histoire naturelle. Son directeur était Louis-Antoine Vauquelin (1763-1829), personnage de premier plan aussi bien en chimie qu'en politique. Il avait été nommé en 1804 professeur au Muséum, et Chevreul était son adjoint depuis 1810 comme aide-naturaliste⁶.

Chevreul mit au point un véritable programme de recherche sur d'autres corps gras, qui consistait à isoler les « principes immédiats », c'est-à-dire les composants de ces

mélanges naturels. La méthode passait par la préparation d'un savon, suivie d'une séparation en deux parties : l'une solide, l'autre liquide. Après décomposition acide de cette partie liquide, une distillation donnait un « volatil acide » (acide oléique pour l'essentiel) et le « principe doux de Scheele » c'est-à-dire la glycérine dont la présence va se révéler universelle dans les corps gras naturels⁷. La partie solide était traitée pour régénérer les acides gras qui étaient ensuite analysés.

Chevreul a ainsi découvert les acides stéarique, margarique⁸, oléique, butyrique, valérianique, caproïque, caprylique, l'alcool cétylique, la « cholestérine ». Il a aussi découvert que les substances d'un savon sont issues de la combinaison d'un alcali (base) avec un acide, et que tous les corps gras donnent naissance à des sels d'acides gras ou savons, et à de la glycérine. Il a pu ensuite déduire que les graisses étaient une combinaison d'acides gras et de glycérine, composés que l'on nomme des « esters » de nos jours. Ce sont des triglycérides d'acides gras.

En 1823 paraissait l'ouvrage qui rendit Chevreul célèbre dans la communauté scientifique nationale et internationale, *Recherches chimiques sur les corps gras d'origine animale*⁹, qui allait servir aux chimistes de la future industrie. Les acides gras devenaient désormais isolables, identifiables en vue d'une utilisation.

L'APPLICATION DES TRAVAUX DE CHEVREUL : L'INVENTION DE LA BOUGIE STÉARIQUE (1824)

Le chercheur est alors devenu inventeur. En effet, Chevreul a déposé le 12 juillet 1824 un brevet d'invention de quinze ans avec son illustre collègue Gay-Lussac, pour un « *Emploi dans l'éclairage des acides stéariques et margariques qu'on obtient dans la saponification des graisses, suifs, beurres et huiles*¹⁰ ».

Une concurrence scientifique stimulante

L'obtention par un moyen approprié d'un solide combustible pour fabriquer une bougie était bien un sujet de recherche. Ce brevet n'était pas le premier qui ait été déposé en ce domaine. Ainsi, en 1818, Henri Braconnot (1780-1855), professeur de botanique à Nancy, et un de ses collègues pharmacien dans cette même ville, F. Simonin, avaient pris un brevet d'invention de cinq ans pour un « *Procédé de fabrication d'une matière analogue à la cire, appelée céromimême*¹¹ ». Braconnot avait tenté de faire une séparation des composants du suif de mouton à partir d'un solvant organique, l'essence de térébenthine, mais les résultats n'avaient pu déboucher industriellement.

L'alliance de deux grands scientifiques

Le fait que Gay-Lussac ait déposé un brevet avec Chevreul mérite une remarque. Polytechnicien, devenu en 1809 professeur de chimie à l'École polytechnique, cumulant de nombreuses fonctions au service de l'État, Gay-Lussac

L'éclairage domestique dans les années 1820

Jusqu'à l'apparition de la bougie stéarique au cours des années 1830, il existait plusieurs modes d'éclairage assez variés. Une présentation très succincte permet de préciser l'état des techniques, et d'indiquer les raisons de trouver un nouveau mode d'éclairage.

L'éclairage domestique de l'époque était essentiellement fondé sur l'utilisation de combustibles liquides ou bien solides. Dans les deux cas, on faisait appel à des matières grasses et à des cires, tous produits chimiques extraits de matières naturelles.

Lampes à huile

Avec les huiles, il s'agissait d'une technique fort ancienne. Les simples modèles de lampes à huile du XIX^e siècle fonctionnaient comme leurs ancêtres multiséculaires. La matière combustible pouvait provenir de différentes espèces végétales.

Cependant, un grand progrès avait été apporté vers la fin du XVIII^e siècle. Grâce aux travaux sur la combustion réalisés par des chimistes illustres, comme Lavoisier (1743-1794) et Meusnier (1754-1793), le physicien Argand (1755-1803) avait inventé en 1781 une lampe à huile à courant d'air, à cheminée de verre et à mèche tissée en forme de cylindre. Reprise peu après par Quinquet (1745-1803), imitée et aussi perfectionnée sous diverses formes, en particulier vers 1800 par Carcel, ce type de lampe, appelé quinquet, a représenté un réel progrès. Pour la première fois, les performances de la combustion de l'huile, et donc de la luminosité, étaient améliorées.

Chandelles de suif et bougies de cire

Avec les combustibles solides, il existait deux modes d'éclairage. Le plus répandu était la chandelle, constituée d'une mèche en fil de coton enveloppée par du suif (de bœuf ou de mouton), préalablement purifiés. Pour les utilisateurs, la chandelle présentait plusieurs inconvénients. La fusibilité de la matière grasse était grande, de sorte que le ramollissement de l'objet, par exemple en été, rendait la chandelle d'un usage peu pratique. Son odeur était désagréable, et de plus il fallait couper régulièrement la mèche (moucher la chandelle) durant la combustion, sinon l'intensité lumineuse s'affaiblissait notablement.

Nettement plus pratique était l'éclairage au moyen de la bougie de cire. Objet de forme simple et pratique, dont la fusibilité était très faible, d'une odeur agréable, la bougie de cire restait cependant un produit de luxe, car la matière première, de la cire d'abeille purifiée, ou encore du blanc de baleine, coûtait cher. Ce mode d'éclairage n'était donc réservé qu'à un nombre très limité d'utilisateurs.

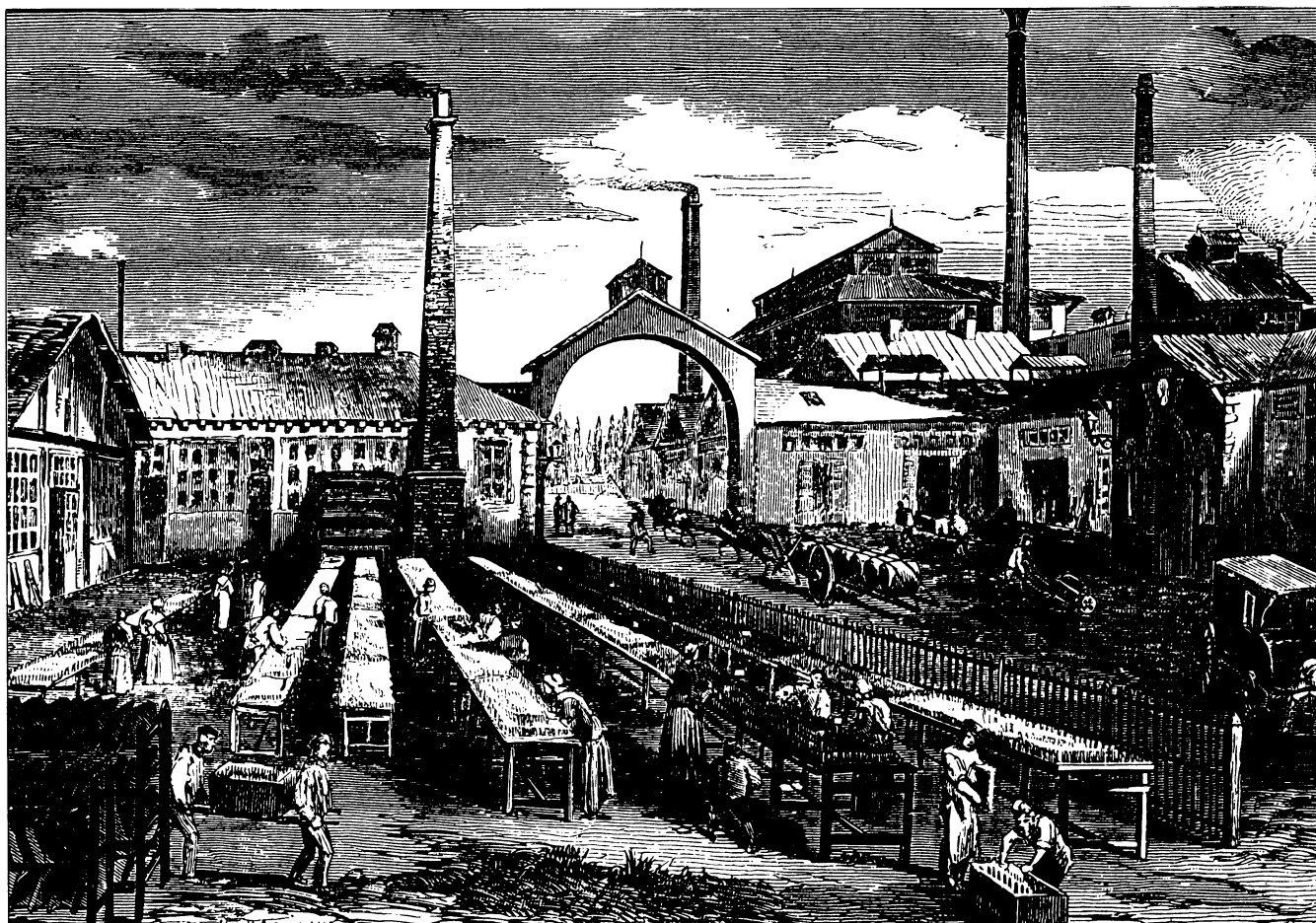
Enfin, on ne citera ici l'éclairage au gaz que pour mémoire. Encore dans l'enfance dans les années 1820, il était réservé à l'éclairage collectif. Ce n'est que bien plus tard, dans la deuxième moitié du siècle, que l'éclairage au gaz a pénétré en milieu urbain, dans les logements individuels (la fameuse mention « gaz à tous les étages », encore présente sur les façades de nos immeubles, nous rappelle toujours ce grand progrès technique).

Trouver une nouvelle solution

En somme, sur ce sujet apparemment bien modeste, celui de l'éclairage domestique, mais dont l'intérêt pratique était évident, on était loin d'avoir mis à la disposition du plus grand nombre un dispositif simple et pratique. Comme, de son côté, la chandelle était aussi considérée comme dispendieuse, la recherche d'un nouveau mode d'éclairage s'imposait. Il lui fallait allier à la fois la simplicité et la facilité d'emploi de la bougie de cire, avec la modestie du coût pour le consommateur, tout en obtenant des performances supérieures à celles de la chandelle de suif sans en avoir les inconvénients.



Cuves pour la saponification du suif par la chaux. Extrait des Merveilles de la science de L. Figuier, vol. 4, Furne et Jouvet édit., Paris, 1867-1869.



était intéressé par l'industrie. Sa participation aux activités de la Compagnie de Saint-Gobain en 1830, comme conseiller scientifique, puis comme président du conseil d'administration en 1843, en est la preuve. Son association avec Chevreul, qui était depuis 1822 examinateur de chimie à l'École polytechnique, souligne la volonté des élites scientifiques de mettre en application leurs connaissances au service du pays, dans la plus pure tradition des institutions issues de la Révolution française qui les avaient formés ¹².

Un choix raisonné pour une invention

Au lieu de fonder l'éclairage sur les graisses, Chevreul et Gay-Lussac voulaient utiliser les acides gras. Chevreul en avait isolé plusieurs, dont le point de fusion était suffisamment élevé pour qu'ils puissent être employés, en particulier l'acide stéarique, au point de fusion de 70°C, et l'acide « margarique » dont le point de fusion variait entre 51 et 60°C, suivant la nature des graisses, pour reprendre les données de Chevreul ¹³. De son côté, l'acide oléique est liquide à la température ambiante.

Il fallait donc, à partir des graisses et après transformation, isoler les acides gras recherchés, en se débarrassant de l'acide oléique.

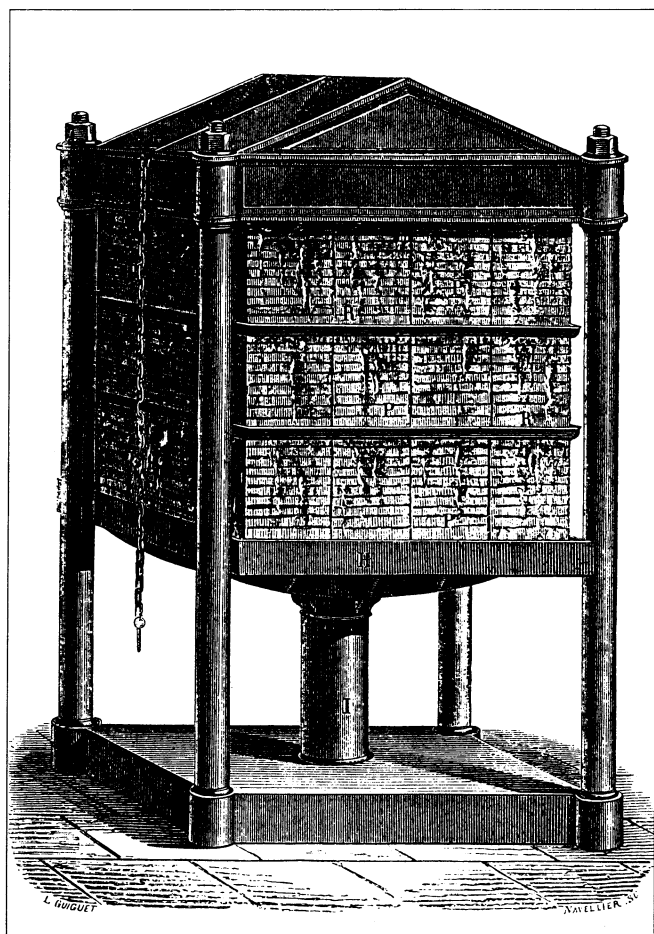
Les deux inventeurs ont proposé des méthodes qui ont été, les unes après les autres, explorées par leurs successeurs. « *Nous saponifions le corps gras que nous destinons à l'éclairage, ou que nous voulons laisser à l'état de savon, soit à la température ordinaire de l'ébullition,*

avec la pression seule de l'atmosphère, soit à une température peu élevée, avec la pression de plusieurs atmosphères », précisent-ils dans le brevet. Ils poursuivent : « *La saponification étant opérée, avec la plus petite quantité possible d'alcali, nous séparons les acides stéarique et margarique de l'acide oléique...* » Les méthodes proposées étaient, respectivement, soit la séparation de l'oléate par de l'eau puis décomposition des savons restants par l'acide chlorhydrique, soit la décomposition de tous les savons formés par le même acide, puis séparation par pression, à froid ou à chaud, de l'acide oléique, soit encore l'extraction de cet acide par l'alcool éthylique.

Faisant la preuve d'une bonne stratégie en matière de brevet, Chevreul et Gay-Lussac ont prévu de protéger toutes les méthodes qu'ils connaissaient aussi bien pour ce qu'ils appellent « saponification » que pour l'isolation des acides gras. Ils précisent en effet : « *Nous nous réservons le droit exclusif de préparer pour l'éclairage les acides gras solides et liquides, que l'on obtient en saponifiant par la potasse, la soude, et les autres bases, par les acides et par tout autre moyen, les graisses, les suifs, les beurres et les huiles.* ¹⁴ »

L'autre aspect de leur stratégie a été de déposer quelques mois plus tard en Angleterre, sur le même sujet, une patente prise le 9 juin 1825 au nom de Mosès-Poole. L'analyse ultérieure du document a permis d'attribuer ce brevet aux deux inventeurs français ¹⁵.

Vue intérieure de la première cour de l'usine des bougies de Clichy. Extrait des Grandes Usines de France de J. Turgan, tome 1, éd. A. Bourdilliat, Paris, 1860.



UNE INVENTION BIEN PRÉPARÉE MAIS ARRIVÉE TROP TÔT

La distance qui sépare l'invention de l'innovation est souvent longue ¹⁶. Dans le cas de la bougie stéarique, il a fallu compter une dizaine d'années.

Les limites de l'invention

Les procédés d'obtention des acides gras à l'échelle industrielle étaient loin d'être résolus. Réalisables au laboratoire, ils n'étaient guère praticables, aussi bien pour des raisons techniques qu'économiques, alors qu'il fallait accéder à un produit concurrentiel, donc moins onéreux que les chandelles ou que d'autres modes d'éclairage.

Par exemple, la potasse ou la soude caustique étaient encore des produits chimiques coûteux. De même, faire des extractions à l'alcool était prohibitif. Enfin, saponifier sous pression en vase clos, ou bien séparer par pressage les acides gras, représentait la mise en œuvre de techniques encore délicates ou de matériels pas encore disponibles sur le marché.

Comme l'a remarqué le chimiste belge J.-S. Stas (1813-1891), dans son rapport sur les bougies stéariques pour l'Exposition universelle de Paris en 1855, « la question de la création de l'industrie stéarique est diversement appréciée ¹⁷ ». Il ajoute plus loin : « Grand nombre de savants, très-éminents d'ailleurs, et placés dans toutes les

conditions possibles d'impartialité, regardent comme inventeurs ceux qui ont découvert un principe, un fait, soit qu'ils aient entrevu l'application, ou qu'ils en aient formulé les bases ; d'autres, au contraire, ne regardent comme inventeurs ceux qui ont réalisé matériellement cette application. » Chevreul et Gay-Lussac avaient cependant déployé bien des efforts, mais ils n'ont pas donné suite à leurs travaux ni exploité leur brevet.

Les tentatives intermédiaires d'un ingénieur

Au moment même de leur prise de brevets, un ingénieur des Ponts et Chaussées, Jules Cambacérès (1798-1853), déposait le sien pour l'« *Emploi des acides stéarique, margarique et oléique à la fabrication de bougies, appelées bougies oxigénées* ¹⁸ ». Ancien élève (entré en 1817) de l'École polytechnique, Cambacérès connaissait certainement bien Gay-Lussac et sans doute aussi Chevreul.

Sans entrer dans les détails, on indiquera seulement que Cambacérès préconisait une mèche creuse. Puis il a fait breveter d'autres modèles de mèches, et finalement a proposé la tresse, ou natte, de fils de coton, qui peut se recourber en brûlant ¹⁹. Sur cette voie qui semblait prometteuse, un frère de Cambacérès a même ouvert une entreprise à Paris, mais, faute de succès, il a dû abandonner.

L' INNOVATION : LE LANCEMENT DE LA BOUGIE STÉARIQUE PAR DE MILLY ET MOTARD

Le succès a été finalement obtenu par deux docteurs en médecine qui se sont lancés dans la chimie des corps gras à la fin des années 1820. Ils réussirent en 1831 la saponification du suif, en utilisant de la chaux en remplacement de la soude ou de la potasse. Cette date devait marquer la « véritable création de l'industrie stéarique ²⁰ ». Pour être plus exact en ce qui concerne la mise au point définitive de la bougie stéarique, c'est en 1836 que celle-ci a reçu le perfectionnement définitif qui a mis le produit véritablement au point.

Le premier procédé d'obtention des acides gras

Dans cette première étape de l'industrie des acides gras se met en place une séquence opératoire qui sera conservée durant des décennies pour la saponification basique des graisses. Elle comporte les opérations suivantes :

- *préparation d'un savon calcaire par saponification*
- La matière grasse, en principe du suif de bœuf, est

Pressage à froid des acides gras, au moyen de la presse hydraulique verticale. 1 est la tige du piston de la presse hydraulique, dont le canal et la pompe de compression sont établis dans une pièce séparée ; P,P, sont les sacs de laine contenant les acides gras, qui forment trois étages séparés par des plaques de tôle. H est la table, pourvue d'une rigole, par laquelle l'acide oléique s'écoule à mesure qu'il exsude de la matière comprimée. R,R, sont deux autres rigoles. L'acide oléique se rend, de ces rigoles, dans le bassin qui sert à le recueillir et qui est en contrebas de la pièce. Extrait des Merveilles de la science de L. Figuier, vol.4, 1867-1869.

placée dans un cuve en bois, dans laquelle de la vapeur est introduite. On ajoute 14 % de son poids en chaux grasse, et le mélange est maintenu à 100° pendant huit heures sous agitation permanente. Le savon calcaire est ensuite laissé au repos et, après refroidissement, la solution de glycérine est séparée de la masse dure formée.

- obtention des acides gras par acidification

Après battage de la masse, la poudre grossière obtenue est placée dans une cuve en bois doublée de plomb dans laquelle de la vapeur d'eau circule dans des serpentins en plomb. De l'acide sulfurique à 20° Baumé est introduit progressivement dans la cuve, en excès, pour mettre les acides en liberté. L'opération se poursuit et la masse obtenue devient homogène. Après mise en repos et décantation, les acides gras présents dans la couche supérieure sont recueillis, puis lavés deux fois à l'acide, lavés à l'eau, et mis à refroidir dans des bacs. La matière brute est ainsi moulée en pains.

- séparation des acides gras par pressage mécanique

Placés dans des sacs de laine grossière, les pains sont soumis à une pression lente et graduée au moyen d'une presse hydraulique verticale pendant quatre ou cinq heures. L'acide oléique liquide s'écoule, est recueilli dans des bacs. Refroidi, il libère une certaine quantité d'acides solides. Les acides sont ensuite pressés à chaud dans des sacs de laine recouverts d'une enveloppe de crin et déposés entre des plaques creuses chauffées à la vapeur d'eau. Le pressage est réalisé dans une presse hydraulique horizontale.

- purification des acides gras

A ce niveau des opérations, on a obtenu un mélange des acides gras solides. Leur purification est réalisée par refusion, puis acidification et élimination des parties insolubles par coagulation d'albumine (comme pour le collage d'un vin) en présence d'acide oxalique. Les acides gras étaient alors parfaitement incolores et limpides.

- fabrication des bougies

Pour nos deux industriels, cette étape a présenté des difficultés qui ont été surmontées progressivement : celle de la mèche, comme cela a été signalé plus haut, et aussi celles de la couleur (qui devait être très blanche), du point de fusion (qui devait rester suffisamment élevé), et de la forme de la bougie qui devait être régulière et lisse.

La forme définitive était donnée par moulage. Pour empêcher la cristallisation des bougies durant cette opération, les inventeurs mirent au début des traces d'acide arsénieux, ce qui leur fut promptement interdit. Ils ajoutèrent ensuite de la cire blanche en quantité variable. Cela augmentait le prix de la bougie qui, par ailleurs, jaunissait très vite. En 1834, ils trouvèrent le moyen de verser les acides gras dans des moules préalablement chauffés à la même température. Pour blanchir les bougies, on les exposait à la lumière solaire. Enfin il fallait les polir.

Restait, vers 1835, le problème de la mèche de cette bougie, qui avait la fâcheuse tendance de la faire couler durant la combustion. Après de multiples essais, de Milly trouve en 1836 l'imprégnation de la mèche par de l'acide borique en solution avec un millième de son poids d'acide sulfurique. La flamme de la bougie, siège de la combustion, produit avec les différents produits chimiques présents

un borosilicate fusible qui monte dans la mèche. Cette invention décisive a été protégée par un brevet déposé par A. de Milly. Or celui-ci était déjà concessionnaire du brevet de Cambacérès. Ce fait suggère la nature des relations qui avaient pu être établies entre les différents intervenants dans cette étape décisive.

Les premiers pas d'une nouvelle industrie

En 1834, de Milly et Motard, seuls fabricants en France de la bougie stéarique, reçoivent une médaille d'argent à l'Exposition de Paris. La Société d'encouragement leur en attribue une autre. Ils produisent déjà 16 tonnes par an de bougies à 4,50 F le kg. A l'Exposition de 1839, la concurrence se manifeste : neuf fabricants présentaient leurs fabrications. La production annuelle était de près de 1 000 tonnes, et le prix était tombé à 2,50 F le kg. La nouvelle industrie stéarique ne cessera de se développer.

Déjà le rapporteur du jury pour l'Exposition de 1839 signalait les premiers développements de cette nouvelle activité industrielle : « *En résumé, M. de Milly se trouve encore à la tête de l'établissement le plus considérable de ce genre, il en a construit un semblable à Marseille, afin d'ouvrir sur les deux points principaux de fabrication et de vente des savons, un double débouché aux acides gras fluides, sorte de résidu de la fabrication des acides gras solides ; de ses ateliers sont sortis les fondateurs d'usines semblables qui se sont multipliées non seulement en France mais encore à l'étranger. Pour cette application toute française d'une découverte dont le monde reconnaît parmi nous l'auteur, M. Chevreul, le jury décerne à M. de Milly une Médaille d'or.* »²¹ Par la suite, d'autres distinctions ont été décernées à A. de Milly lors des expositions.

Premières retombées de la fabrication des acides gras

Comme cela avait été découvert par Chevreul, le traitement chimique du suif ou d'autres graisses animales utilisées pour l'obtention des acides gras donne deux sous-produits : des acides gras à bas point de fusion, dont l'acide oléique est le représentant principal, et de la glycérine.

On vient de noter les premières retombées de la fabrication des bougies stéariques lors de l'Exposition de 1839. La transformation des acides gras liquides en savons par saponification rendait alors commercialisable un important sous-produit, l'acide oléique. Il suffit de savoir que, dans le suif de bœuf, l'acide oléique représente en valeur moyenne 35 à 36 % de la masse totale, et que les acides gras insaturés supérieurs en C18 font en moyenne 40 % de la masse²². Le saindoux comporte en moyenne 42 à 43 % d'acide oléique, et près de 48 % avec le C18 supérieur. Le premier débouché a été la fabrication de savon « mou », ou savon noir, obtenu à partir de l'acide oléique après une saponification.

Un autre débouché pour l'acide oléique a été l'ensimage des laines, opération de graissage des fibres pour faciliter le tissage. Cette technique a été mise au point

par le chimiste Eugène Péligot (1811-1890), professeur à l'École centrale, et par Michel Alcan (1811-1877), ancien élève de la même école, professeur de filature et de tissage au Conservatoire des arts et métiers²³.

La glycérine, de son côté, ne présentait encore qu'un intérêt extrêmement limité : l'application en médecine. On s'en débarrassait donc pour le moment. C'est en 1847 que le chimiste italien Sobrero a découvert, sous la direction de Jules Pelouze (1807-1867), la trinitroglycérine. Produit très instable, son emploi est resté très dangereux avant qu'Alfred Nobel (1833-1896) ne lui ait trouvé, en 1866, un usage industriel. Cette invention devait, comme on sait, faire sa fortune : la fabrication de la dynamite²⁴.

DIVERSIFICATION DES MÉTHODES D'ACCÈS AUX ACIDES GRAS

En 1855, Stas soulignait que l'industrie stéarique a donné naissance « à des recherches nouvelles pour la fabrication en grand des acides gras par d'autres moyens que la saponification calcaire et à l'aide d'autres substances grasses que le suif²⁵ ».

L'industrie stéarique a en effet suscité toute une série de recherches dans plusieurs directions qui peuvent être résumées en ces termes : économie de matières premières, élargissement des sources d'approvisionnement, rentabilité accrue.

Dans cette perspective, les chimistes ont étudié de nouvelles méthodes d'obtention des acides stéarique et palmitique²⁶ à partir du suif ou du saindoux qui en contiennent une très grande proportion. Ce sera surtout la « voie française », même si d'autres possibilités ont été activement étudiées.

L'autre voie tendait à obtenir des acides gras susceptibles d'avoir des propriétés physiques tout autant intéressantes pour la fabrication de bougies. Elle est fondée sur l'utilisation de matières grasses telles que des huiles non comestibles, des graisses de mauvaise qualité ou de récupération. Ces tentatives ont vu leurs débuts d'abord en Grande-Bretagne, pour s'étendre ensuite à d'autres pays, et elles donnèrent lieu à l'installation de très nombreuses entreprises au milieu du siècle dernier.

Les principales méthodes d'obtention des acides gras entre 1840 et 1870

On retracera, dans leurs grandes lignes, les différentes méthodes suivies. Elles ne doivent pas être dissociées de ceux qui les ont mises au point. Aux côtés des industriels figurent de nombreux scientifiques, en particulier dans le cas français. Ceci souligne l'existence d'interactions fortes entre la science et l'industrie, et l'intérêt suscité pour cette nouvelle branche de la chimie industrielle.

En reprenant la présentation adoptée dans des ouvrages de chimie industrielle de cette époque, comme celui du chimiste Anselme Payen (1795-1871), professeur au Conservatoire des arts et métiers et à l'École centrale, les différentes méthodes pouvaient être regroupées sous la

même technique appelée la « distillation »²⁷. En réalité, si ce terme utilisé par les chimistes du siècle dernier permettait de rendre compte de l'évolution technique qui s'est manifestée dans la stéarinerie, pour notre époque la réaction chimique qui est réellement en jeu consiste en une hydrolyse en milieu acide, et elle en constitue le véritable fil conducteur. Une distillation servait à séparer les produits formés.

L'emploi de l'acide sulfurique

L'acide sulfurique était connu comme étant susceptible de dédoubler les matières grasses en acides gras et en glycérine. Mentionné par Chevreul, ce résultat est repris en 1836 par le chimiste Edmond Frémy (1814-1894), un élève de Gay-Lussac qui deviendra professeur au Conservatoire en 1838²⁸.

Frémy a montré que les composés formés, qu'il nommait des « acides sulfo-gras », sont décomposables facilement en acides gras par action de l'eau chaude. La méthode reste momentanément inutilisée par l'industrie. Ce n'est qu'en 1855 que ce chimiste a déposé un brevet d'invention sur la « saponification » sulfurique des graisses.

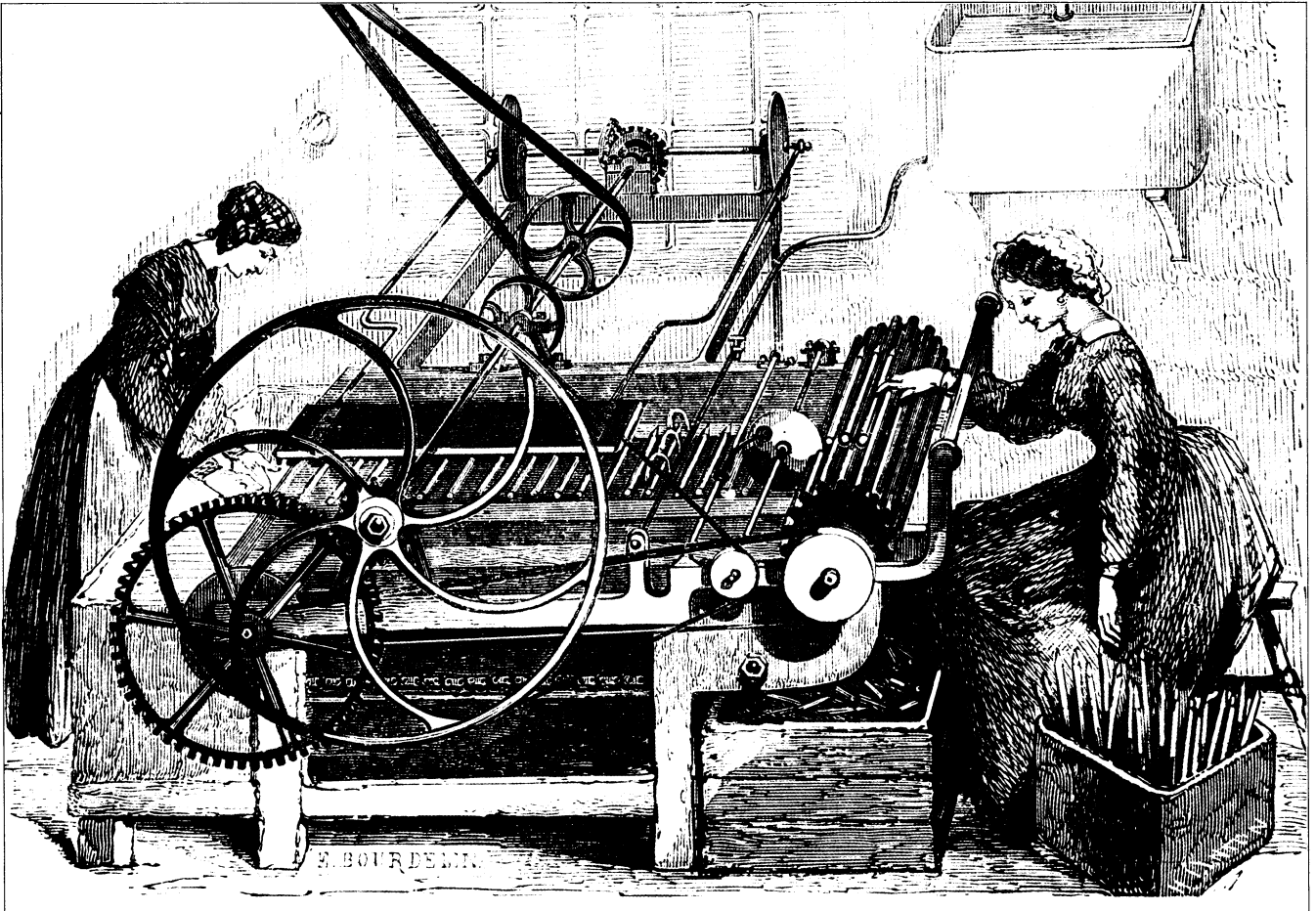
La « distillation » des acides gras

Plusieurs chimistes, tels Bussy et Le Canu, professeurs à l'École de pharmacie de Paris, ont étudié en 1840 les produits obtenus par traitement thermique de graisses²⁹. L'année suivante, un industriel, A.-P. Dubrunfaut, déposait un brevet sur la « distillation » des corps gras à 200-300° C par de la vapeur d'eau surchauffée, qui consistait en une hydrolyse acide des triglycérides. Cette méthode permettait d'obtenir des acides gras sans décomposition, et de les recueillir par entraînement à la vapeur d'eau³⁰. L'idée est très intéressante pour les industriels. Dubrunfaut, spécialiste de la chimie sucrière et de la distillation des alcools, a appliqué ici ses connaissances techniques dans le domaine de la stéarinerie. Son procédé pour traiter l'huile de palme a été mis en œuvre en France avec un succès limité dans les années 1840. Après les tentatives en 1848 des industriels Masse et Tribouillet à Neuilly, sous licence Dubrunfaut, la méthode n'a été véritablement reprise qu'après l'échéance de ce brevet en 1857.

La « distillation sulfurique »³¹

La voie qui a connu un très grand développement à l'étranger à partir des années 1840 est celle qui faisait appel à l'hydrolyse en milieu sulfurique combinée à la distillation à la vapeur. C'est en Grande-Bretagne, où une série de brevets d'invention, dus notamment à George Wilson, W. Coley, Jones et G. Gwinne, a été déposée sur cette question à partir de 1842³², que l'industrie stéarique a été fondée. Sur cette voie vont naître des entreprises concurrentes de la voie française. Par la suite, des méthodes similaires se propageront en Hollande, en Belgique, en Allemagne et dans d'autres pays.

Sur la filière technique qui vient d'être signalée, la



firme Price's Patent Candle Company a été fondée en 1843 à Londres. Elle a été la première entreprise importante de fabrication d'acides gras sur une voie différente de la saponification calcaire.

Dans de grandes cuves en bois, doublées de plomb, on introduit la matière grasse et on ajoute de 6 à 15 % d'acide sulfurique concentré suivant les cas ; pour de l'huile de palme, il en faut 10 %. Au moyen de la vapeur circulant dans un serpentín, un chauffage à 90-95° C est maintenu pendant 18 à 20 heures. La glycérine et une partie des acides gras liquides sont décomposés et entraînés sous forme de vapeurs. Les acides gras, fortement colorés, sont recueillis, lavés à l'eau chaude jusqu'à neutralité. Ils sont soumis ensuite à la distillation par de la vapeur d'eau. Les opérations ont été combinées en une seule par la suite.

Des filières techniques liées à diverses contraintes

Selon un spécialiste comme L. Droux, ingénieur civil, inventeur et directeur de l'usine de bougies de Clichy³³, l'industrie stéarique devait tenir compte des différents marchés : le succès de la distillation des graisses tenait en partie à la consommation des savons. Les Français consommaient surtout des savons durs à base de soude. L'acide oléique distillé donne de mauvais savons durs. La saponification utilise, de plus, des suifs de bonne qualité, alors que la distillation utilise surtout des suifs d'os, des graisses de qualité inférieure ou de récupération, ou encore des huiles de palme des colonies, tous produits de moindre valeur. D'un autre côté, un spécialiste comme A. Payen soulignait le poids des taxes à l'importation qui, avec d'autres facteurs, alourdissait le prix des matières premières, en particulier de l'huile de palme³⁴.

L'APPORT DES SCIENTIFIQUES ET LES PROGRÈS DE LA CHIMIE AU MILIEU DU XIX^e SIÈCLE

Sur le plan des connaissances théoriques, l'une des principales contributions a été celle du grand chimiste Marcelin Berthelot (1827-1907). Donnant une suite remarquable aux recherches analytiques de Chevreul, il a réalisé pour la première fois la synthèse de corps gras à partir d'acides gras et de glycérine pour sa thèse de doctorat, soutenue en 1854³⁵. L'apport de Berthelot est ici décisif car il rendait plus compréhensibles, et alors plus maîtrisables, les connaissances sur les corps gras et les réactions qui les caractérisent. Avec les acides, la glycérine pouvait donner trois combinaisons différentes. Ce qui est traduit de nos jours par l'équation chimique représentée sous forme de l'équilibre (en présence d'un acide minéral) :

$$\text{alcool} + \text{acide} \rightleftharpoons \text{ester} + \text{eau}$$
résulte des travaux de Berthelot. Appliquée aux graisses, esters de la glycérine, ou triglycérides, la réaction faisant seulement intervenir de l'eau permettait d'accéder aux acides gras constitutifs.

D'autres chimistes ont aussi étudié des sujets d'intérêt

industriel pour la stéarinerie. Ainsi Frémy, cité plus haut, proposait en 1855 un traitement sulfurique des graisses à basse température pour éviter des colorations. De son côté, J. Pelouze, cité plus haut, élève de Gay-Lussac, professeur à l'École polytechnique et spécialiste de l'étude de la glycérine, a publié en 1855 un étude sur la saponification des huiles³⁶. D'autres scientifiques, comme Louis Melsens (1814-1886), professeur de chimie et de physique à l'École vétérinaire de Bruxelles, ou l'Américain Tilghman, proposaient des méthodes d'hydrolyse des graisses sous pression de plusieurs atmosphères pour obtenir les acides gras³⁷.

Par ailleurs, durant cette période, la chimie industrielle s'est organisée progressivement avec la mise en œuvre de matériaux spécifiques, la maîtrise des conditions opératoires (température, pression, etc.) et la réalisation progressive de processus opératoires en continu. De telles évolutions sont par exemple observées dans l'industrie sucrière³⁸. La stéarinerie a naturellement bénéficié de ces progrès qui permettaient de réaliser des opérations de plus en plus complexes.

La floraison inventive des années 1850-1860

Toutes ces avancées scientifiques et techniques sont prises en compte, et l'industrie stéarique en France utilise au milieu des années 1860 une variété de méthodes. La saponification calcaire a été perfectionnée afin d'économiser les matières premières, en particulier avec l'utilisation d'autoclaves pour travailler sous pression. L'hydrolyse est pratiquée aussi bien en présence d'acide sulfurique concentré qu'avec seulement des traces de cet acide. La distillation se fait par entraînement à la vapeur ou encore sous pression réduite. Ces variantes illustrent la grande mobilisation des industriels et la multitude des voies explorées. Il n'en reste pas moins que c'était la saponification calcaire, de plus en plus perfectionnée par les industriels dont de Milly faisait partie, qui représentait la principale méthode utilisée en France³⁹.

APERÇU DU DÉVELOPPEMENT DE L'INDUSTRIE STÉARIQUE

Plusieurs caractéristiques semblent pouvoir être retenues : la stéarinerie française a connu un essor rapide, qui s'est matérialisé par une diversité d'entreprises et de méthodes suivies. Quelques repères permettent de le percevoir.

Un essor rapide

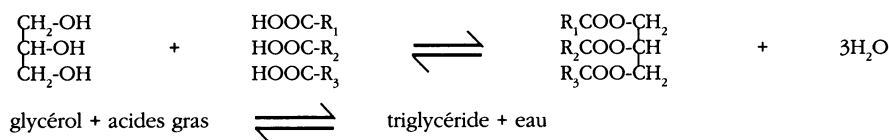
Globalement, entre la période de démarrage (1835-1844) et la fin de la période abordée ici (1865-1874), la production moyenne annuelle a été multipliée par un

La machine à scier et laver les bougies à l'usine des bougies de Clichy. Les presses de l'usine des bougies de Clichy.

Extraits des Grandes Usines de France de J. Turgan, tome 1, éd. Bourdilliat, 1860.

Corps gras : quelques repères

Tout corps gras (huile, beurre, graisse), d'origine animale ou végétale, est essentiellement composé de triglycérides (pour 95 à 98%), qui sont des esters résultant formellement de la réaction de différents acides gras avec le glycérol, ou glycérine, suivant le schéma suivant :



La composition moyenne pondérale en acides gras est caractéristique pour chaque corps gras naturel (voir tableau). Elle varie notamment en fonction de son origine géographique et des traitements qu'elle a pu subir.

Les acides gras, au nombre d'une vingtaine dans la nature, comportent des atomes de carbone, d'hydrogène et d'oxygène.

Trois paramètres les différencient :

- la longueur de la chaîne d'atomes de carbone : entre 4 et 24 carbones, quasiment toujours en nombre pair ; les plus courants ont 16 ou 18 carbones.
- l'insaturation : des doubles liaisons éthyléniques peuvent se trouver à des emplacements précis de la chaîne hydrocarbonée, ce qui confère aux acides gras insaturés des propriétés particulières.
- l'isomérisation, ou position des chaînes hydrocarbonées par rapport aux doubles liaisons.

Exemples :

- acide gras saturé : acide stéarique (C18, dans le tableau) :
 $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-COOH}$
- acide gras insaturé : acide oléique (C18:1, dans le tableau) :
 $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH=CH-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-COOH}$

Le point de fusion dépend de la longueur de la chaîne, du degré d'insaturation et de l'isomérisation.

Les corps gras ont un grand nombre d'usages, soit directement après purification, soit après transformation en d'autres composés chimiques. La lipochimie tient une place importante dans les industries chimiques.

facteur d'environ 3,5. La croissance s'est poursuivie jusqu'à la période 1885-1894 où elle a atteint 7,8 fois la production de la période initiale, avec 22 200 tonnes par an en moyenne, comparées aux 2 850 tonnes des débuts⁴⁰. Par la suite, la concurrence de l'éclairage au gaz dans les grandes villes, puis de l'éclairage au pétrole et enfin de l'électricité, allait modifier complètement les données du secteur.

Cette industrie est installée près des lieux d'approvisionnement : aux portes des grandes villes (Paris, Lyon, notamment), à proximité des abattoirs pour les suifs, ou dans de grands ports (Marseille, Nantes, etc.), où les corps gras étrangers sont livrés⁴¹. En aval de cette industrie, d'autres activités viennent se brancher, comme des savonneries.

A titre d'exemple, il existait en France 55 stéarinerie en 1867. Elles traitaient ensemble 150 tonnes de matière grasses par jour, dont la répartition était la suivante : suifs (134 tonnes), huiles de palme (8 tonnes), graisses diverses (8 tonnes). En 1885, on recensait 166 usines⁴².

Une industrie « hétérogène »⁴⁰

Sur les 55 usines recensées en 1867, 32 (soit 58 %) utilisaient la saponification calcaire à pression ordinaire et traitaient 65 tonnes de matières grasses ; 11 (soit 20 %) la pratiquaient sous pression réduite avec des quantités calculées pour former un savon neutre (45 tonnes de corps gras traités) ; 3 seulement pratiquaient exclusivement la

« distillation » (10 tonnes traitées) ; les autres utilisaient la saponification sous pression (procédé perfectionné par A. de Milly), ou encore la « distillation » combinée à la saponification.

Selon le mode de fabrication, les produits n'ont pas la même qualité. Ainsi, depuis 1855, de Milly commercialisait deux types de bougies. Les bougies stéariques obtenue par saponification calcaire à base de suif étaient vendues sous la marque « Bougie de l'Étoile ». D'une blancheur extrême, très dures, sèches au toucher, elles donnent une flamme très brillante. Elles sont fabriquées à partir d'un mélange d'acide stéarique et palmitique ; leur point de fusion est de 54,5 à 55° C. Sous la marque « Bougie de la Chapelle », cet industriel commercialisait des bougies faites avec des acides gras obtenus par hydrolyse sulfurique et distillation selon le procédé de Frémy. Elles étaient moins dures, plus cassantes et coulaient plus facilement. Leur point de fusion était inférieur d'environ 3° C à celui des bougies stéariques. D'autres fabricants donnaient un enrobage stéarique à des bougies faites à partir d'acides gras issus d'huile de palme. Pour sa part, le premier industriel français de la stéarinerie fabriquait par an 2,5 millions de paquets de bougie et 1,5 million de kilogrammes de savons de soude à l'acide oléique⁴³.

(ci-contre) Document Lesieur.

COMPOSITION EN ACIDES GRAS

DES HUILES ET GRAISSES ALIMENTAIRES

(Valeurs exprimées pour 100 g de lipides)

(valeurs 1988 - moyenne)

Corps gras ↓	Acides gras →																	
	BUTYRIQUE C4:0	CAPROÏQUE C6:0	CAPRYLIQUE C8:0	CAPRIQUE C10:0	LAURIQUE C12:0	MYRISTIQUE C14:0	MYRISTOLEIQUE C14:1	PALMITIQUE C16:0	PALMITOLEIQUE C16:1	STÉARIQUE C18:0	OLÉIQUE C18:1	LINOLEIQUE C18:2	LINOLÉNIQUE C18:3	ARACHIDIQUE C20:0	GADOLEIQUE C20:1	BÉHÉNIQUE C22:0	ÉRUCIQUE C22:1	LIGNOCÉRIQUE C24:0
BEURRE DE CACAO								26		34	35	3	<1	1				
SAINDOUX						2		25	3	18	44	7	<1	<1	<1			
SUIF						3	1	26	3	23	39	4	<1	<1				
BEURRE	3	1	1	3	4	12	2	29	4	11	25	2	1	2				
PALME						1		44		6	38	10	<0,5	<0,5				
PALMISTE		<1	4	3	47	16		6		3	16	3						
COPRAH		1	7	6	46	18		9		3	8	2						
OLIVE								11	1	3	77	7	<1					
ARACHIDE								11		4	48	29	<0,5	2	1	3	<0,1	1
COLZA								5	<0,5	2	59	21	9	<0,5	1	<0,5	<1	
SOJA								10		4	23	53	8	<0,5	<0,5	<0,5		
MAIS								11		2	28	56	1	<0,5	<0,5	<0,5		
TOURNESOL								6		5	18	69	<0,5	<0,5	<0,5	<1		
PÉPINS DE RAISINS								7		5	17	70	<0,5	<0,5	<0,5			
NOIX								8		2	18	58	14	<0,5				

Pays où l'invention est apparue et où l'innovation s'est réalisée, la France était en 1867 le premier producteur mondial, avec 45 000 tonnes/an de matières grasses traitées. Suivie de près par la Grande-Bretagne (40 000 t) avec 30 stéarinerie par distillation, et par l'Allemagne (35 000 t) avec 50 usines distillant et saponifiant. La Belgique et la Hollande, avec 10 000 t/an chacune, se situaient immédiatement après ce groupe des principaux producteurs.

Ce tracé des grandes lignes d'un secteur industriel, qui peut sembler relativement modeste quand on le compare, à la même période, avec celui de la savonnerie avec lequel il est très lié, n'a pour seul but que de renouer avec les racines de la lipochimie contemporaine. Fondée sur des recherches scientifiques, appliquée avec succès par des industriels innovateurs, l'industrie qui a produit des acides gras et de la glycérine n'a pas joué un rôle secondaire au cours du siècle dernier ; au contraire, elle a participé à la mise en place d'un ensemble industriel nouveau relevant de la chimie organique.

Enfin, cette remarque de Turgan : « *Tout est français dans la stéarinerie*⁴⁴ », nous laisse mesurer l'importance que cette industrie avait aux yeux des contemporains. Aujourd'hui produit d'intérêt marginal, constituée de paraffine issue de la pétrochimie, la bougie ne contient plus qu'un faible pourcentage d'acide stéarique. Néanmoins, la production annuelle d'acide stéarique dans le monde reste voisine de 1 500 000 tonnes⁴⁵.

Notes

1. Des éléments d'information sur les corps gras sont donnés par ailleurs dans cet article (voir encadré).

2. L'acide stéarique est un acide gras saturé comportant 18 atomes de carbone, 36 atomes d'hydrogène et 2 atomes d'oxygène. Il est présent en quantités très variables dans tous les corps gras naturels.

3. L'Association française pour l'étude des corps gras a organisé, du 6 au 9 juin 1989, à Angers, le Congrès international Chevreur pour l'étude des corps gras « Eurolipids », à l'occasion du centenaire de la mort du chimiste Chevreur.

4. Certaines dénominations données à l'origine par Chevreur ont été modifiées par la suite. Si l'acide oléique a conservé sa dénomination, le nom d'acide « margarique » serait incorrect de nos jours pour le composé isolé par Chevreur à partir du saindoux. Il s'agissait en fait d'un mélange d'acide stéarique et d'acide palmitique (ref.: C. Paquet et J.-P. Wolff, *Michel-Eugène Chevreur fondateur de la chimie des corps gras*, publication spéciale Congrès Eurolipids, Association française pour l'étude des corps gras, 1989).

5. Chevreur lui-même a contribué au perfectionnement des méthodes d'analyse des composés organiques. Voir notamment A.B. Costa, *Michel-Eugène Chevreur, Pioneer of Organic Chemistry*, Madison, 1862.

6. Chevreur a été nommé en 1830 professeur de chimie au Muséum, à la chaire de Vauquelin. Sur cette question, voir Ch. Mentzer, « L'enseignement de Chevreur au Muséum », in *Recueil des conférences prononcées aux Journées Chevreur, Angers 22-24 mai 1964*, Société chimique de France, Bull. Soc. chim., 1964.

7. Charles-Guillaume Scheele (1742-1786), chimiste suédois.

8. L'acide margarique est de nos jours l'acide gras saturé à 17 carbones.

9. Les travaux scientifiques de Chevreur ont fait l'objet de nombreuses études, tant de la part de la communauté scientifique que des historiens. Voir C. Gillispie, *Dictionary of Scientific biographies*, Notice biographique de Chevreur, par A.B. Costa, pp.240-244. Pour une revue récente de travaux sur Chevreur, voir G. Emptoz, « Un savant dans son siècle », *Revue française des corps gras*, n°9/10, 1989, pp. 367-373.

10. Gay-Lussac et Chevreur, Brevet d'invention de 15 ans, fonds INPI, Paris.

11. Simonnin et Braconnot, Brevet d'invention de 5 ans, fonds INPI, Paris.

12. N. Dhombres, J. Dhombres, *Naissance d'un nouveau pouvoir : sciences et savants en France, 1793-1824*, Payot, Paris, 1989.

13. M.-E. Chevreur, *Recherches chimiques sur les corps gras d'origine animale*, réédition, Imprimerie nationale, Paris, 1889 (édition originale parue en 1823).

14. M.-E. Chevreur et J.-L. Gay-Lussac, Brevet d'invention (Ref.10).

15. M. Crosland, *Gay-Lussac, Scientist and Bourgeois*, Cambridge University Press, Cambridge, 1978, p. 194. Le brevet au nom de Mosès-Poole est cité dans des publications du siècle dernier, du vivant de Chevreur.

16. G. Mensch, « la Technique en crise », *Culture technique*, n° 18, mars 1988, pp. 55-78.

17. J. Stas, *Rapport du Jury mixte international*, Exposition universelle de Paris en 1855, Imprimerie impériale, Paris 1856, Dixième Classe, Bougies stéariques.

18. J.-L. Cambacères, Brevet d'invention de 15 ans (délivré le 10 février 1825) suivi de quatre certificats de perfectionnement et d'addition, des 2 mars, 25 mai et 17 novembre 1825, et du 10 octobre 1826, fonds INPI, Paris.

19. Voir J. Stas, *Rapport du Jury mixte international (op.cit.)*.

20. J. Stas, *ibid.*

21. *Rapport du Jury central*, Exposition des produits de l'industrie

française en 1839, Bouchard-Huzard, Paris, 1839, 5^e classe Chimie.

22. Voir le tableau de la composition des corps gras.

23. *Cent Cinquante Ans de haut enseignement technique au Conservatoire national des arts et métiers*, CNAM, Paris, 1970, pp. 111-112.

24. M. Dumas, *Histoire générale des techniques*, vol. IV, PUF., Paris 1978, pp. 574-575 ; J. Wojkowiack, *Histoire de la chimie*, Tec & Doc, Paris, 1984, p. 128 ; F. Aftalion, *Histoire de la chimie*, Masson, Paris, 1988, p. 59.

25. J. Stas, *op.cit.*(ref.17).

26. L. Droux, « Acides gras, bougies stéariques », *in études sur l'Exposition universelle de Paris en 1867*, Lacroix, Paris, 1867, pp. 212-255.

27. A. Payen, *Précis de chimie industrielle*, tome 2, 5^e éd., Hachette, Paris, 1867, pp. 797-807.

28. *Cent Ans de haut enseignement technique au Conservatoire national des arts et métiers*, (*op.cit.*, p.15).

29. Travaux cités par A. Payen, *in Précis de chimie industrielle*, (*op.cit.*, p. 797).

30. Dubrunfaut, Brevet d'invention de 15 ans, délivré le 28 août 1841, et certificat d'addition du 4 mars 1842, fonds INPI, Paris.

31. La terminologie utilisée par les chimistes du XIX^e siècle, qui ignoraient les détails des réactions mises en jeu ici, doit être corrigée. Il s'agit d'une hydrolyse acide des triglycérides. L'acide sulfurique concentré réagit sur les acides gras insaturés pour donner des sulfonates et des sulfates organiques sous forme acide. En présence d'eau, les sulfates organiques s'hydrolysent, mais les sulfonates sont des catalyseurs actifs d'hydrolyse des triglycérides (information aimablement communiquée par J.-P. Wolff).

32. J. Stas, *op.cit.*

33. Turgan, *les Grandes Usines de France*, t. I, Librairie nouvelle, Paris, 1860, pp. 128-144: « Usines de bougies de Clichy ».

34. A. Payen, « Industrie stéarique et paraffine », *Rapports des membres de la section française du Jury international sur l'ensemble de l'Exposition*, sous la direction de M. Chevalier, Exposition universelle de Londres de 1862, Chaix, Paris, 1862, t. II, p. 206.

35. J. Jacques, *Marcelin Berthelot, autopsie d'un mythe*, Belin, Paris, 1987, chap. 12.

36. J. Pelouze, *Bull. Société d'encouragement*, 54, 1855, pp. 298-301 ; 56, 1857, pp. 50-57.

37. Melsens, Brevet d'invention de 15 ans, n° 21749, déposé le 18 décembre 1854 ; certificat d'addition du 29 mai 1855, fonds INPI, Paris.

38. M. Dumas, *Histoire générale des techniques*, t. III, PUF, Paris, 1968, pp. 641-643.

39. Une variété de perfectionnements a été apportée aux différentes étapes de l'obtention des acides gras, et de leur transformation en bougies. La saponification a cédé la place à l'hydrolyse des suifs sous pression en présence d'oxydes de calcium ou de zinc comme catalyseurs (J.-P. Wolff, communication personnelle).

40. T.J. Markovitch, « L'industrie française de 1789 à 1964, Chimie », *Cahiers de l'ISEA*, juin 1966, pp. 21-22, et tableaux annexés. Les chiffres que cet auteur a publiés pour les productions de la stéarinerie durant les années 1865-1874 ne peuvent être directement comparés à ceux donnés par L. Droux sur les consommations de matières grasses au milieu des années 1860. Il convient de se reporter aux statistiques industrielles nationales de cette époque pour une image plus précise.

41. P. Baud, *l'Industrie chimique en France*, Masson, Paris, 1932, p.150.

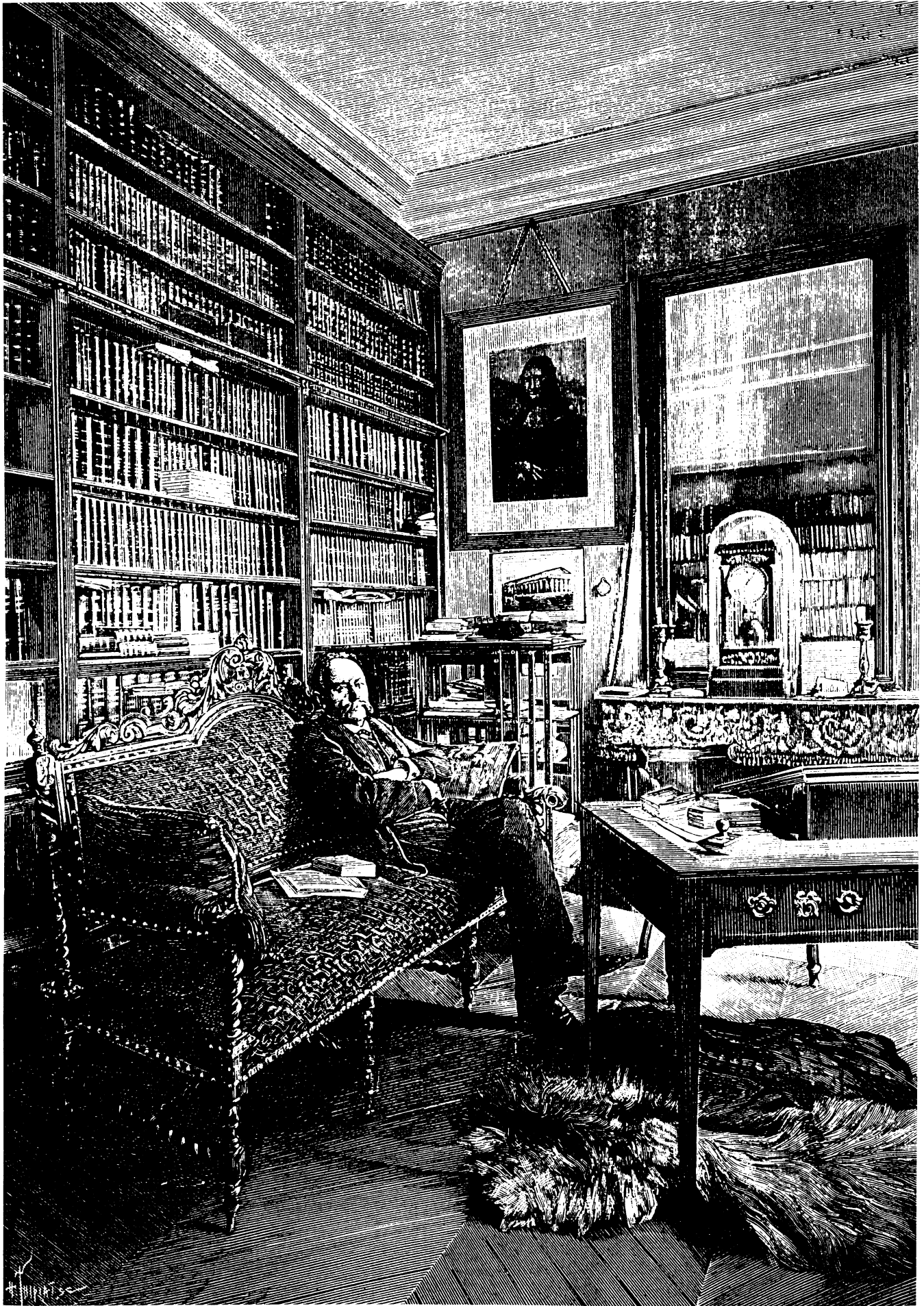
42. P. Baud, *ibid.*

43. J. Stas, *op.cit.*(ref. 17).

44. Turgan, *les Grandes Usines en France*, (*op.cit.*, p. 128) ; citation reprise par L. Droux, *op.cit.*(ref. 26), p. 212.

45. Information aimablement communiquée par J.-P. Wolff, directeur général honoraire de l'Institut des corps gras, à qui l'auteur adresse ses remerciements pour la revue de cet article.

Nota : Voir aussi sur l'éclairage par les corps gras solides, l'ouvrage de vulgarisation de L. Figuié, *les Merveilles de la science*, vol. 4, Paris, 1869-1878, pp. 58-91.



Professeurs et marchands

Jean Jacques

Dans l'inventaire et l'imagerie des stéréotypes sociaux, le savant occupe une place particulière. Il est rarement normal : bon ou mauvais, fou ou prisonnier d'une logique surhumaine, associé au Diable ou candidat à la béatification, Faust, docteur Folamour ou Pasteur. Ses relations avec l'argent ne sont ni claires ni faciles : inventeur, il profite rarement de ses découvertes, qu'il s'est ruiné pour faire aboutir ; si sa situation sociale le met à l'abri des soucis matériels, il est généreux, désintéressé, distribuant distraitemment les fruits de son génie sans les comptabiliser. La chimie, science aux conséquences sociales par excellence, du fait de ses applications quotidiennes et de leurs retombées économiques, constitue évidemment un domaine privilégié pour qui veut suivre les avatars de ce personnage mythologique et contradictoire. Je voudrais, à la lumière de l'histoire du XIX^e siècle, essayer de décrire quelques cas de figures emblématiques qui illustrent les idées et le préjugés concernant les relations réelles ou imaginaires entre les « professeurs » et les « marchands ». Ma première observation peut se résumer de la façon suivante : l'activité industrielle d'un savant, surtout si elle se traduit à son bénéfice par des succès commerciaux, n'est généralement pas considérée comme contribuant à sa gloire. L'examen du cas de Nicolas

*Marcelin Berthelot (1827-1907)
dans son cabinet de travail. Extrait
de la Nature, 31 mars 1894*

Vauquelin va me permettre d'emblée de justifier cette remarque.

Relisons le Grand Larousse encyclopédique, qui nous apprend l'essentiel de ce qu'il faut savoir sur cet excellent chimiste français (1763-1829), né et mort à Saint-André-des-Berteaux (Calvados). Garçon de laboratoire dans plusieurs officines avant de devenir l'élève de Fourcroy, il est reçu pharmacien (1792) et immédiatement nommé pharmacien en chef de l'hôpital militaire de Melun. Professeur à l'École des mines et à l'École polytechnique (1795), on le retrouve professeur au Collège de France (1801), directeur de l'École spéciale en pharmacie, professeur de chimie au Jardin des Plantes (1804), puis à la faculté de Médecine (1809). Tombé en disgrâce en 1822 à cause de ses opinions libérales, il se retire dans son pays natal dont il est élu député en 1827. Nous saurons par ailleurs qu'« *il a rendu de signalés services à l'industrie et à l'hygiène par ses multiples observations sur le fer, l'acier, le plomb, la fabrication de l'alun, celle du laiton, l'eau de couleur des bijoutiers, l'action oxydante du vin, de l'huile, du vinaigre, etc.* » (sic). Cuvier n'en dit guère plus, dont l'éloge de Vauquelin¹ constitue la référence de base pour presque tout ce qui a été écrit sur ce découvreur du chrome et de la glucine (oxyde de glucinium, avant que celui-ci devienne le béryllium). Il faut lire Balzac pour trouver de Vauquelin une image moins désincarnée.

Dans la *Muse du département* ou surtout dans *César Birotteau*, on le retrouve cité une bonne vingtaine de fois en qualité de chimiste célèbre certes, mais aussi et surtout comme un industriel avisé qui conseille et protège l'inventeur de la « *double pâte des sultanes* » et de l'« *eau carminative* ». Ce Vauquelin-là n'est sans doute pas imaginaire. Depuis 1958, et grâce en particulier aux savantes recherches de G. Kersaint, nous possédons quelques détails supplémentaires sur cette activité marchande de notre professeur (que les cumuls ne paraissent pas avoir gêné), et sur laquelle les biographes officiels ont longtemps jeté un voile pudique.

Le 28 messidor de l'an XII, Vauquelin et Fourcroy étaient devenus copropriétaires de la fabrique de produits chimiques appartenant à un nommé Deserres, et située 23, rue du Colombier, c'est-à-dire approximativement au 19-23 de l'actuelle rue Jacob, dans le sixième arrondissement de Paris. Cette « fabrique », dont la superficie représentait environ 170 m², comportait un petit amphithéâtre et un laboratoire d'enseignement, dans lequel nous savons que Chevreul fit ses premières gammes en 1803, que Robiquet, en 1805, découvrit l'asparagine et que Liebig, en 1822, entreprit ses études sur les fulminates². Une correspondance entre Vauquelin et un de ses collaborateurs, publiée par Kersaint³, nous permet de mieux situer un savant qui n'hésitait pas à mettre la main à la pâte : « *J'ai vu M. Delacroix, fabricant d'acide sulfurique à Rouen, qui m'a offert ses services, je lui ai dit que probablement vous passeriez chez lui et que, si vous aviez besoin, vous feriez une commande.* »

M. Renault de Saint-Jean-d'Angely a demandé sa petite pharmacie, mais on n'a pas pu la lui livrer de suite ; elle a besoin d'être netoyée.

Nous avons reçu plusieurs commandes, mais M. Quesneville vous en aura donné connaissance, il est en

conséquence inutile que je les énonce.

Je vas voir ces Messieurs [ses « élèves » ?] le plus souvent qu'il m'est possible, car je n'ai guère de temps loisible, surtout depuis que mon cours au Jardin est commencé. Au surplus, je suis très content d'eux, ils sont très assidus et employant bien leur temps.

Il n'en est pas de même des hommes de force ; le pileur est toujours soul et l'autre en travaillant a l'air d'avoir chié dans sa culotte...»

On voit, à ce dernier trait, que Vauquelin n'était pas un « pur » professeur, selon les normes encore partiellement en vigueur ; il n'a pas écrit de *Traité* classique, mais ce découvreur d'éléments est certainement un de ceux qui ont inventé le métier de marchands de produits chimiques, vendeurs de nouveautés scientifiques, dont la corporation a été illustrée par les Quesneville, les Rousseau, les Poulenc en France, les Schuchardt en Allemagne, et dont le savoir-fabriquer et le savoir-vendre ont accompagné ou même parfois précédé le pouvoir-faire des chercheurs. Mais c'est là un autre sujet sur lequel il y aurait plus long à dire.

LES ACTIVITÉS LUCRATIVES ET LOUABLES DE GAY-LUSSAC

Il serait facile de multiplier les illustrations de cette pudeur des historiens de la chimie devant les activités industrielles de leurs héros. Même si celles-ci doivent implicitement être prises en compte dans l'inventaire des bonnes raisons de leur célébrité. L'historien-chimiste belge, M. Delacre, parlant de Gay-Lussac, consent à nous signaler que « *ses préoccupations, par ailleurs trop souvent lucratives [c'est moi qui souligne], eurent cet excellent résultat pour la chimie analytique qu'elles lui firent créer la volumétrie* »⁴. Car, plus encore peut-être que celui de Vauquelin, le cas de J.-L. Gay-Lussac (1778-1850) me paraît exemplaire.

Le rédacteur de la copieuse notice que la *Biographie universelle* de Michaud (un nommé Fargeaud) lui consacre ne veut pas ignorer les « *activités lucratives* » du célèbre inventeur de la loi des gaz, mais avec quel luxe de précautions ! : « *C'est une vérité reconnue et proclamée depuis longtemps : les savants éminents sont rarement des hommes d'application. Mais les hommes de génie savent se soustraire aux règles ordinaires, en créant eux-mêmes les routes nouvelles qu'ils doivent suivre : tel fut Gay-Lussac.* » Et Fargeaud rappelle les fortes paroles de Biot, prononcées à l'occasion d'un éloge académique du même : « *En cherchant à se rendre l'industrie profitable ; il voulait surtout l'avancer.* » On sait – d'ailleurs assez mal en quelles circonstances – que Gay-Lussac avait mis ses compétences au service de la Société de Saint-Gobain, à laquelle il fit faire des progrès considérables dans la production de l'acide sulfurique. Et Fargeaud poursuit : son « *procédé a certainement produit de grands avantages à la société qui put le breveter de suite en Angleterre, et cette société n'a certainement pas été ingrate envers Gay-Lussac appelé d'ailleurs à participer aux profits, puisqu'il était sociétaire lui-même* »⁵. On pourrait ajouter que, réciproquement,



Gay-Lussac n'était pas ingrat à l'égard du système économique qui l'enrichissait.

Les longues discussions à la Chambre des pairs, concernant « *l'emploi immodéré du travail des enfants dans les ateliers* », auxquelles, en mars 1840, il participa activement, nous révèlent un savant-industriel qu'un idéalisme irresponsable n'égare pas. « *Il n'est pas vrai, disait-il, que le fabricant trouve de si grands avantages dans le travail des enfants, et encore moins qu'il les exploite avec une barbarie impitoyable. Les avantages sont réciproques, et s'il existe quelques abus (où n'en trouve-t-on pas ?) je ne les trouve pas suffisants pour motiver les nombreuses et sévères prescriptions de [la] loi [qu'on nous propose]... Croyez-le bien, messieurs, la position d'un fabricant occupant de nombreux ouvriers n'est pas si douce, n'est pas si belle qu'on paraît le croire, car, ainsi que le disait si justement le comte Chaptal, dont la mémoire, j'en suis sûr, est encore si chère à la Chambre, l'industrie n'est qu'une succession continue de succès et de revers. Les soucis l'assaillent jour et nuit : sa fortune est tout entière engagée dans son établissement [...]. A une année prospère en succède une désastreuse, et alors le fabricant, au lieu de jeter ses ouvriers sur la place publique, leur assure du travail. Alors aussi s'affaiblissent, s'évanouissent même, les bénéfices qu'il avait faits.* »⁶ Ces bons sentiments de Gay-Lussac, la *Biographie universelle* les partage : « [...] on se tromperait si l'on croyait qu'il a généralement tiré un grand profit de ses travaux d'application. C'est l'économie, le bon ordre introduits de bonne heure dans sa maison, qui ont porté

leurs fruits peu à peu, et permis à l'illustre chimiste d'agrandir et d'embellir le domaine paternel, Lussac. »

Ces exemples archaïques de Vauquelin et de Gay-Lussac suffiront sans doute à ma démonstration, mais on pourrait en citer beaucoup d'autres, et de plus contemporains.

Même si, dans l'œuvre de Albin Haller (1849-1925), pour qui le Larousse du XX^e siècle signale joliment qu'il « *a réussi à établir une relation plus étroite entre l'élément producteur et l'élément scientifique* » ou dans celle de Henri Le Chatelier (1850-1936), on peut trouver des professions de foi appuyées en faveur de la nécessaire collaboration entre universitaires et industriels, c'est souvent en vain qu'on cherchera dans leurs biographies la preuve qu'ils ont mis personnellement en pratique leurs considérations théoriques. Ces témoignages ne seraient pourtant pas inutiles : la démonstration que le savoir scientifique peut être efficacement et directement investi dans telle ou telle application précise reste d'actualité et ne peut laisser indifférent ni l'historien ni le sociologue des sciences. Mais l'allusion, que j'ai citée plus haut, aux vertus domestiques de Gay-Lussac enrichi presque malgré lui, m'amène tout naturellement à décrire d'autres stéréotypes de ces professeurs modèles.

« *C'est une vérité bien connue que les savants ne sont généralement pas aptes à tirer personnellement profit de leurs travaux.* » Ch. Moureu nous assène cette évidence à l'occasion d'un des nombreux anniversaires de Chevreul (1786-1889), de ses recherches sur les corps gras et leurs applications. « *Le brevet qu'il prit en commun avec Gay-Lussac, [et qui pouvait en particulier permettre la fabrication des bougies stéariques], ne rapporta rien à ses auteurs. On a dit qu'il n'était pas industriellement exploitable. Nous ne chercherons pas dans quelle mesure ces affirmations n'eurent pas pour but d'excuser une injustice.* »⁷

UN VRAI SAVANT N'EST PAS À VENDRE

A cette image du savant à qui l'exploitation de ses résultats ne rapporte rien, même s'il a pensé, en prenant un brevet, à la possibilité de profits éventuels, on peut en opposer une autre : celle du scientifique totalement désintéressé, une sorte de saint laïc qui ne veut même pas entendre parler d'un bénéfice personnel résultant de ses découvertes. Écoutons par exemple ce qu'un des nombreux hagiographes de Marcelin Berthelot a pu en dire :

« *Il se refusa toujours à tirer pour lui-même le moindre profit de ses découvertes dont il abandonna le bénéfice à la communauté. Il fut cependant constamment sollicité de le faire. Dès ses premières recherches sur les carbures d'hydrogène, il trouva un perfectionnement dans la fabrication du gaz d'éclairage, qui, à Paris seulement, constituait une économie de plusieurs centaines de milliers de francs par an pour la Compagnie du gaz ; il rendit aussitôt sa découverte publique, sans rechercher aucun avantage*

Nicolas Vauquelin (1763-1829).

personnel. A maintes reprises les plus grands industriels, tels que le millionnaire Menier, vinrent lui proposer des associations ou l'achat de ses procédés sur la fabrication synthétique des composés organiques. Les brasseries du Nord de la France lui offrirent un jour deux millions pour qu'il leur réservât le monopole d'une de ses découvertes. D'énormes fortunes, telles que celle du bleu Guimet, ont été édifiées sur un seul de ses mémoires scientifiques. Ses recherches sur les explosifs qui aboutirent à la poudre sans fumée lui eussent permis d'amasser des richesses comme celles de Nobel. Le prodigieux développement industriel de l'Allemagne moderne est dû en grande partie à la révolution que ses méthodes de synthèse introduisirent dans la science.

*Au cours de sa longue carrière, il ne prit pas un seul brevet et abandonna toujours à l'humanité le bénéfice de ses découvertes*⁸. »

Ce texte est d'autant plus remarquable que le parangon du savant, pur de toute compromission avec la réalité marchande, dont il nous trace le portrait est, à proprement parler, mythique, en ce sens que les qualités non pas tant de désintéressement que d'efficacité industrielle attribuées à Berthelot sont, à ce qu'il me semble, totalement imaginaires. A vrai dire, il importe assez peu que ce modèle ressemble ou non à l'auteur de *la Chimie organique fondée sur la synthèse* ou à tout autre chimiste du siècle dernier, dont les découvertes aient eu une importance économique réelle ; ce qui est notable c'est qu'il ait eu une *existence idéologique* indéniable et que celle-ci, comme nous le verrons, ait été si coriace. Mais peut-être me faut-il expliquer de façon moins abrupte en quoi le portrait de ce Berthelot idéal me paraît retouché.

Je passe rapidement sur les découvertes dont la Compagnie du gaz aurait tiré tant de profits : pour ma part je ne vois pas, dans l'œuvre de Berthelot, celle qui aurait pu avoir ces heureuses conséquences. Je note également (sans insister) que l'invention de la poudre sans fumée est généralement et très justement attribuée à l'ingénieur Paul Vieille (1854-1934) et que la chimie allemande – celle des colorants en particulier – dut son prodigieux développement essentiellement à la théorie atomique, « *un instrument de production* » beaucoup plus performant que les méthodes de synthèses rudimentaires dont Berthelot s'était fait l'apologiste, mais qu'il a toujours violemment refusé. Les allusions du biographe au millionnaire Menier ou au bleu Guimet méritent cependant quelques commentaires plus détaillés.

Les relations entre Berthelot et les industriels ne furent ni très nombreuses ni très heureuses. On sait pourtant, grâce à un cahier de laboratoire retrouvé par Marcel Delépine (1871-1965), que Berthelot, entre 1860 et 1863, entreprit quelques recherches pour le compte d'Émile-Justin Menier (1826-1881), le célèbre chocolatier de Noisiel⁹. L'essentiel de son activité, d'après le décryptage de ses notes¹⁰, semble avoir été consacré à la possibilité de la préparation industrielle du bleu de quinoléine, un colorant artificiel découvert quelques années plus tôt par l'anglais C. Greville Williams¹¹. E.-J. Menier, qui avait une activité multiple, possédait une usine de produits chimiques à Saint-Denis. L'apparition et les premiers succès des matiè-

res colorantes préparées à partir du goudron de houille (la mauvéine de Perkin date de 1856) avaient certainement convaincu ce commerçant hors du commun du brillant avenir promis à ce nouveau marché. C'est sans doute alerté par une note de neuf lignes de Berthelot, dans le *Répertoire de chimie appliquée*¹², faisant référence à ses travaux (restés inédits) sur le violet d'aniline, qu'il prit contact avec le jeune et brillant professeur à l'École de pharmacie ; il lui proposa l'étude de ce nouveau colorant bleu dont la matière première était accessible à partir des alcaloïdes du quinquina, une des spécialités de sa droguerie. Ce n'est pas ici l'endroit pour entrer dans les détails de cette chimie de la classe des cyanines, à laquelle appartient ce bleu de quinoléine dont la constitution ne fut véritablement élucidée que vers les années 1900¹³. Berthelot était moins armé que quiconque pour trouver la solution de ce difficile problème de structure chimique, lui qui était persuadé que celle-ci ne relevait que d'une « *ingénieuse métaphysique* ». Menier devait par ailleurs, dès 1867, se défaire de sa fabrique de produits, qu'il céda à la Pharmacie générale de France.

Quant au bleu Guimet – l'outremer artificiel – observé une première fois par hasard en 1814 à l'usine de soude de Saint-Gobain, puis retrouvé et exploité par J.-B. Guimet dès 1828, Berthelot, que je sache, ne s'en occupa jamais. Bleu de cyanine, bleu Guimet, le biographe fanatique de Berthelot n'a semble-t-il vu que du bleu.

Si l'on excepte ce cahier de laboratoire miraculeusement conservé, les relations entre le professeur et le chocolatier ont laissé peu de traces ; sinon peut-être cette lettre curieuse conservée dans les archives de la famille Langlois-Berthelot :

« Mon cher Monsieur,

J'ai appris que vous avez demandé du chocolat chez moi et que vous désirez savoir la remise qui pourrait vous être faite.

Je m'empresse de vous faire savoir qu'en considération de nos rapports, je vous accorderai la plus élevée, soit celle de 10 %.

Veillez recevoir la nouvelle assurance de ma plus parfaite considération.

E. Menier

10 novembre 1865 »

On reconnaîtra que cette petite correspondance éclaire d'un jour assez blafard les relations entre le millionnaire et le professeur au Collège de France.

Résumons les deux thèses que j'ai essayé d'illustrer par quelques exemples historiques : 1° il a été longtemps indiscret, pour ne pas dire « mal élevé », de parler de l'activité industrielle ou commerciale de certains grands chimistes, bien que celle-ci n'ait rien eu d'exceptionnel ; 2° corollairement l'image du « vrai » savant veut qu'il soit incapable ou mieux encore qu'il considère comme indigne de valoriser ses découvertes.

Présentées sous cette forme volontairement polémique, ces deux thèses peuvent être évidemment discutées. On pourra leur opposer sans trop de mal certaines déclarations de savants comme Le Chatelier ou A. Haller

(que j'ai déjà cités) et qui ont souligné la nécessaire coopération entre la recherche académique et la pratique industrielle. Paul Sabatier (1854-1941), dans sa Conférence Nobel en 1912, ne refusait pas d'envisager toutes les conséquences économiques de sa découverte de l'hydrogénation catalytique. Je persiste cependant à croire que ces affirmations d'engagements personnels, véritables professions de foi individuelles, restaient minoritaires ; et même si elles étaient le fait de personnalités de premier plan, pour leurs collègues et pour le public, elles ajoutaient rarement à leur respectabilité.

VERS UNE PETITE RÉVOLUTION CULTURELLE

Je voudrais, pour terminer cet article, rendre compte de la longue survie de ces clichés et, finalement, de leur récente agonie. Les remarques qui précèdent n'ont en effet perdu de leur actualité que depuis à peine une ou deux décennies.

« Quelques semaines avant de recevoir le prix Nobel de chimie, Jean-Marie Lehn décidait de s'impliquer plus directement dans la recherche du groupe Rhône-Poulenc, en acceptant le poste de "conseiller scientifique auprès de la direction générale du groupe Rhône-Poulenc" pour la chimie. Une fonction qui comporte, comme devait le souligner Jean-René Fourtou, PDG du groupe, à l'occasion des journées de recherche Rhône-Poulenc, quatre missions : audit de la qualité de la recherche chimique du groupe, définition et supervision de l'exécution des programmes de recherche à long terme (au-delà de ceux définis par les divisions), ouverture vers l'extérieur et participation à la mobilisation des chercheurs, veille scientifique et technologique. Responsabilités qui vont, comme on le voit, très au-delà de celles d'un conseiller scientifique externe classique.

Cette forme d'association entre un industriel et un chercheur universitaire représente, du moins pour la France, une nouveauté sur laquelle il était nécessaire de faire le point. »¹⁴

La réelle nouveauté, à ce que je crois, tient dans la publication, dans une revue de large diffusion comme *Informations chimie*, du communiqué qu'on vient de lire, bien plus qu'à la situation et la pratique qu'il semble découvrir.

Marcel Delépine, qui fut un des prédécesseurs de J.-M. Lehn dans la chaire de chimie au Collège de France, se rendait chaque matin dans les laboratoires de cette même société Rhône-Poulenc, à Vitry : un travail de direction pour lequel il recevait un salaire mensuel¹⁵. Lorsque cet excellent chimiste, qui fut mon bon maître, présenta sa candidature de professeur au Collège de France, il avait cru honnête de faire part de cette situation à l'administrateur du prestigieux établissement, le célèbre romaniste Joseph Bédier, au cas où cette activité vénale aurait pu faire obstacle à sa nomination. Celui-ci l'avait rassuré en lui signalant que, pour son compte, ses droits d'auteurs l'aidaient à vivre, lui aussi.

Bref, aujourd'hui, à l'exemple de J.-M. Lehn, on ne craindrait plus de faire savoir que H. Sainte-Claire Deville

(1818-1881) appartenait à la direction de la Compagnie du gaz de Paris, qu'A. Haller suivait de très près les travaux de recherche de la Société des matières colorantes de Saint-Denis ou que P. Pascal (1880-1968) (celui du célèbre *Traité de chimie minérale*) était rétribué par les usines Kuhlmann.

S'il n'est plus considéré désormais comme diffamatoire d'associer le nom de tel ou tel scientifique reconnu à celui de la firme plus ou moins cotée qu'il éclaire de ses conseils et de sa compétence – moyennant, cela va de soi, quelques avantages pécuniaires sur lesquels il est toujours de mauvais goût d'insister –, il reste que les préjugés anciens restent vivaces, qui concernent l'inaptitude des savants à valoriser leur savoir.

Je ne suis pas certain que cette idée toute faite n'ait pas continué à fleurir pendant longtemps chez les « organisateurs » de la science publique¹⁶, plus encore que chez les industriels et les scientifiques eux-mêmes. Je crains d'ailleurs que, chez les planificateurs, cette idée n'en accompagne une autre, dont elle ne serait que le corollaire : le savant ne sait pas valoriser ses résultats *parce qu'il ne sait pas que ses résultats sont valorisables*. Cette modestie (ou cette ignorance) attribuée aux chercheurs est malheureusement (ou heureusement) inventée : ceux qui y croient font preuve, ce me semble, d'une grave méconnaissance des conditions réelles du développement de la recherche fondamentale et de la portée directe de ses résultats. La lecture des revues les plus prestigieuses de la chimie contemporaine peut convaincre n'importe quel esprit curieux que l'immense majorité des mémoires n'a qu'exceptionnellement des conséquences pratiques évidentes ou immédiates : rares sont celles qui pourraient donner lieu à des prises de brevets « rentables ». Et pourtant, il me paraît clair que les transformations d'une production ou d'un marché, celles qu'observe finalement le consommateur moyen, résultent presque toujours de l'accumulation et du rapprochement d'une multitude de « petits savoirs » plus ou moins fondamentaux. Ceux-ci relèvent rarement des tests qui mesurent la valeur marchande d'une découverte.

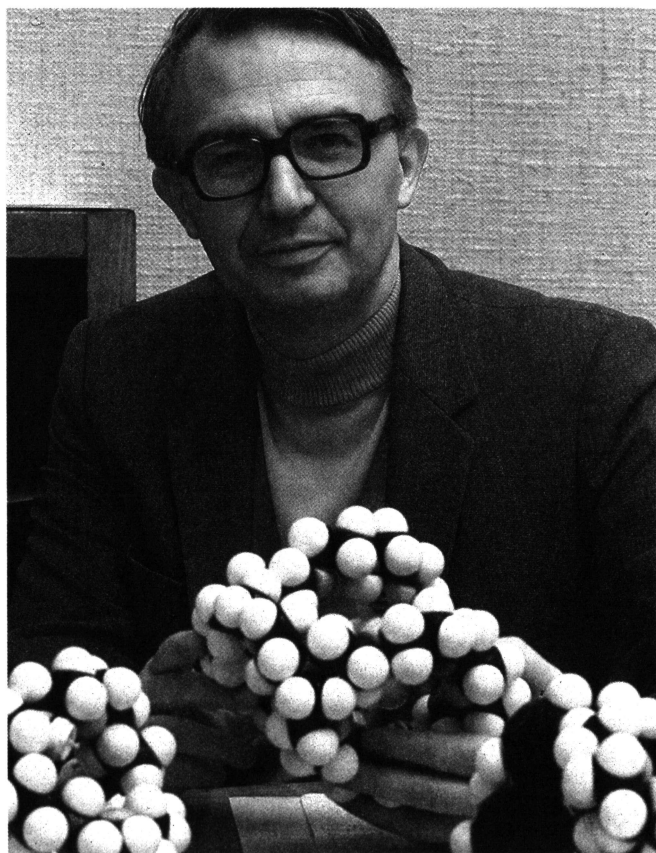
Il n'empêche que la liaison, jusque-là clandestine, entre la Science (née universitaire) et le Commerce industriel, a fini par être officiellement régularisée par une loi du 3 janvier 1967.

« Art.2. Il est créé, auprès du Centre national de la recherche scientifique, sous le nom d'Agence nationale de la valorisation de la recherche (ANVAR), un établissement public de caractère industriel et commercial, doté de l'autonomie financière.

Cet établissement a pour mission de concourir à la mise en valeur des résultats des recherches scientifiques et techniques effectuées par les entreprises et services publics et, notamment, par les laboratoires dépendant de l'Université et du Centre national de la recherche scientifique [...].

A cette fin, il prospecte les inventions, en assure la protection nationale et internationale, notamment par la mise au point et le dépôt des brevets correspondants, en respectant les droits des inventeurs et en agissant en accord avec ces derniers.

Il fait procéder à toutes opérations propres à préparer la mise en valeur de ces inventions, à l'exclusion des opé-



rations d'exploitation industrielle elles-mêmes. »

Au temps de ma jeunesse, je me suis permis d'ironiser sur cette sollicitude officielle et anonyme. « *Puisque les savants ne se passionnent que pour les problèmes de robinets posés par la plomberie de leur tour d'ivoire, il faut aider ces grands enfants distraits à inventer les tuyaux de descente qu'ils sont incapables d'imaginer tout seuls.* »¹⁷ La généralisation de la politique des contrats entre « professeurs et marchands » et le libéralisme aidant, ces propos sceptiques ont évidemment perdu de leur force.

A un journaliste qui lui transmettait récemment ce reproche qu'on (?) fait « *aux laboratoires publics de recherche de ne pas déposer assez de brevets* », le ministre de la Recherche et de la Technologie, Hubert Curien, faisait cette réponse qui dispense d'une conclusion plus originale :

« *La référence au nombre de brevets déposés par les laboratoires publics peut être discutée : c'est un indicateur qui allume effectivement un clignotant... Mais depuis une dizaine d'années, nous avons fait énormément de progrès en ce qui concerne les relations entre la recherche publique et les milieux industriels. Alors qu'il était parfois considéré comme curieux, pour ne pas dire suspect, pour un laboratoire public de travailler avec une firme industrielle, il est maintenant, au contraire, considéré comme étonnant qu'un organisme de recherche n'ait pas de contrat avec l'industrie.* »¹⁸

Il reste, pour l'historien et le sociologue, à préciser qui s'étonne et pourquoi. Et s'il y a vraiment lieu de s'étonner.

Notes

1. Cuvier, *Mémoires de l'Académie des sciences*, 1833, t. XII, p. XXXIX.

2. G. Kersaint, « Sur la fabrique des produits chimiques établie par Fourcroy et Vauquelin 23 rue du Colombier à Paris », *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, Paris, 1958, 247, p. 461.

3. G. Kersaint, « Sur une correspondance inédite de Nicolas Vauquelin » (1763-1829), *Bulletin de la Société chimique de France*, 1958, p. 1603.

4. M. Delacré, *Histoire de la chimie*, Gauthier-Villars, Paris, 1920, p. 271.

5. Un brevet d'invention français de quinze ans, délivré le 7 octobre 1842, « Procédé de fabrication de l'acide sulfurique », est signé par Lacroix, directeur de la fabrique de produits chimiques de Chauny (Aisne) et par Gay-Lussac, membre de l'Institut, demeurant l'un et l'autre chez Gay-Lussac, au Jardin des Plantes à Paris.

6. E. Blanc et L. Delhoume, *la Vie émouvante et noble de Gay-Lussac*, Gauthier-Villars, Paris, 1950.

7. Ch. Moureu, « Centenaire des découvertes de Chevreul sur les corps gras », *Bulletin de la Société chimique de France*, 1925, XXXVII, p. 1321.

8. In Marcelin Berthelot, *Pages choisies*, éditions. C. Crès et Cie, Paris, s. d. p. p. XXI.

9. B. Marrey, *Un capitalisme idéal*, éditions Clancier Guénaud, Paris, 1984.

10. Les *Notes de Marcelin Berthelot sur ses travaux et ses recherches à Noisiel de 1860 à 1864* ont été publiées en fac-simile par les soins d'un des fils de l'industriel, le sénateur Gaston Menier (1875-1934).

11. C. Greville Williams, *Répertoire de chimie appliquée*, t. II, 1860, p. 346.

12. *Répertoire de chimie appliquée*, t. I, 1858-1859, p. 284.

13. W. König, *Journal für praktische Chemie*, 1906, 73, p.100.

14. *Informations Chimie*, n° 288, novembre 1987, p. 107.

15. M. Delépine avait l'habitude d'écrire ses brouillons au dos de la correspondance qu'il recevait : je possède de lui un dossier intitulé « Papiers écrits d'un côté, bons à utiliser ». J'ai trouvé deux avis de crédit qui émanent de la comptabilité de Rhône-Poulenc et qui datent d'octobre 1929 et d'avril 1947 : ils portent respectivement sur 4 166,65 et 4 167 francs de l'époque ; ils figurent au dos de notes manuscrites qu'il m'avait confiées, et qui concernent l'histoire de la chimie.

16. Voir par exemple : Michel Massenet, *Rapport sur l'emploi scientifique*, la Documentation française, Paris, 1979.

17. J. Jacques, *les Confessions d'un chimiste ordinaire*, le Seuil, Paris, 1981, p.96.

18. *Le Monde*, « l'Effort de recherche au risque de la finance », 2 mars 1990.

Jean-Marie Lehn (né en 1939), prix Nobel de chimie en 1987.

L'industrie chimique française au tournant de la seconde industrialisation (1860-1939)

Jean-Pierre Daviet

Dans le but d'explorer le destin de la chimie française contemporaine, il est commode de fixer à l'analyse un point de départ qui pourrait se situer aux alentours de 1860¹. Pourquoi cette date ? Pour la première fois, peut-être, les Français se donnent un regard comparatif, du fait du traité de libre-échange avec le Royaume-Uni. Même si on exagère sur le moment sa portée, si certaines alarmes rejoignent le fantasme, une inquiétude latente se discerne, et d'importantes restructurations sont agitées dans les esprits. En réalité, on se trouve à la fin d'une première onde de croissance, celle de la première industrialisation, qui a épuisé ses effets, et aussi à la veille de changements importants (soude à l'ammoniaque de Solvay, démarrage d'une industrie chimique des engrais, promesses de la chimie organique). Quel est alors le paysage ? Il convient de distinguer deux industries chimiques. Il y a d'abord une petite chimie de spécialités, chimie d'ateliers de dimensions modestes, d'usines légères, aux techniques très diverses, reliées à des marchés utilisateurs qui touchent à la pharmacie ou à la parapharmacie, à la droguerie, à la teinturerie, à la parfumerie, parfois à l'agro-alimentaire. C'est, entre autres fabrications, une chimie minérale de l'anhydride arsénieux, du bore, du brome, de l'iode, d'oxydes et de sels de divers métaux

comme l'antimoine, l'argent, le baryum, le chrome, le cuivre, l'étain, le magnésium, le manganèse, le plomb, le zinc, le fer. C'est aussi une chimie organique d'ancien type, c'est-à-dire d'extraction, et non de synthèse, à partir de suif, dont on tire acides oléique et stéarique, à partir du sang des abattoirs (albumine), d'os (colles), de dépôts vinicoles (acide tartrique), d'arbres tropicaux (écorce de quinquina pour la quinine, bois brasil), de plantes tinctoriales, aromatiques ou médicinales (opium, belladone, girofle, etc.). Cette petite industrie chimique fabrique des produits chers et peu pondéreux, très demandés dans de nombreux pays, d'où un fort courant d'exportation (plusieurs dizaines de milliers de francs) à partir de la France, parfois jusqu'en Russie ou aux États-Unis.

Il existe une autre chimie, la grande industrie chimique, chimie minérale lourde, qui est encore à cette date bâtie sur le procédé Leblanc, dans des usines plus vastes, que l'on appelle couramment les « soudières » : fabrication d'acide sulfurique, décomposition du sel marin par attaque sulfurique, produits chlorés (acide chlorhydrique, chlorures et chlorates), produits sodés (sulfate de soude et carbonate de soude). En ce sens, la grande industrie chimique minérale peut être perçue comme une filière qui repose sur l'acide sulfurique, souvent qualifié de « pain de la chimie ». La France produit annuellement 250 000 tonnes d'acide sulfurique (réduit en tonnage d'acide pur MHS, monohydrate sulfurique) dans des chambres de plomb au milieu des années 60 du XIX^e siècle, et les soudières emploient autour de 10 000 personnes (une vingtaine d'entreprises). La petite industrie chimique, difficile à cerner dans la mesure où elle ne correspond guère aux catégories de la statistique officielle de la France, regroupe environ 30 000 personnes (3 000 à 4 000 entreprises), si on y inclut les fabriques de matières résineuses, huiles, savons, tartre, soufre, salpêtre, encres, vernis, colles, distillation, parfumerie, produits pharmaceutiques, matières de teinture. Elle est surtout présente à Paris et dans sa banlieue, à Marseille, à Bordeaux, à Lyon, dans l'Hérault, le Vaucluse, le Nord et le Bas-Rhin ².

Néanmoins, ce décor va peu à peu évoluer. La grande industrie chimique minérale semble perdre de son unité dans le dernier quart du siècle, avec des procédés nouveaux, qui s'écartent totalement du procédé Leblanc : fabrication de la soude à l'ammoniacale (en France à partir de 1872), électrolyse de solutions de sels marins (expériences sur les chlorates vers 1886-1888), synthèse de l'ammoniac (Allemagne, 1913). L'acide sulfurique garde une fonction essentielle dans la vie économique, mais avec d'autres débouchés (engrais, par exemple). Il en résulte que l'industrie chimique minérale lourde se partage de plus en plus en divers types d'établissements. On voit se développer une industrie chimique organique de synthèse, se répartissant entre la grosse industrie chimique organique (produits intermédiaires, matières de départ comme benzène, anthracène, naphthalène, acide acétique, bientôt l'acétylène par la voie du carbure de calcium, et dérivés proches, tels le phénate de sodium, le phénol, le nitrobenzène, l'anhydride maléique, l'antraquinone) et la chimie organique spécialisée (colorants, pharmacie, dro-

gues de synthèse, on peut dire, en simplifiant énormément une évolution complexe, qu'on a vu s'épanouir un premier groupe de recherches assez empiriques autour des dérivés du benzène et du benzol (aniline, mauvéine, fuchsine, 1856-1860), puis de la découverte due à Graebe de l'intérêt des dérivés de l'anthracène (alizarine, 1868), et enfin, à partir de recherches de Baeyer, des dérivés du naphthalène (indigo, 1880, fabrication industrielle à grande échelle au cours des années 90 par BASF). En pharmacie, on travaille sur des dérivés du benzène, types arsénobenzol (traitement de la syphilis), acide salicylique (aspirine), malonylurée (barbituriques), résorcine et salol (produits antiseptiques), antipyrine, de l'anthracène (quinoléine), ainsi que sur des corps de la série éthylique (chloral, éther) ou de la série méthylique (chloroforme, bleu de méthylène). La première matière plastique de synthèse à connaître un certain succès est la bakélite, dont Baekeland dépose le brevet en 1907 : la molécule géante se forme par association de deux corps à molécule moins complexe, le formol et le phénol, ce dernier issu du benzène. Tout cela établit les avantages d'une chimie de synthèse fondée sur des corps extraits du charbon, procédant par nitration, halogénéation, oxydation et union entre diverses molécules. C'est là une industrie du savant et de l'ingénieur de laboratoire, maniant des kilogrammes plus que des centaines de tonnes, à coups de nombreux essais et tâtonnements.

La chimie se trouve dès lors confrontée à des impératifs divers, parfois contradictoires : impératifs de la science (le problème du laboratoire industriel de recherche se pose dès 1880), de la mécanisation (importance de la manutention sur de gros tonnages dans la chimie traditionnelle), des appareillages (recours à des tuyauteries en alliages de types particuliers, dispositifs de catalyse, bientôt hautes pressions), du contrôle et des mesures (alors que l'on jugeait encore jusqu'ici sur des couleurs de fumée, des odeurs, des sensations tactiles), de l'investissement, de l'adaptation au marché. Les changements qui en découlent peuvent se ranger sous la notion un peu vague de deuxième révolution industrielle, ou de seconde industrialisation.

La France n'aborde pas cette mutation dans de très bonnes conditions. Les raisons que l'on peut invoquer sont pour une part intellectuelles (manque de bons ingénieurs chimistes de recherche), financières (lenteur à percevoir le rôle du laboratoire de recherche industrielle, alors que l'on compte exclusivement sur la recherche universitaire, elle-même mal lotie ; incertitudes dans la stratégie des firmes), commerciales (hésitations devant le grand marché de masse, en agriculture ou en textile particulièrement). Les produits de départ de la chimie organique, à commencer par le benzène, sont souvent issus des usines à gaz des villes, ainsi que des cokeries, dont la politique générale est beaucoup moins dynamique qu'en Allemagne. L'excellence même de la vieille chimie organique d'extraction en France a pu être un obstacle, alors que l'Allemagne avait besoin de créer du neuf. Il n'en reste pas moins que l'on assiste à un développement très réel en France, puisque la

Affiche publicitaire pour les engrais chimiques de Saint-Gobain par Hugo d'Alesi, vers 1900.

SOCIÉTÉ DE S^t GOBAIN

FONDÉE
en
1665



Engrais Chimiques

12 USINES

Production Annuelle 450 Millions de K^{os}

S'ADRESSER

à la Direction commerciale
des produits chimiques

PARIS: 9, Rue S^{te} Cécile

REPRODUCTION INTERDITE
Sous le N^o 10000 VALLES
à Paris



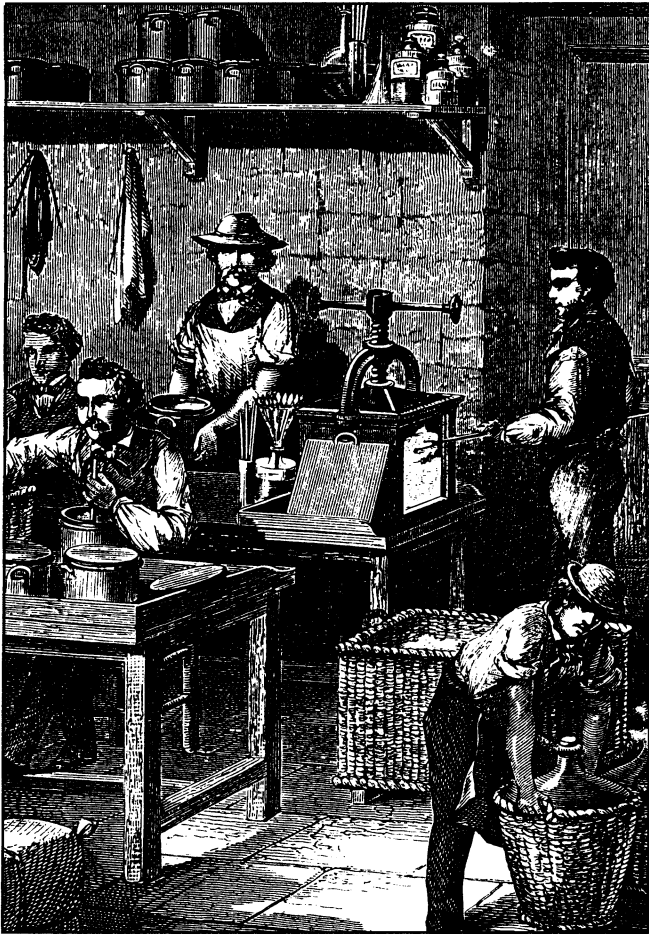
grande industrie chimique minérale (engrais compris) emploie 35 000 personnes avant 1914, les autres industries chimiques diverses, 85 000 personnes (avec les mêmes frontières qu'en 1860, mais des fabrications nouvelles, telles que les produits de l'électrochimie, les explosifs, le raffinage des huiles de pétrole, etc.). La croissance annuelle moyenne d'ensemble en volume a été de l'ordre de 3 % par an³.

FUSIONS, ENTENTES, IDENTITÉS CULTURELLES (1860-1914)

Une réflexion plus poussée sur les mutations nécessaires de la fin du XIX^e siècle doit naturellement tenir compte de facteurs proprement scientifiques, comme des réalités de l'enseignement français, qu'il s'agisse des écoles d'ingénieurs (Polytechnique semble réticente à accueillir la nouvelle chimie dans son enseignement, mais l'industrie chimique française emploie environ 1 000 ingénieurs ou cadres techniques assimilés vers 1914, et il faut se poser la question de leur efficacité) ou d'écoles techniques formant des techniciens (les essayeurs chimistes formés par l'école de la Martinière sont très demandés, mais où trouver les 2 000 ou 3 000 chimistes nécessaires?). Nous nous attacherons cependant ici à la dynamique interne des grandes firmes chimiques françaises, en privilégiant l'exemple de Saint-Gobain comme une sorte de tour d'observation des stratégies chimiques conçues dans les entreprises.

Au cours des années 60 du XIX^e siècle, la direction supérieure de Saint-Gobain, une affaire mi-verrière, mi-chimique, est dominée par la figure de deux inséparables amis du conseil d'administration, Albert de Broglie (vice-président, puis président) et Augustin Cochin (vice-président lorsque Albert de Broglie prend la présidence). Or, au moment où Augustin Cochin commence à se passionner pour la chimie (alors que sa formation est juridique, politique, littéraire) et recueille toute la documentation disponible dans les années 1864-1865, son impression très nette est celle d'un retard technologique par rapport à la chimie anglaise. A Chauny, l'unique usine chimique de Saint-Gobain jusqu'en 1866, se poursuit le règne d'Arthur Lacroix, remarquable directeur, ayant un très gros ascendant sur les ouvriers, qui meurt en 1864. Esprit ingénieux et observateur, c'est cependant un autodidacte fils de contremaître, entré au travail à douze ans. Il a paru d'abord bien réussir. En 1850, l'acide sulfurique servait presque exclusivement à la décomposition du sel marin à la soudière : un nouveau marché de l'acide s'ouvre, car certains industriels de la chimie fine l'utilisent pour fabriquer des spécialités, de même que les savonneries et huileries. Le sulfate de soude est pour moitié vendu à l'extérieur, essentiellement à des verriers, pour moitié transformé en carbonate de soude. Pour les trois quarts, l'acide chlorhydrique est transformé en produits chlorés

Emballage de la dynamite à la fabrique de Paulilles (Pyrénées). Extrait des Merveilles de la science, supplément vol. 2.



élaborés, principalement le chlorure de chaux. L'outil de production tel qu'il se présentait à la fin de la monarchie de Juillet était excellent pour l'époque : il suffit d'investissements additionnels peu coûteux et assez légers pour faire face à l'expansion.

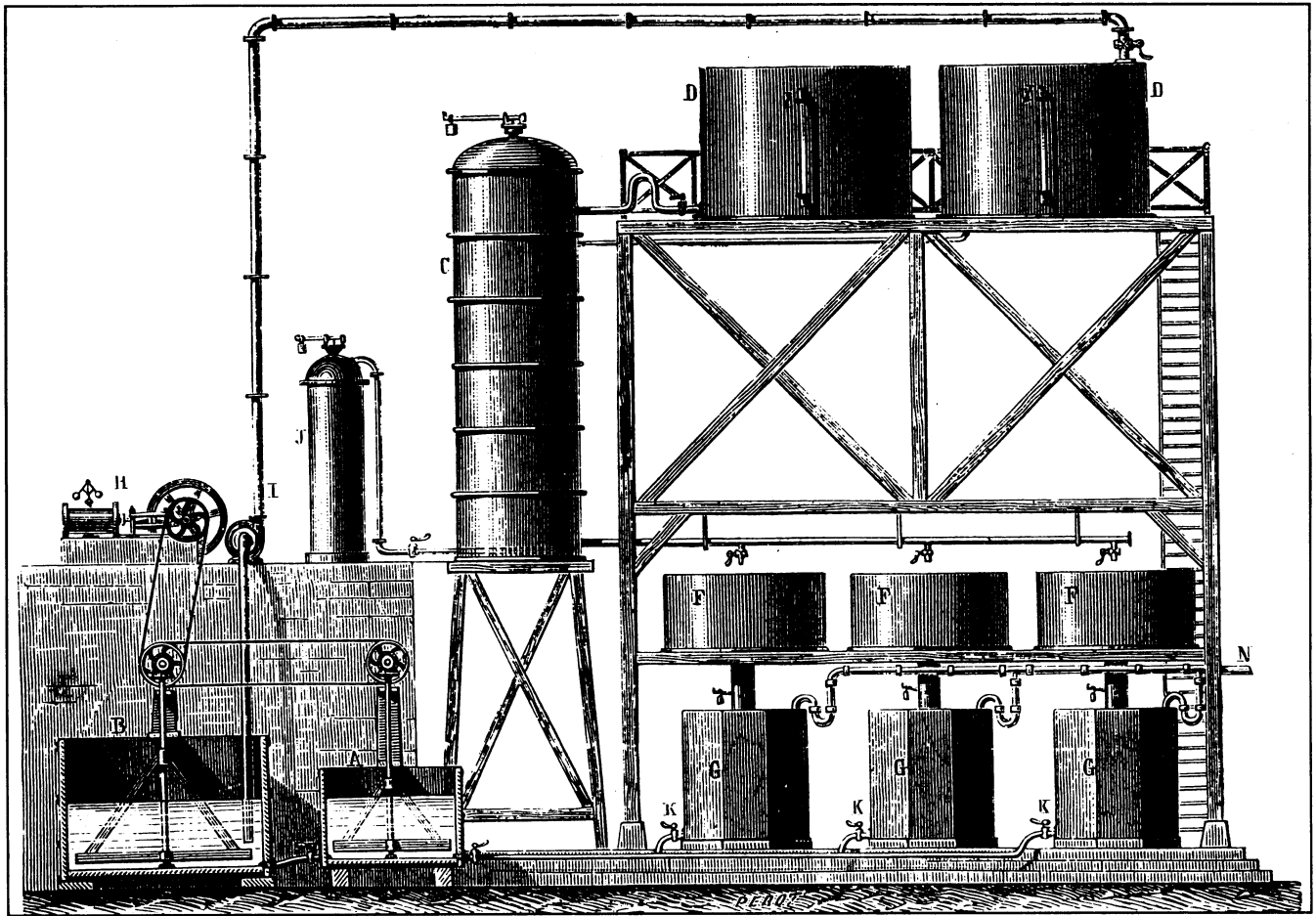
Le réveil des années 60 semble tourmenté. La chimie lourde française paraît affronter un défi que ne connaît pas la chimie fine des spécialités, fortement exportatrice de produits réputés (peut-être un quart de sa production). Les importations d'acide sont négligeables, celles de sulfate de soude comptent pour 2 % du marché national, mais celles de sodas pour 10 à 15 % au cours de la première moitié des années 60, ce qui oblige à abaisser les prix de vente. A l'exportation, on se trouve dans une période de concurrence internationale plus vive, surtout du fait des progrès des soudières anglaises. Saint-Gobain accroît son outil en achetant en 1866 l'usine d'Aubervilliers, qui permet d'alimenter le marché parisien (30 % des débouchés de Chauny en 1850). Il faut continuer à investir, mais l'investissement paraît alors plus lourd à supporter que dans la décennie précédente : on reconstruit des bâtiments, on améliore un peu certains appareillages comme les fours à sulfate de soude, on prévoit des programmes plus ambitieux. Il existe ainsi vingt-deux chambres de plomb pour fabriquer l'acide sulfurique dans l'usine de Chauny en 1870, contre sept en 1850, et la disposition d'ensemble de l'usine a beaucoup changé, surtout après 1860. Cependant, si l'investissement paraît écrasant, alors même que la marge bénéficiaire se réduit singulièrement, la qualité technique laisse à désirer.

Ce n'est pas le fait uniquement de Saint-Gobain, mais de l'ensemble de la chimie française. Pour les chambres de plomb, les Anglais ont introduit la tour de Glover vers 1860, inconnue en France avant 1870. Une autre innovation encore inconnue est le four à soude mécanique. Enfin, il existe un problème des produits chlorés, qui sont très onéreux. Pour extraire le chlore de l'acide chlorhydrique, on fait intervenir de l'oxyde de manganèse, relativement rare : le procédé Weldon consiste à régénérer en quelque sorte le manganèse. Les premiers essais de Chauny datent de 1871-1872 pour un procédé parallèle qui échoue, et le procédé Weldon lui-même est adopté en 1874, avec une dizaine d'années de retard. Fait plus grave, Saint-Gobain a laissé passer une occasion de contrôler un nouveau cycle chimique, celui de la soude à l'ammoniaque, destiné à remplacer le cycle Leblanc. Le procédé est expérimenté, bien avant Solvay, par deux chimistes français, Schloesing et Rolland, de 1855 à 1858 à Puteaux. En 1856, Saint-Gobain aurait pu financer ces essais, mais on estima alors que la législation fiscale rendait le procédé peu intéressant. En 1852, un décret avait soumis à l'impôt le sel utilisé par les soudières, renchérissant de 20 à 25 % les matières fondamentales utilisées par l'industrie chimique.

Dans le cycle à l'ammoniaque, on n'utilise pas du sel en cristaux, mais de l'eau salée, dont une partie ne subit aucune réaction. L'administration prétendait faire payer à Schloesing et à Rolland un impôt sur la totalité du sel dissout dans l'eau, non sur le sel réellement entré en réaction ; il en résultait une dépense qui annulait l'avantage du procédé en prix de revient.

Les interrogations des années 60 expliquent une nouvelle démarche stratégique d'Augustin Cochin et d'Albert de Broglie. L'idée est de rationaliser et de moderniser la chimie française en redéfinissant les visées de Saint-Gobain. Les choses démarrent en juillet 1865, par l'idée d'une fusion avec Kuhlmann. Elles suivent un chemin très sinueux, où il est question d'une fusion à trois incluant Perret-Olivier de Lyon, et aboutissent en 1872 à la fusion tant attendue avec la seule maison lyonnaise. D'interminables discussions, conflits et rebondissements, il faut surtout retenir l'illustration d'une interpénétration entre identité culturelle et problèmes de gestion industrielle. Une pure logique technologique aurait sans doute conduit à une fusion plus rapide. Les caractères spécifiques des gouvernants des entreprises intéressées expliquent les hésitations. Lorsque l'on parle de fusion avec Kuhlmann en 1865, il est entendu que cela entraînerait l'entrée de Frédéric Kuhlmann au conseil de Saint-Gobain : les apports seraient à définir, mais il pourrait détenir jusqu'à 15 % du capital de la compagnie, soit, à lui seul, trois fois plus que le conseil existant, et il est évident que cela n'enthousiasme personne. Son entreprise vivait en entente avec Saint-Gobain depuis 1838 pour alimenter le marché du nord, mais deux inconvénients apparaissaient : le contact avec Broglie et Cochin n'était pas très bon, Frédéric Kuhlmann affectant de les traiter de haut, et son outillage n'était en

Préparation du fulmi-coton (trempage dans les acides et expression du produit) à la manufacture du Bouchet vers 1850. Extrait des Merveilles de la science, vol. 3, 1867-1869.



Appareil Weldon pour la production du chlore. A, appareil avec agitateur mécanique pour la saturation du chlorure de manganèse par la craie. B, appareil avec agitateur mécanique où se déverse le chlorure de manganèse neutre. C, tour d'oxydation. D, réservoir contenant le lait de chaux. E, réservoir contenant le chlorure de manganèse. F.F.F, réservoirs dans lesquels le dépôt de manganite de chaux se dépose après l'oxydation de la tour C, et où il est séparé après décantation du chlorure de calcium. G.G.G, appareils de grès octogonaux où l'on décompose par l'acide chlorhydrique le manganite de chaux tombant par les soupapes des réservoirs F, F, F, et où se produit le chlore. Au moyen des robinets K, K, K, on fait écouler le chlorure de manganèse dans les appareils A et B pour la saturation. H, machine à vapeur comprimant l'air dans le réservoir J, et faisant fonctionner la pompe I, laquelle aspire le chlorure de manganèse de B en E. I, I, niveaux permettant de mesurer la quantité de lait de chaux et de chlorure de manganèse à verser dans la tour C. N ; N, N, tuyaux en grès servant de conduite de dégagement au chlore. (Extrait de la Nature, 31 juillet 1880).

réalité guère meilleur que celui de Saint-Gobain. La fusion aurait juxtaposé des usines pas très loin de tomber en désuétude plus qu'elle n'aurait introduit une synergie. L'affaire ne se serait avérée intéressante que si Kuhlmann avait réduit ses prétentions. On fait traîner la négociation en longueur, à Saint-Gobain.

Il se trouve qu'en 1866, Saint-Gobain entre en relations avec Perret-Olivier, à l'occasion du rachat d'Aubervilliers qui aurait pu intéresser la maison lyonnaise. En étudiant la question des prix de revient, Augustin Cochin avait constaté que la substitution des pyrites au soufre italien diminuait le coût total des matières à consommer de 10 % : on conclut un accord de livraison de pyrites avec Perret-Olivier qui exploitait la mine de Saint-Bel. Les frères Perret désiraient en fait se retirer, et ils firent savoir que leurs actifs pouvaient être rachetés. L'équipe Broglie-Cochin croit alors avoir résolu le problème Kuhlmann : dans une fusion à trois, la synergie existe du fait des pyrites, et la personnalité énigmatique et difficile de Frédéric Kuhlmann est noyée dans un ensemble plus vaste. On aurait formé une société des Soudières françaises, distincte de Saint-Gobain, ce qui aurait évité de mettre

Frédéric Kuhlmann dans les affaires de glaces. Tout le problème était de fixer la valeur des actifs respectifs. Dans un premier temps, le conseil de Saint-Gobain donna un avis favorable à la poursuite de la discussion en s'imaginant que la compagnie pourrait dominer les soudières associées. Derrière de faux prétextes, les deux années 1867 et 1868 sont remplies de disputes sur des estimations qui engagent un problème de pouvoir. La fusion échoue en juillet 1868, sous les coups d'un clan hostile à l'intérieur du conseil de Saint-Gobain : mais Frédéric Kuhlmann lui-même n'y était plus très favorable pour des raisons exactement symétriques. Avec des rachats d'actifs aux Perret, la dernière combinaison attribuait 45 % à Saint-Gobain : trop peu aux yeux du clan conservateur, mais trop aux yeux de Kuhlmann.

La fusion de 1872 réussit grâce à des facteurs favorables : retrait de Kuhlmann, accord des frères Perret et de leur beau-frère, Jules Olivier, pour être payés en actions de Saint-Gobain, pas en argent frais, engagement moral de leur part à ne pas troubler le jeu en assemblée générale, malgré l'importance de leurs paquets d'actions. Le nouvel outil chimique contribuait pour 40 % à l'alimentation du

marché national des grands produits de base, et Augustin Cochin pouvait s'estimer satisfait d'avoir trouvé une solution aux maux observés. Cependant les années 70 et 80 sont incertaines et moroses. Trois raisons expliquent un certain désenchantement : importance de la modernisation à engager, triomphe du procédé Solvay de soude à l'ammoniaque, crise de direction. Excepté pour les fours à pyrites, les Perret ne fournissaient pas une technologie supérieure, ni d'ailleurs un corps d'ingénieurs. L'un des premiers grands programmes consiste même à rénover complètement l'exploitation de la mine de pyrites de Saint-Bel, qui est leur meilleur apport. Dans les usines chimiques, toutes les chambres de plomb sont progressivement déclassées et remplacées par des chambres plus grandes à meilleur rendement, les fours à sulfate de soude sont améliorés, les fours à soude sont mécanisés, le Weldon est installé, en attendant le procédé Deacon de fabrication de chlore adopté en 1888. Cet effort d'équipement a lieu précisément au moment où la soude à l'ammoniaque est en voie de l'emporter.

C'est en 1872, l'année même de la fusion, que Solvay s'implante à Varangéville-Dombasle, en profitant d'un certain désarroi des salines de la région après le partage de la Lorraine opéré en 1871. En 1890, Solvay fabrique la moitié de la soude mondiale, avec des usines dans sept pays et un chiffre d'affaires trois fois supérieur à celui de la branche chimique de Saint-Gobain. C'est l'exemple d'une ambition multinationale, le pays souche, la Belgique, ne comptant que pour 4 %, contre 30 % à l'Angleterre, 23 % à la France et à l'Allemagne, 14 % aux Etats-Unis, 3 % à l'Autriche et à la Russie. La réaction de Saint-Gobain n'est pas simple. Fondamentalement, la politique chimique de la compagnie après 1872 est une politique de l'acide sulfurique, qui crée la moitié de la valeur ajoutée des usines chimiques. Il y a là un parallèle avec l'industrie des glaces : confiance en un produit sûr, dont l'utilisation se développe à long terme, gagée sur la possession d'importantes réserves de pyrites. Faut-il dès lors se cantonner dans ce domaine, ou bien essayer de lutter avec Solvay ?

L'objectif des gouvernants de l'entreprise n'est pas de dominer la chimie française : le développement qu'ils imaginent n'est pas celui d'une branche, en tout cas plus après l'échec de la grande fusion de 1868. La création d'une société indépendante des soudières françaises aurait effectivement introduit une logique propre, indépendante de celle des glaces, à supposer du moins que cette société ait trouvé un chef de file. La perspective qui prévaut après 1872 est de préserver Saint-Gobain comme entreprise double, mi-verrière, mi-chimique. Il paraît logique que la chimie crée un chiffre d'affaires et un bénéfice qui se comparent à ceux de glace, ce qui paraît suffisant. Il s'agit de défendre un potentiel, non de tout couvrir dans une industrie fort diverse, qui prolifère dans bien des directions. En ce sens, on ne trouve à aucun moment référence à l'intention, exprimée à la Direction générale des glacières, de tenir une part significative du marché, de garder un rang à définir dans la chimie française. Tout le monde semble d'accord là-dessus après 1872, mais des nuances se font jour à propos des moyens d'impulsion et de certaines chances à saisir. Les Perret font retarder jusqu'en 1878 un

projet d'essais de soude à l'ammoniaque. Une autre personnalité intéressante est le chimiste Edme Frémy, conseil chimique après la mort de Pelouze, et administrateur de 1872 à 1893. Il est en grande partie responsable du vaste dessein de modernisation des usines après la fusion. Il fait déménager à Paris, en 1875, un laboratoire d'analyse, de contrôle et d'essai qui était précédemment installé à Chauny. Il a certainement poussé aux essais de soude à l'ammoniaque de 1878 à 1881 : ces derniers sont abandonnés au moment où une fabrication semi-industrielle à Saint-Fons permet d'atteindre un prix de revient honorable. Le but était d'étudier des appareillages pour installer la nouvelle fabrication en cas de nécessité, mais le pas n'est alors pas franchi. Frémy reste très classique dans ses choix : il définit la vocation de la branche chimique comme une prépondérance dans ce qu'il appelle la grande industrie chimique. Cette grande industrie chimique correspond à l'acide sulfurique et à ce qui en dépend, à savoir produits chlorés et sodés issus de la décomposition du sel marin.

En 1877, on recrute un chimiste polytechnicien de grande valeur, Albert Colson, pour diriger le laboratoire de Paris. L'épisode est important comme tentative de développer une structure de recherche et d'innovation originale en son temps, en réponse aux doutes sur l'acide sulfurique. Albert Colson travaille naturellement sur la soude à l'ammoniaque, sur des améliorations à apporter au procédé Weldon, pour développer la chimie du chlore, et aussi sur de nouveaux usages de l'acide sulfurique dans la fabrication des engrais. Il démissionne cependant au bout de trois ans, parce qu'on ne veut pas d'un laboratoire trop puissant, et qu'on n'applique guère ses idées : il devient répétiteur à l'école polytechnique et conduit alors d'importantes recherches en chimie organique. Ces faits témoignent d'un certain flottement dans l'orientation chimique, l'accord se faisant sur une mort lente de la seconde phase du procédé Leblanc (carbonate de soude) – ce qui justifie les ententes avec Solvay – et sur la persistance d'un rôle important de l'acide sulfurique. La grande entente des soudes date de 1887, mais elle est préparée, au cours des années 80, par un regroupement des producteurs Leblanc, qui doivent se présenter comme un front pour négocier avec Solvay.

Un virage stratégique important se produit entre 1886 et 1892, date de construction de l'usine de Balaruc (Hérault) : c'est l'entrée dans une ambitieuse politique des superphosphates. Vers 1890, les superphosphates étaient encore produits dans les usines classiques de la compagnie : Chauny, la plus vieille usine chimique de Saint-Gobain, Marennes, l'Oseraie, venues de Perret-Olivier, et Montluçon, nouvelle installation de 1872, montée en annexe de la glacerie. Ils n'absorbaient qu'un quart de l'acide sulfurique fabriqué, dont près de la moitié était vendue au dehors. En 1913, les superphosphates de Saint-Gobain absorbent 60 % de l'acide sulfurique. La quantité d'acide sulfurique réduite en tonnage d'acide pur non dilué est passée de 140 000 tonnes en 1890 à 450 000 tonnes en 1913 : les superphosphates ont bien été le gouffre à acide sulfurique susceptible de renouveler pour un temps la vocation chimique de Saint-Gobain. Les

superphosphates sont un engrais peu concentré, avec énormément de ballast et 15 % d'éléments fertilisants : il en découle un coût de transport assez élevé par unité, et il y a intérêt à multiplier les petites usines situées dans les principales régions agricoles. On avait jusqu'alors conçu les ateliers de superphosphates comme des annexes des installations existantes.

Si Saint-Gobain souhaite à la fois participer au mouvement d'essor des superphosphates et accroître sa part de marché, l'accessoire doit devenir le but principal, et il faut un outil de production à implantation géographique rationnelle. Il s'agit d'une fabrication lourde, nécessitant des appareillages importants et une grosse part de génie chimique. Si le nombre des usines est élevé, elles marchent du même pas, avec des consignes strictes : les qualités d'organisation méthodique de Saint-Gobain font merveille sur ce terrain. De nouvelles usines chimiques s'ajoutent donc aux anciennes, en deux vagues, l'une de 1892 à 1900 (Balaruc, Montargis, Tours, Bayonne, Bordeaux, Agen, Périgueux, Nantes, Tonnay-Charente), l'autre de 1907 à 1910 (Poitiers, Ivry, Rouen, Toulouse, Le Mans, Vitry). L'amarrage aux superphosphates a redonné une prospérité à la branche chimique, qui concourt pour 62 % aux bénéfices de la compagnie de 1890 à 1913. Au cours de cette période, c'est l'axe de toutes les préoccupations. Il faut non seulement construire ou parfois racheter des usines, jusqu'à couvrir près de la moitié du marché français (le programme d'investissements en usines atteint une soixantaine de millions de francs), mais encore pourvoir aux approvisionnements (prospection de gisements de phosphates en France, achats en Afrique du Nord à partir de 1896, achats de mines de pyrites en Espagne à partir de 1911) et agir sur la demande. Le directeur commercial, Félix Mayoussier, se fait nommer en 1894 président de la Société d'encouragement pour développer l'emploi des engrais chimiques qui publie de très nombreuses brochures pratiques et la revue *la Culture intensive illustrée*, tout en soutenant le journal *l'Engrais*.

Le bilan de ce développement chimique semble un peu ambigu à la veille de la Première Guerre mondiale. Le point fort est la solidité de l'outil de production en chimie classique. Même en soude à l'ammoniaque, Saint-Gobain réussit en douceur sa reconversion par le rachat, décidé en 1901 et rendu effectif en 1907, de la soudière de Varangéville (soudières de la Meurthe). Pour l'acide sulfurique, les chambres de plomb comptent toujours pour 90 % de la fabrication, mais ont été améliorées : elles sont plus grandes, ont reçu des fours mécaniques à pyrites et des dispositifs de réglage de la marche. Le procédé de contact a été installé à partir de 1901 : appareillage Mannheim à Aubervilliers et Saint-Fons, appareillage Badische Anilin à l'usine de Pierre-Bénite rachetée en 1905, appareillage Tentelewa acheté en 1912. Pour le chlore, les Deacon de Chauny et Saint-Fons couvrent un tiers des besoins français, malgré l'apparition du chlore électrohydrique. A plus long terme, la faiblesse réside dans la timidité d'une chimie nouvelle de l'acide sulfurique.

Certes, on sent un esprit nouveau à la Direction générale des usines de produits chimiques à partir de 1907, grâce à Edmond Delage, le nouveau directeur général des



usines de produits chimiques. Il a bien classé les nouveaux problèmes chimiques : électrochimie et chimie des hautes pressions pour les réactions, chlore et azote pour les produits de base, chimie de synthèse pour les matières de la vie quotidienne. Il voudrait les affronter, mais des retards ont été pris, des pesanteurs le gênent. En 1888 Montlaur avait proposé à Saint-Gobain l'idée de l'électrolyse de solutions aqueuses de chlorure de sodium et de potassium. De 1897 à 1906, un atelier expérimental d'électrolyse avait fonctionné à Chauny, mais il est arrêté parce que jugé peu satisfaisant. Edmond Delage penche pour le procédé Castner-Kellner, qui est détenu par Solvay : or il faut renouveler l'entente des sodes tous les dix ans depuis 1887. On s'oriente d'abord vers une électrochimie liée à l'azote, d'une part par le biais du carbure de calcium, d'autre part par le procédé de l'arc électrique. Après des recherches de chutes d'eau en 1911 sur la Truyère et sur différents sites des Alpes, des programmes d'équipement sont mis en œuvre sur la Durance (La Roche de Rame, 1912) et en Haute-Maurienne (1913), mais restent à l'état d'esquisse lorsque survient la guerre. Parallèlement, impressionné par les essais menés à Oppau, Edmond Delage négocie en octobre 1913 l'achat du procédé Haber de synthèse directe de l'ammoniaque, mais se heurte à un refus allemand. Un petit pas est fait vers la chimie organique en 1907-1908 : Saint-Gobain contribue au lan-

M. Balhazard, chimiste employé à la Société chimique des usines du Rhône, photographié en 1897 à l'usine de Saint-Fons. Cette Société, fondée en 1895, fusionna en 1928 avec la Société anonyme des établissements Poulenc Frères.



cement d'une usine de Saint-Fons qui fabrique du celluloïd (nitro-cellulose).

Rien de tout cela n'a débouché en grand en 1914. Saint-Gobain souffre d'une absence de recherche interne, de la difficulté à produire de l'innovation dans les structures existantes, et aussi du carcan des ententes. L'industrie française n'a pas de vrai pôle. Depuis 1896, elle vit sous le régime du partage des tâches. Les ententes ont une fonction régulatrice utile, mais, faute de confiance entre partenaires, ne débouchent pas sur une vision harmonisée d'un avenir de la chimie française. L'identité culturelle symbolisée par Saint-Gobain (20 % de la grande industrie chimique minérale classique, mais 6 % de l'ensemble de la branche chimique au sens large, peut-être 15 % d'une branche chimique définie plus rigoureusement selon les normes d'aujourd'hui) est celle d'une entreprise qui possède un bon corps d'ingénieurs (0,6 % des effectifs du département chimique, dont 16 % sont polytechniciens, 30 % centraliens, 27 % diplômés d'autres écoles, principalement les mines, 27 % ingénieurs « maison »), mais ne trouve guère de chemins inédits, connaît mal les nouveaux marchés en dehors de engrais, reste très fidèle à la politique des ententes (participations à dix-neuf ententes chimiques en 1890), se tient à l'écart des grandes banques (autofinancement). Une identité culturelle assez comparable se retrouverait dans la plupart des firmes de la grande industrie chimique minérale. Après la mort de Frédéric Kuhlmann en 1881, son entreprise suit un axe de croissance qui n'est pas fondamentalement différent de celui de Saint-Gobain jusqu'en 1914 (environ 2500 ouvriers).

Pechiney, héritier de l'entreprise fondée à Salindres en 1855, laisse échapper deux innovations au cours des années 80. L'une est l'électrolyse à utiliser pour la fabrication des chlorates – Henry Gall, chef du laboratoire de Salindres et auteur des premières réalisations, ayant dû quitter l'entreprise, faute d'être écouté –, l'autre est celle de la fabrication de l'aluminium par voie électrique, due à Paul Héroult avec la collaboration de Louis Merle, fils du fondateur de Salindres. Le nouveau dirigeant Adrien Badin (ancien élève des Mines de Saint-Etienne) rattrape cette erreur en installant une usine d'aluminium à Saint-Jean-de-Maurienne en 1906, et en prenant le contrôle de la Société des forces motrices de l'Arve (production de chlorate d'aluminium à Chedde), mais Pechiney tend à s'éloigner de la pure chimie pour se consacrer désormais prioritairement à l'aluminium. Des firmes plus modestes, comme Dior, de Grandville (1832), Faure et Kestler, de Clermond-Ferrand (1868), les Produits chimiques du Midi (Gardair), avec laquelle Saint-Gobain était déjà en entente dans les années 70, la Compagnie bordelaise de produits chimiques (1891), les Etablissements Bertrand de La Rochelle/Pallice (1891), n'introduisent pas de ruptures fondamentales.

On peut considérer comme nouveau territoire de la chimie les matières textiles artificielles cellulosiques : le Comptoir des textiles artificiels (CTA), animé notamment par la famille Gillet, date de 1911 et regroupe cinq

Atelier à l'usine de Saint-Fons, Société chimique des usines du Rhône, en 1898.

entreprises (Soie artificielle d'Izieux et Soie artificielle de Givet, toutes deux en reconversion, Société française de la viscosse, Société ardéchoise de la viscosse, Société française des crins artificiels). Un domaine tout aussi inédit est assurément celui de l'électrochimie. La Société industrielle de produits chimiques de la Motte-Breuil (Oise) monte une fabrication de chlore électrolytique en 1898. Une des grandes figures de l'électrochimie est Henry Gall, proche de la société suisse de la Lonza, administrateur délégué de la Société d'électrochimie, qui fabrique aluminium et chlorates à Saint-Michel-de-Maurienne, puis du carbure de carbone à Notre-Dame-de-Briançon et à Saint-Avre-la-Chambre. Il est aussi président de la Société des produits azotés, fondée en 1906 avec l'aide des banques genevoises, surtout l'Union financière de Genève, et le concours de Bozel (fondée en 1898 par les Usines électriques de la Lonza). Il est caractéristique qu'une personnalité comme Henry Gall soit très liée à une banque nouvelle et dynamique, la Banque suisse et française (ancêtre de l'actuel Crédit commercial de France). Parmi les clients de la Banque suisse et française se trouvent plusieurs entreprises chimiques originales de l'avant 1914, comme le groupe Nobel français (seule entreprise française cotée sur le marché à terme de la Bourse de Paris au début des années 90), la Société anonyme des matières colorantes et produits chimiques de Saint-Denis, Poulenc-Frères.

La Société anonyme des établissements Poulenc-Frères est constituée en 1900 (capital de 4 millions), aidée par la banque privée Lyon-Marseille⁴. Les origines sont antérieures, puisqu'elles remontent au rôle du pharmacien Etienne Poulenc (1823-1878), entré en association avec son beau-père en 1858 dans la société de droguerie Wittmann et Poulenc-jeune (produits destinés à la photo : collodions, fixateurs, révélateurs). Elle gère deux usines principales en 1913, Ivry et Vitry (cette dernière construite en 1907), fabrique des médicaments comme sels de bismuth, sels de chaux, carbonates de lithium, mais aussi des produits pharmaceutiques organiques (arsénobenzol), des parfums, des produits techniques (diaménophénol par exemple), ainsi que des instruments de laboratoire, emploie 480 personnes avec un chiffre d'affaires de 15,7 millions (mais en y comprenant des produits qu'elle ne fabrique pas elle-même). La société avec laquelle elle fusionnera en 1928 pour former Rhône-Poulenc, la Société chimique des usines du Rhône, date, comme société anonyme, de 1895 (capital de 3 millions de francs), mais prend la suite de l'ancienne société Gilliard, Monnet et Cartier, installée à Saint-Fons depuis 1883, après des débuts à La Plaine, dans la banlieue de Genève, en 1868 (son fondateur Prosper Monnet, 1834-1914, avait été directeur de la Fuchsine). Elle produit des matières colorantes et des produits pharmaceutiques. Cette firme, soutenue par la Société générale depuis 1899, connaît une crise dans les premières années du XX^e siècle, mais est réorganisée sous l'égide des banquiers en 1905-1906. Elle emploie 800 personnes en 1913, et son chiffre d'affaires atteint 7,7 millions de francs. Il se trouve donc que les deux sociétés destinées à former Rhône-Poulenc plongent leurs racines dans le terreau commun des années 60, qui portent en germe les espoirs et les contradictions de la chimie

française. La réalité est assez contrastée pour les produits pharmaceutiques (les firmes françaises doivent conclure des accords sur les brevets et des ententes avec les grands confrères allemands), mais apparaît plus préoccupante encore pour les matières colorantes. Dans ce dernier cas, la suprématie revient sans conteste aux Allemands et, accessoirement, aux Suisses alémaniques : installation de Bayer à Flers, près de Lille (simple usine de conditionnement en fait pour des produits importés), de Farbwerke Meister Lucius und Bruning (Hoechst) à Creil, de BASF à Neuville-sur-Saône, de Casella de Francfort à Lyon-Vaise, de Aktiengesellschaft für Anilin Fabrikation à Saint-Fons, sans compter l'installation de Ciba (Bâle) à Saint-Fons en 1900.

Somme toute, la chimie française manque d'une force offensive dans les domaines les plus avancés (elle ignore les hautes pressions, ne sait pas fabriquer la pâte cellulosique à partir du bois, est peu créative en matières colorantes), mais ne mérite pas l'excès d'indignité à laquelle on la voue parfois. Elle a été capable de gérer une croissance tout à fait honorable. Les firmes que l'on pourrait qualifier d'« historiques », celles qui étaient déjà puissantes en 1860 (Saint-Gobain, Pechiney, Kuhlmann), n'ont pas saisi les chances d'une nouvelle chimie, parce qu'elles étaient prisonnières du « lourd », ne souhaitaient pas s'écarter des schémas de l'autofinancement, ni perdre leur âme. Elles n'intégraient pas cette nouvelle chimie à leur vocation. D'autres entreprises ont comblé cette lacune, en faisant appel au marché financier, grâce à quelques personnalités remarquables, dans un effort dispersé et, sans doute, un certain désordre. Les hommes qui ont eu à prendre des décisions stratégiques essentielles se sont pour ainsi dire servi d'un creuset qui reposait sur le trépied technologie/produit/marché, dans des conditions qui répondaient aux caractéristiques des modèles socio-culturels dominants du pays.

ENTRE LA SCIENCE, L'ÉTAT ET LA FINANCE (1914-1939)

La période qui s'ouvre avec la Première Guerre mondiale marque un temps de mutation à bien des égards décisive. La croissance globale de la chimie se poursuit à un rythme moyen dans la longue durée (de 1913 à 1939) légèrement supérieur à celui du XIX^e siècle, mais avec des réaménagements : ce qu'on appelle industrie chimique en 1939 ne correspond plus en tous points à ce qu'on désignait ainsi naguère, du fait de l'effacement de certaines fabrications anciennes, de classements plus nets entre grands secteurs (dans l'agro-alimentaire ou le raffinage du pétrole par exemple), de l'émergence au contraire de nouveaux produits (textiles, matières plastiques, insecticides). La frontière de jadis entre grande industrie chimie minérale et chimie de spécialités n'a plus beaucoup de signification, de nombreuses firmes se partageant entre divers types d'activités, et la chimie organique pouvant aussi viser des tonnages élevés.

Des distorsions considérables se marquent entre différents compartiments de la chimie : Rhône-Poulenc, comme groupe, produit sept fois plus en 1939 que ses

composantes initiales de 1914, alors que Saint-Gobain fabrique moins de superphosphates en 1938 qu'en 1913. L'évolution, de toute façon, n'a jamais été simple et linéaire, puisqu'on a vu se succéder le temps fort de la guerre de 1914-1918, la prospérité des années 20, la crise des années 30, qui n'est d'ailleurs pas une crise pour toute la chimie. L'industrie chimique est devenue plus scientifique, massivement associée à la recherche, alors qu'elle ne l'était que pour ses composantes de pointe avant 1914. Elle emploie beaucoup plus d'ingénieurs et de cadres techniciens (peut-être un triplement par rapport à 1913).

Une première ligne de fracture apparaît avant la guerre de 1914-1918. D'un côté, certaines firmes bénéficient de la guerre, alors que d'un autre côté on trouve des affaires qui en sont plutôt affectées. Les commandes ont été massives pour le chlore, l'Etat ayant financé des installations de chlore électrolytique qui produisent 25 000 tonnes par an dans onze usines (les premiers producteurs sont la Société d'électrochimie, Bozel, puis Pechiney et Frogés). Les Usines du Rhône ont reçu de très grosses commandes d'Etat, en particulier pour le phénol (utilisé dans la fabrication de mélinite), d'où l'ouverture d'une nouvelle usine à Roussillon, et pour l'ypérite. Leurs effectifs sont de 25 000 personnes à la fin de la guerre. Poulenc a peu vendu aux armées, mais a fabriqué des produits de substitution pour les marchés civils privés de produits chimiques allemands (arsénobenzol, vaccin gonococcique, médicaments divers) et emploie 2 000 personnes. La firme Kuhlmann, privée de ses usines du Nord, s'est redéployée avec l'aide de banquiers, s'installant, entre autres, à Port-de-Bouc, Marseille-l'Estaque, Paimboeuf, Bordeaux, devenant ainsi une firme à vocation nationale, et non plus régionale. Elle a été reconnue comme maître d'œuvre dans la Compagnie nationale des matières colorantes, portée sur les fonds baptismaux par les Service des poudres en 1916 (elle fusionnera d'ailleurs avec elle en 1914). L'identité des firmes est donc remaniée, et de nombreuses fusions vont avoir lieu (par exemple entre la Société d'électrochimie et Ugine, entre Pechiney et Frogés). La victoire ouvre enfin la question de l'azote, la France prenant possession des brevets allemands.

Dès lors la question à l'ordre du jour est celle de la création d'un puissant pôle chimique français, qui ne voit pas vraiment le jour. Les données sont contradictoires. Il est vrai, d'un côté, que des pans entiers d'activités se développent, par exemple les matières colorantes, dont la production était faible pendant la guerre, les textiles artificiels, la chimie du pétrole et celle de l'azote, sans parler d'un renouvellement profond de la chimie des engrais. Mais, d'un autre côté, la diversification chimique remet en cause l'identité des entreprises. Il faudrait des fusions, qui se heurtent à des réticences au sein des conseils d'administration et chez les cadres salariés. L'investissement chimique est très lourd : l'énormité des capitaux exigés n'est pas toujours en rapport avec ce que les actionnaires existant sont prêts à supporter. Par exemple, Saint-Gobain investit 500 millions de francs en chimie au cours des années 20, Rhône-Poulenc une centaine de millions. L'ensemble de la branche investit peut-être quatre ou cinq milliards, sans que les historiens aient

vraiment analysé jusqu'ici les raisons et les limites des choix effectués, ni les gros écarts de rentabilité observés. Il entre une bonne dose de pari dans les grands programmes envisagés, et les conditions du développement de la chimie en France n'apparaissent pas dans tous les cas très encourageantes. C'est ainsi que Kuhlmann essuie de lourdes pertes dans son usine de textiles artificiels d'Odomez (Textiles chimiques du Nord et de l'Est). Enfin, de telles perspectives engagent une nouvelle définition des relations avec l'Etat, qui a compris que la chimie était une industrie de guerre, et avec les banquiers, partenaires obligés des nouvelles combinaisons.

La politique de l'azote représente l'une des grandes idées de diversification chimique. En temps de paix, les gros débouchés sont la fabrication des engrais. En 1913, les petits tonnages commercialisés comprenaient en fait deux engrais, les nitrates de soude, importés du Chili, et le sulfate d'ammoniaque, résultant du traitement des résidus d'usines à gaz ou de cokeries. A la veille de la Seconde Guerre mondiale, les tonnages sont neuf fois supérieurs, avec un éventail très large de produits beaucoup plus élaborés qui correspondent à une chimie de pointe. En 1919, l'Etat français devient propriétaire des brevets Haber, sans pour autant posséder le tour de main nécessaire à leur mise en œuvre, tandis que deux procédés concurrents de Haber ont vu le jour, le procédé italien Casale et le procédé français Claude. Très vite, et contrairement à d'autres industriels, Saint-Gobain fait une analyse très pessimiste des ambitions de l'Etat français. Alors que l'on aurait pu concevoir l'attribution de licences d'exploitation du procédé Haber à l'industrie privée, les dirigeants de Saint-Gobain estiment que militaires et hauts fonctionnaires veulent exercer un contrôle très strict sur la future industrie de l'azote.

La stratégie qui en résulte passe par la constitution d'une filiale commune avec l'Air Liquide, propriétaire des brevets Claude. Cette société, appelée Société chimique de la Grande Paroisse, est constituée de mai à juillet 1919 et donne à Saint-Gobain une bonne position dans la négociation entre l'Etat et la profession : au minimum, en cas de blocage, la compagnie peut se passer des brevets Haber ; à l'autre extrême, elle peut prétendre travailler à un rapprochement entre les deux procédés pour donner naissance à une solution intermédiaire. Dans la synthèse de l'azote et de l'hydrogène, Claude a introduit deux nouveautés : la réaction sous très haute pression et la classe du catalyseur qui, à poids égal, produit douze fois plus que chez Haber. Il est aussi le premier à vouloir utiliser comme point de départ le gaz des fours à coke, bien que la méthode ne soit pas encore au point en 1919. Un clan de militaires durs oriente peu à peu les esprits vers une solution étatique et le site de Toulouse, « folie » aux yeux de Saint-Gobain, mais doit attendre 1924 pour imposer ses vues aux milieux politiques modérés. De 1921 à 1922, le cabinet Briand est même franchement hostile au projet de Toulouse et réussit à enterrer le projet, qui ressort des cartons avec Poincaré. Ce dernier penchait pour une société d'économie mixte, mais, soucieux d'aboutir après d'interminables travaux de commissions parlementaires, accepte une rédaction du Sénat, qui crée l'ONIA (Office national interprofessionnel de l'azote) installé à Toulouse.

La Grande Paroisse vit dès lors sa vie propre. En 1921, Claude commence à liquéfier le gaz de four à coke à Mazingarbe, avec le soutien des Mines de Béthune, puis il installe en 1922 la première unité expérimentale de synthèse d'ammoniaque à partir du gaz de four à coke. Des licences sont vendues au Japon, en Italie, aux Mines de Béthune et de Decazeville, mais un tournant a lieu en 1923. La Grande Paroisse cesse en fait d'être une pure société d'études et d'ingénierie pour créer une usine moderne à Waziers en coopération avec les Mines d'Aniche. La politique de l'azote de Saint-Gobain ne se limite pas à la participation de la Grande Paroisse. En présence du déclin relatif des superphosphates, les dirigeants décident en 1927 de valoriser la position en engrais phosphatés soit par des mélanges, soit par des formules d'engrais composés. Cette stratégie aboutit à la construction d'une usine propre de la Compagnie de Rouen, mise en service en 1932, pour fabriquer du phosphate d'ammoniaque, du sulfate d'ammoniaque et divers nitrates. Cette usine a joué un rôle important pour l'avenir en mettant au point, au cours de la seconde moitié des années 30, des engrais triples.

En consolidant les ventes propres de Saint-Gobain et des filiales de l'azote, on obtient un chiffre d'affaires qui est en 1938 de 13 % des ventes totales d'engrais en France, alors que Saint-Gobain assurait 26 % des ventes d'engrais en 1913. Le déclin relatif s'explique par la faible progression des engrais phosphatés, avec un glissement en faveur des scories de déphosphoration au détriment des superphosphates, l'essor des engrais potassiques et une position insuffisante des engrais azotés. Par le biais de la Grande Paroisse, Saint-Gobain a supporté un effort de recherche important sans trouver la rentabilité des capitaux investis. Ce demi-échec est dû en parti au gigantisme de l'usine de Toulouse, qui a pu fonctionner à perte avant beaucoup d'incidents techniques dans la phase du démarrage, mais fournit 32 % des engrais azotés livrés sur le marché français au cours des années 30. Il est dû aussi à un certain repli sur le seul procédé Claude, qui représente 28 % de la fabrication française d'ammoniaque. Dans le bassin minier du Nord-Pas-de-Calais, le procédé Casale, soutenu par Pechiney, a remporté quelques succès, en particulier à Lens, Anzin et Marles. Mais assez rapidement on a vu apparaître des variantes de procédé Haber amélioré, qui tenaient compte de l'apport de Claude et Casale (Fauser, Mont-Cenis, Nitrogen Engineering Corporation).

Le tronc principal de la chimie de Saint-Gobain reste le grand corps des produits classiques. Le nombre des usines a peu varié : si quelques usines ferment (Agen, Périgueux, Vitry, Ivry, Marennes, Le Mans), la liste des usines s'est allongée par la construction de Modane pendant la guerre, puis de Dunkerque, et par le rachat de Wasquehal. Les 25 usines en activité en 1929 emploient un effectif moyen de 6 850 personnes, dont 6 070 ouvriers, français pour les deux tiers seulement. La main d'œuvre est difficile à recruter, souvent peu qualifiée, ce qui explique la poursuite d'un mouvement de mécanisation commencé vers 1900. La production est assez dispersée, les deux usines importantes, Chauny et Saint-Fons, employant à peu près 900 personnes. Compte tenu des lourds tonnages



d'engrais, la valeur ajoutée représente un pourcentage assez faible du chiffre d'affaires. Cette chimie est une chimie de produits lourds, peu nombreux, fabriqués selon des règles uniformes.

Le produit le plus important est toujours l'acide sulfurique, qui contribue pour 60 % à la formation de la valeur ajoutée. La nouveauté est la diffusion du procédé de fabrication par contact d'un catalyseur, qui est destiné à remplacer peu à peu les chambres de plomb et représente 16 % de la fabrication en 1929. Saint-Gobain est de très loin le plus gros fabricant d'acide sulfurique en France, avec 47 % de la production nationale au cours des années 20, 41 % au cours des années 30. Kuhlmann vient loin derrière avec 17 %, suivi par des entreprises qui produisent 7 ou 8 % du total français. La plus grande partie de l'acide sulfurique est appliquée à la fabrication des engrais : les deux tiers en moyenne. Pour l'essentiel, il s'agit de la fabrication des superphosphates, dans les usines mêmes de Saint-Gobain, et pour le reste du sulfate d'ammoniaque. Pour l'acide de contact, plus pur et plus concentré, le débouché principal est dans la vente aux usines de textiles artificiels, mais il faut compter aussi avec les poudreries, les raffineries de pétrole et les matières colorantes. L'un des problèmes de fond pour l'avenir est que Saint-Gobain est de plus en plus un vendeur d'acide, le déclin des superphosphates réduisant les débouchés internes.

La période voit cependant l'irréversible déclin de la décomposition du sel marin par attaque sulfurique. Cette branche de fabrication tend à être remplacée par l'électrolyse du sel, qui produit du chlore et de la soude caustique et qui fonctionne à Wasquehal en 1927 et à Saint-Fons en 1928. Cependant Saint-Gobain n'a pas réussi à prendre une position solide en électrolyse : la production équivaut à

Essorage et ensachage du sulfate de soude cristallisé dans une usine de la compagnie Saint-Gobain vers 1935. Doc. Saint-Gobain-Pont-à-Mousson Archives.

10% du total national en 1929, 6 % en 1938. L'erreur initiale a été le refus de monter une fabrication de chlore pendant la guerre de 1914-1918. Les raisons de l'abstention de Saint-Gobain sont complexes. Il y entre une part de méfiance envers les initiatives de l'Etat, de prudence envers Solvay qui détient la licence Castner-Kellner, le souci de ne pas empiéter sur ce qui est considéré comme le domaine hydro-électrique de Pechiney et la crainte d'une surproduction en temps de paix. Curieusement, une première forme de rapprochement Pechiney-Saint-Gobain aurait pu voir le jour dans l'été 1915, avec des offres de participation à la construction de Saint-Auban, mais le chef de file aurait été Pechiney. En carbonate de soude, Saint-Gobain rencontre un certain succès. L'usine de Varangéville produit 13% du carbonate de soude français et modernise beaucoup ses installations au cours des années 20. On passe à des appareillages de grande dimension, à la fabrication continue et à une régulation moderne de la marche, par l'amélioration des instruments d'analyse et de contrôle. Le carbonate de soude est peu touché par la crise économique des années 30, et l'usine de Varangéville contribue pour 17 % à la production nationale. En outre, à partir de 1936, un rapprochement s'esquisse avec une autre soudeuse, Marcheville-Daguin, qui avait besoin de se moderniser, d'où le projet d'une fusion qui se réalisera en 1949.

La politique d'innovation de Saint-Gobain en chimie ne prend un caractère volontaire qu'à partir de l'automne 1936, date de l'accession à la présidence de Pierre Hély d'Oissel. Auparavant elle reste marquée de certaines limites. L'une de ces limites est de conception. Lorsque le directeur général des usines Edmond Delage crée formellement en 1916 un service des études et recherches chimiques, qui est un peu une cellule prospective, il précise que le premier objectif est l'amélioration des fabrications existantes. Le second objectif est bien d'étudier des fabrications nouvelles, mais sans suivre un véritable programme de recherche : le service se saisit d'une question lorsqu'elle paraît assez mûre aux dirigeants. On ne discerne pas une force d'impulsion pour dépasser le catalogue des questions courantes. La tradition est d'acheter des procédés à l'extérieur, puis de les perfectionner, pas de les créer. Les hommes des usines sont invités à innover, mais souvent sur des points de détail, sans appel à la vaste imagination. Une autre limite découle de la spécialisation de Saint-Gobain dans la chimie lourde. La partie de la chimie qui évolue le plus est la chimie fine des matières colorantes et des produits pharmaceutiques. C'est la chimie de la liberté, parce que l'on travaille par petites quantités sur des corps très nombreux, en variant à l'infini les compositions et les conditions. La chimie lourde des fabrications continues obéit à des consignes strictes auxquelles on doit obéir sous peine d'accident. Un changement nécessite une décision administrative. L'ingénieur d'usine parvient souvent à modifier les appareillages, mais il ne fabrique que de l'acide sulfurique, du chlore ou du carbonate de soude : il ne lui revient pas de trouver des corps qui utilisent ces matières de base.

Enfin, il faut compter avec les structures d'organisation de la compagnie. Jusqu'en 1935, il existe deux directions générales qui communiquent très mal, celle des

usines et celle des affaires commerciales. La dichotomie empêche la constitution d'équipes associant des techniciens et des cadres commerciaux pour étudier le développement de nouveaux marchés. Les hommes des usines livrent des wagons de produits sans connaître le prix de vente ni les conditions de marché, alors que les responsables des ventes ignorent tout des facteurs de coût. Il en résulte une déperdition de ressources humaines, très perceptible dans la politique des engrais. La direction commerciale met sur pied, en 1926, un bureau central de renseignements agricoles de propagande, qui est en fait l'embryon d'un service agronomique. Au départ, il s'agit de défendre le superphosphate contre diverses polémiques qui l'accusent de décalcifier les sols, mais la perspective s'élargit en faveur de champs d'expérience qui permettent de mieux discerner les besoins et de tester les fabrications. Malheureusement, beaucoup de suggestions restent des vœux pieux, faute d'articulation avec les recherches des techniciens.

Pierre Hély d'Oissel apporte surtout la volonté de rénover un outil dont on avait conscience qu'il déclinait. Il soutient quelques personnalités qui lui semblent vouloir aller de l'avant, surtout le directeur technique Emile Léon Guyard, et n'hésite pas à créer enfin de vrais laboratoires de recherche. On s'enquiert alors d'idées inédites, dont seules quelques-unes vont aboutir. Le souci de tirer parti des grandes filiales ne débouche pas sur des résultats spectaculaires. En définitive, le thème de recherche le plus fécond est celui des matières plastiques, sans préoccupation de trouver un fondement dans le pétrole plus que dans le charbon. La politique verrière de Saint-Gobain a été un stimulant au départ des recherches sur les matières plastiques, dans la mesure où l'on commençait à voir apparaître des feuilles de verre organique que certains industriels voulaient utiliser pour des pare-brise, de même que l'on pouvait songer à des bouteilles en plastique, et que la fibre de verre entretient des relations de complémentarité avec ce type de matériau (notion de matériau composite). L'idée vient très vite de constituer des équipes de recherche, mais il convient aussi d'étudier la question des brevets et de tirer parti des expériences étrangères. La première démarche, à l'automne 1936 et au printemps 1937, est une discussion avec I.G.Farben, qui aboutit à une impasse. Il existe toute une série de malentendus entre Allemands et Français pour expliquer l'échec. Les dirigeants de Saint-Gobain attendaient principalement des propositions pour ouvrir la voie d'une chimie des matières plastiques : les brevets les plus intéressants ont déjà été cédés. Leurs partenaires lancent l'idée d'une filiale commune à installer en France, mais avec une direction technique totalement allemande. La seconde démarche, qui suit l'échec de la première, est une mission envoyée aux Etats-Unis en novembre 1937.

Depuis 1936, Saint-Gobain a fabriqué en laboratoire des résines aminoplastes, qui font figure d'ancêtres pour les verres organiques, des polyacryliques et des polystyrènes, forme plus moderne pour le verre de synthèse, mais Pierre Hély d'Oissel tire de ses contacts allemands et américains la conclusion importante qu'il faut s'affranchir de la contrainte du verre organique, pour envisager les choses de façon plus vaste. Il s'oriente vers

un effort particulier pour les polyvinyliques, dont il estime qu'ils peuvent fournir un tiers des besoins en matière plastique, avec des usages très variés, tantôt en produits rigides, tantôt en produits souples, selon les différences dues à l'incorporation de plastifiants. Le produit de base, le chlorure de vinyle monomère, ne pose aucun problème et utilise tant de l'acide vinylique de Saint-Fons que du carbure de calcium transformé en acétylène. Le carbure de calcium étant élaboré à partir du charbon, la filière n'a rien à voir avec le pétrole à cette époque.

Le point difficile est la transformation du chlorure de vinyle en molécules géantes, dans l'opération dite de polymérisation. Allemands et Américains l'effectuaient dans l'eau, alors que Saint-Gobain, travaillant sans brevet, veut obtenir la réaction en phase sèche, dans des autoclaves où le monomère gazeux se change en poudre blanche. En laboratoire, les difficultés avaient paru bien maîtrisées. Les essais industriels ne démarrent effectivement, à Aubervilliers, puis à Saint-Fons, qu'après l'armistice de juin 1940, et donnent lieu à la mise au point d'appareillages entièrement nouveaux pour résoudre des embarras imprévus. Le cycle d'innovation du procédé de polymérisation en masse du polychlorure de vinyle s'étend de 1940 jusque vers 1948, et prouve que des équipes bien conduites sont capables de créer du neuf. C'est là un gros succès pour l'expansion de Saint-Gobain.

Deux directions de diversification se rattachent à une chimie entendue au sens large : dans un cas, la perspective est de réorganiser une filière qui inclut les textiles artificiels, dans l'autre de créer un outil voué à produire des carburants et des dérivés de synthèse organique. Le résultat est cependant de créer des filiales assez autonomes par rapport aux usines et aux politiques centrales de Saint-Gobain. Les points communs entre ces deux nouvelles activités ne manquent pas : effort pour mettre en place des métiers qui n'existent pas en France, au prix de grosses difficultés technologiques, déviation entre le projet et sa réalisation, relations malaisées avec les confrères. Une certaine déception se perçoit dans les deux cas, compte tenu de l'ampleur des ambitions.

La cellulose est, en 1924, date des initiatives de Saint-Gobain, une matière en fort développement, utilisée par les industries du papier, mais aussi pour les textiles artificiels et d'autres dérivés cellulosiques. Malheureusement, la France est tributaire de l'étranger quant à l'approvisionnement en bois : à 90 % pour le papier, totalement pour les matières cellulosiques. Tantôt on importe du bois des pays nordiques à l'état brut, tantôt des pâtes cellulosiques, traitées en France sur les machines à papier ou employées à d'autres usages. La cellulose offre l'avantage d'être une substance organique naturelle : à une époque où la synthèse organique était encore un peu dans l'enfance, elle pouvait fournir le fondement d'une industrie des textiles artificiels et des matières plastiques. On parle alors de soie artificielle pour désigner la rayonne, mais il faut aussi songer aux besoins de la photographie et du cinéma (films d'acétate et de cellulose). La chimie des textiles et autres dérivés cellulosiques existe en France, mais elle n'utilise que des pâtes de haute qualité, entièrement importées d'Allemagne.

L'objectif national est de tirer parti de la grande forêt landaise pour reconstituer une sorte de filière française. En théorie, un calcul des rendements en bois montre que cette forêt est amplement capable de subvenir aux nécessités. Encore faudrait-il pouvoir traiter le bois de pin maritime, bois résineux très différent de l'épicéa, du sapin, et même du pin sylvestre des pays scandinaves. On hésitait alors entre deux traitements chimiques des bois tendres : dans un cas, on éliminait bien la lignine mais mal la résine, ce qui semblait approprié aux bois du nord peu résineux, et, dans l'autre, on venait à bout de la résine en attaquant peu la lignine, d'où la fabrication de la pâte brune des papiers kraft d'emballage. On comprend que Saint-Gobain ait voulu relever ce défi, en coopération avec d'autres industriels français. Le montage industriel et financier comprend la famille Navarre, originaire de Saint-Yague (Landes), fédératrice de l'industrie du papier, et la famille Gillet, qui contrôle près de 80 % de la production française de soie artificielle par le biais du Comptoir des textiles artificiels (CTA). L'association est faite d'arrangements croisés. Le domaine dans lequel Saint-Gobain est chef de file est le traitement du bois de pin des Landes, par la société La Cellulose du Pin, dont le capital est détenu aux deux tiers par la compagnie, au tiers par le CTA, et qui construit une usine à Facture avec une technologie entièrement conçue par André Navarre. Il existe aussi un accord sur l'augmentation du capital de la Société calaisienne des pâtes à papier, ancienne société allemande du groupe Navarre, où entrent Saint-Gobain et les Gillet : son usine traite au bisulfite des bois importés, essentiellement pour la papeterie, mais avec études de livraisons pour la soie artificielle. On prévoit la participation de Saint-Gobain dans de futures affaires de textiles artificiels et dans le développement des projets Navarre.

Il se trouve qu'aucune usine française n'a été capable, avant 1939, de produire la pâte sèche de cellulose répondant aux exigences des fabricants de soie artificielle. On a continué d'importer, en tonnage toujours accru, du fait de la croissance du marché. L'idée de filière a été vidée de toute réalité. L'échec est patent, aussi bien dans les Landes, où l'on ne résout pas le problème de la résine, qu'à Calais, où le blanchiment se fait dans de mauvaises conditions, avec de l'eau de mer pompée du port, et même à Grand-Quevilly, où les Navarre font des essais peu concluants en 1928-1929. Dans le programme de Facture, Saint-Gobain rencontre d'énormes difficultés qui mènent tout près de la faillite, faute de s'appuyer sur une bonne technologie et faute de trouver des points de comparaison dans les expériences étrangères. L'usine devient une usine de fabrication de pâte à papier kraft sans autre visée. Au cours de la période d'entre-deux-guerres, Saint-Gobain n'a pas réussi à prendre place dans l'industrie des dérivés cellulosiques, malgré quelques velléités en ce sens.

Pour le pétrole, les premières réflexions de Saint-Gobain en vue d'un engagement précis remontent à 1927. Mais on ne saurait oublier que les problèmes pétroliers ne se posaient pas alors comme cela a été le cas par la suite. La découverte des carburants a été un acquis décisif de la Première Guerre mondiale. Cette question passe au premier plan des préoccupations d'une chimie à finalité

géopolitique. Toutes les grandes firmes chimiques du monde y consacrent quelques réflexions et parfois même de véritables programmes de recherche au cours des années 20. L'obtention des carburants paraît un problème chimique par excellence, alors qu'elle semble simple aujourd'hui. L'une des raisons est que beaucoup hésitent entre l'essence de pétrole et l'hypothèse d'un carburant issu du charbon. Les études sur le carburant de charbon sont très actives, tant pour l'hydrogénation des charbons et goudrons que pour le traitement de gaz de cokeries (oxyde de carbone, méthane, éthylène, etc.). Elles sont d'autant plus intéressantes que les conditions rejoignent celles de la chimie de l'azote (hautes pressions, catalyseurs très actifs, aciers spéciaux de qualité élevée). L'autre raison est que certaines des techniques expérimentées pour le carburant issu du charbon sont en fait transposables dans les raffineries de pétrole (hydrogénation et déshydrogénation, conversion des produits les moins volatils). Les pétroliers proprement dits sont souvent en retrait par rapport à ces recherches : ils préfèrent par exemple le craquage thermique au craquage chimique, ne croient guère à l'hydrogénation, et mettent prioritairement en œuvre une distillation fractionnée simple qui ne nécessite pas des connaissances très neuves. L'intérêt de Saint-Gobain pour le pétrole n'a rien d'aberrant dans ces conditions, et encore moins si l'on envisage l'utilisation de quelques sous-produits (carbures éthyléniques). L'affaire de Berre, qui prend la forme d'une participation à la Compagnie des raffineries et produits chimiques de Berre (PCRB), connaît des développements extrêmement sinués (participation puis retrait de Pechiney, querelle avec les pouvoirs publics), mais ne débouche que sur un raffinage pur et simple du pétrole, sans retour de dividendes avant 1939 (alors que l'investissement a été de 250 millions), et surtout sans aucune synergie immédiate avec la politique de chimie de Saint-Gobain.

En 1938, les rapports de force entre grandes firmes ne sont plus exactement ceux de 1914. Les deux géants qui se disputent la première place sont Kuhlmann et Rhône-Poulenc. Par les chiffres d'affaires consolidés, Rhône-Poulenc a pris la tête (environ un milliard de francs en 1938 contre 0,8 à Kuhlmann), même s'il emploie un peu moins de personnes que Kuhlmann, firme à produits comparativement moins chers (Kuhlmann a des effectifs de 15 000 personnes avec ses filiales, Rhône-Poulenc sans doute un peu moins de 10 000). Le chiffre d'affaires total de l'industrie chimique française tourne autour de six milliards de francs, si on définit la chimie dans un sens plus restrictif qu'on ne le faisait pour la réalité de 1914, ne méritant plus l'étiquette d'industrie proprement chimique que les activités qui appliquent aux combinaisons moléculaires des connaissances fondamentalement chimiques (mais il est évident que cette définition est arbitraire, la métallurgie, la verrerie, l'industrie des céramiques ou celle des pneumatiques, pour ne citer que ces exemples, mettant en jeu une physico-chimie des matériaux).

Le groupe Rhône-Poulenc a su créer une filiale de textiles artificiels cellulosiques de concert avec le CTA (Rhodiaceta, 1922) dans de bonnes conditions, développer énormément les fabrications pharmaceutiques (Specia,

Prolabo, Theraplix), jouer un rôle moteur dans l'industrie des matières plastiques (artificielles d'abord, avec l'acétate de cellulose, synthétiques ensuite), négocier assez habilement avec les Allemands, parce qu'il existait un respect mutuel (malgré un déséquilibre évident qui apparaîtra de façon criante dans certains contrats léonins de la Seconde Guerre mondiale). Comparativement aux autres firmes, Rhône-Poulenc n'a pas investi trop massivement, mais a investi intelligemment, sur des marchés porteurs (ne souffrant pratiquement pas de la crise des années 30), et a consacré des moyens à la recherche là où d'autres investissaient en équipements lourds. Kuhlmann a absorbé beaucoup d'entreprises anciennes de petite et moyenne dimensions, au point de contrôler vingt-trois usines, a créé des filiales communes avec les charbonnages, à la fois pour l'azote et l'industrie organique (chimie de l'éthylène, par exemple), a réussi à faire vivre une véritable industrie française des matières colorantes, sans délaissier la chimie minérale ni les engrais, tout en échouant dans les textiles artificiels.

Ce ne peut être l'effet du hasard si ces deux entreprises se sont étroitement liées à la banque, Rhône-Poulenc à la Société générale et au Crédit commercial de France, Kuhlmann au Crédit commercial de France, à Paribas, voire même dans une certaine mesure à Rothschild. C'est dans ce contexte qu'il convient d'évoquer la tentative de fédérer l'industrie chimique dans une Union chimique française en 1926, sous l'impulsion des Usines du Rhône et de Kuhlmann, la réunion de lancement ayant lieu dans les locaux du Crédit commercial de France, 103, avenue des Champs-Élysées. Il est hautement significatif que cette initiative ait heurté Saint-Gobain, qui estimait le directeur de Kuhlmann, Raymond Berr, trop proche de la technocratie d'État, et qui ne voulait pas entendre parler de rapprochement organisé entre la banque et l'industrie. En 1938, Saint-Gobain a un chiffre d'affaires chimique de l'ordre de 700 millions de francs, Pechiney de 600 millions, Ugine de 400 millions, et, si l'on ajoute le groupe Gillet (Progil et CTA), on observe que les six premiers groupes ne sont pas loin de contrôler les deux-tiers de la branche. Le problème est qu'il n'existe pas vraiment de géant national, comparable au britannique ICI ou à I.G.Farben.

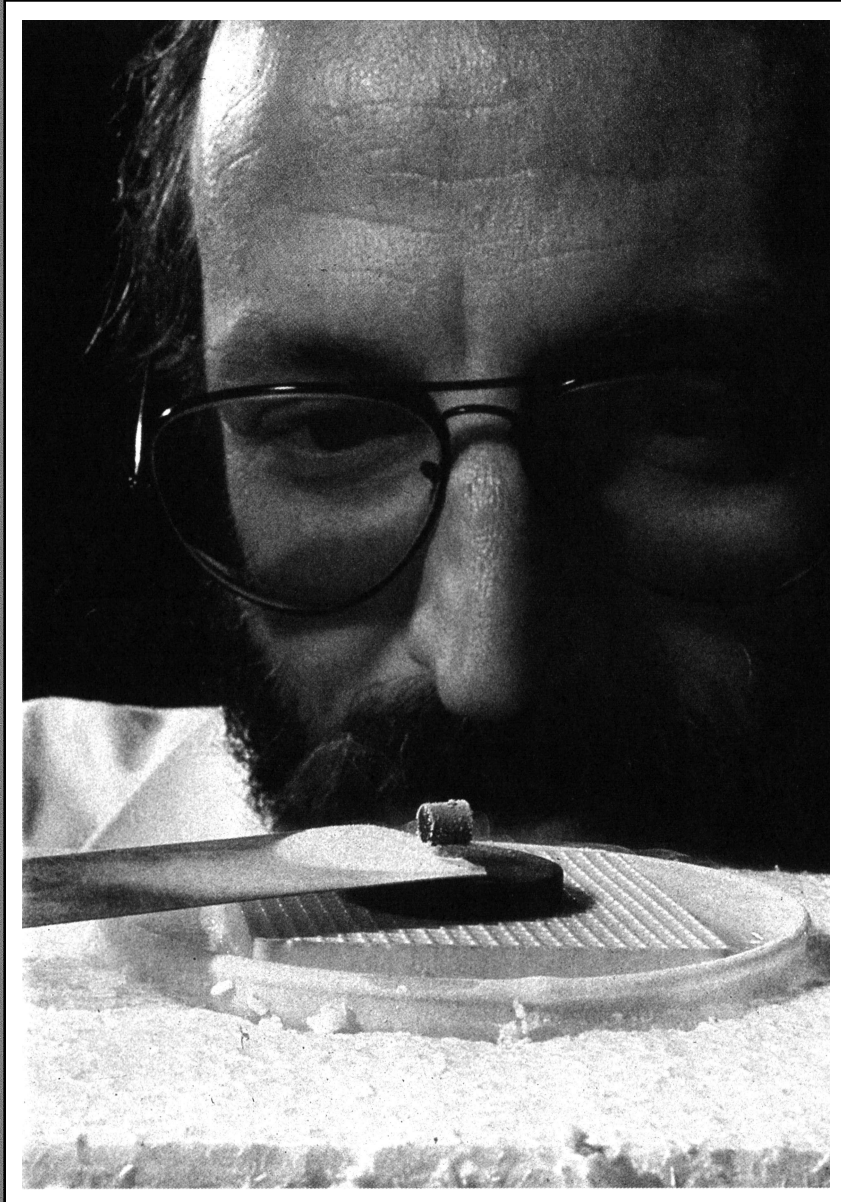
Notes

1. Nous renvoyons, pour l'essentiel, aux archives de Saint-Gobain, auxquelles il est fait ample référence dans l'ouvrage de Jean-Pierre Daviet, *Un destin international, la Compagnie de Saint-Gobain de 1830 à 1939*, Paris, 1988.

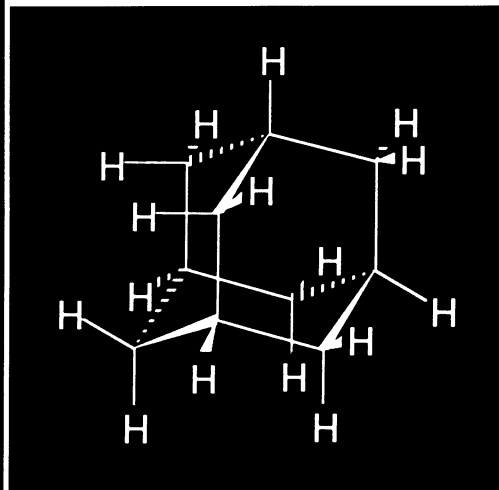
2. *Enquête industrielle*, Paris, 1988.

3. Recensements de 1906 et de 1921.

4. Cf. P. Cayez, *Rhône-Poulenc : 1894-1975, contribution à l'étude d'un groupe industriel*, Paris, 1989.



II^e PARTIE



UNE PRÉSENCE DISCRÈTE
DANS LA VIE DE TOUS LES JOURS

*Mise en évidence de la supraconductivité d'un oxyde par lévitiation.
Molécule d'adamantane, réalisée sur ordinateur grâce au logiciel MOLDRAW créé par J.-M. Cense.*



La chimie et la santé humaine

Lucien Penasse

Le médicament représente de nos jours en France, comme dans la plupart des pays développés, le cinquième environ des dépenses de santé. Mais sa place dans l'esprit du patient et du profane est en réalité plus importante : si l'on songe que les quatre autres cinquièmes (consultation, examens, hospitalisation, etc.) sont en quelque sorte le prix de la maladie, comment ne pas voir, dans le cinquième correspondant au médicament, le prix de la guérison ?

Or, le médicament est la plus apparente, la plus significative des contributions de la chimie à la santé de nos semblables, de nos proches, de nous-mêmes.

Cet article ne vise en aucune façon à être un aperçu de chimie thérapeutique, ni un bref historique des sciences pharmaceutiques, ni un survol de l'industrie et du marché du médicament. Il se propose, en plaçant quelques aspects choisis de ces domaines dans leur perspective historique, de suggérer au lecteur une réflexion sur plusieurs thèmes essentiels relatifs aux rapports entre la chimie et la santé, et de l'inviter, peut-être, à une étude plus approfondie.

PHARMACIES TRADITIONNELLES OU LES DONS DE LA NATURE

L'homme de tout temps a souffert de la maladie, de la douleur et de la mort ; depuis les temps les plus reculés, il a cherché une aide et une protection contre celles-ci.

Très tôt, à côté de l'appel à l'intervention de forces invisibles ou aux pouvoirs du guérisseur, il a demandé à la nature qui l'entoure, qu'elle soit animale, végétale ou minérale, des moyens de guérison. Cette demande reposait sur une intimité de l'homme avec la nature, bien plus grande que la nôtre, et sur une idée d'harmonie et d'échanges entre le monde et lui-même : si la nature contient ce qui le blesse, l'empoisonne et le fait périr, elle recèle sans doute aussi ce qui l'immunise, le guérit, le maintient en vie. Et très tôt, l'homme a en effet puisé dans la nature une série d'objets qu'il a utilisés dans ces buts : ces objets résultaient tantôt d'une observation patiente et purement empirique, tantôt d'une analogie postulée selon une logique qui aujourd'hui nous échappe, tantôt sur la croyance que les produits rares et exotiques devaient contenir des forces puissantes qu'une intention habile pouvait nous rendre bénéfiques.

Observation et sorcellerie ne sont d'ailleurs pas séparées dans la pensée primitive, mais quel que soit le moteur initial, le résultat de cette quête fait encore notre admiration, et bien des fruits de ce lointain héritage sont encore présents dans nos pharmacopées actuelles.

L'Égypte ancienne avait reconnu les propriétés sédatives de l'opium, de la jusquiame, du chanvre indien, les propriétés purgatives du ricin et du séné, les propriétés diurétiques de la scille maritime. La Grèce antique y a ajouté les propriétés antiseptiques de ces plantes qui embaument toujours ses rivages et ses campagnes : le romarin, la sarriette et la lavande.

L'Empire romain n'a pas beaucoup modifié cette botanique, mais on doit à Galien, qui exerçait la médecine au II^e siècle de notre ère, une préoccupation importante ; il ne suffit pas de reconnaître la vertu d'une plante, il faut en faire une préparation : pilules, onguent, emplâtre... La pharmacie lui a rendu ce qu'elle lui doit en qualifiant de galénique une partie essentielle de son art, celle précisément qui concerne la mise en forme pharmaceutique. Au Moyen Age, ce legs a été enrichi de l'apport arabe, dont on retiendra l'idée de soumettre les matières premières à un traitement par la chaleur, la distillation par exemple, qui permit bientôt d'isoler l'alcool et l'acide acétique.

Lors de l'ouverture de l'Occident sur les sociétés tropicales par les grands navigateurs de la Renaissance, un nouveau flux est venu enrichir notre pharmacie potentielle à partir des médecines exotiques les plus diverses. Dans leur emploi d'origine se cotoyaient d'ailleurs poison d'épreuve, de chasse ou de guerre et moyen de guérison. Du tri que le temps en a fait, retenons que l'on doit à la Côte-d'Ivoire les graines de strophantus riches en toxiques mais aussi en substances précieuses dans l'insuffisance cardiaque ; à d'autres régions de l'Afrique, la graine de Calabar où l'on a reconnu l'ésérine ; à l'Amazonie, le curare,

poison de flèche dont l'étude a permis de reconnaître plusieurs alcaloïdes précieux pour la pharmacologie neuromusculaire ; à l'Inde, le rauwolfia dont on a extrait la réserpine ; aux Antilles le gaiac, d'où on a extrait le gaiacol. Comment oublier dans cette liste deux autres apports de la pharmacopée traditionnelle de l'Amérique du Sud : le cinchona, première thérapeutique de la malaria, d'où notre chimie a isolé, entre autres alcaloïdes, la quinine, et l'ipéca dont on a isolé l'émétine.

L'idée d'isoler, à partir de ces dons de la nature, un principe actif n'a pas toujours prévalu : la pharmacopée ancienne préférait au contraire constituer des mélanges complexes, et l'on se souvient de la thériaque dans la préparation de laquelle entraient plus de cent constituants supposés renforcer leurs actions réciproques.

En dehors de la contribution arabe, Paracelse, médecin, alchimiste et penseur original de la première moitié de notre XVI^e siècle, semble avoir eu le premier en Occident l'idée de rechercher dans les simples leur quintessence ou principe actif, et il préconisait des méthodes d'extraction conduisant à des concentrés plus actifs et de volume réduit.

Une lecture attentive et bienveillante de ses textes permet d'y reconnaître aussi, parmi bien des considérations qui ont perdu de leur sens pour nous, l'idée de dose adaptée à la sensibilité individuelle du malade et une attention plus grande dans la définition de l'indication spécifique de la drogue. On lui doit enfin un approfondissement de la théorie de l'analogie entre la plante et son indication, théorie à laquelle on a attaché le nom de « signature ». Mais celle-ci, si elle mérite de figurer dans une réflexion sur les formes de la pensée humaine, a perdu toute place dans les sciences pharmaceutiques modernes.

Le monde minéral n'avait pas été oublié dans cette quête des dons de la nature : les XVII^e et XVIII^e siècles ont vu se préciser l'emploi du sulfate de soude, de l'eau de chaux, de la liqueur arsenicale et du mercure. Ce dernier, malgré une toxicité redoutable, a constitué avec le gaiac le premier traitement efficace des maladies vénériennes qui avaient été rapportées avec l'or du Nouveau Monde par les navigateurs et qui avaient ensuite envahi l'Europe.

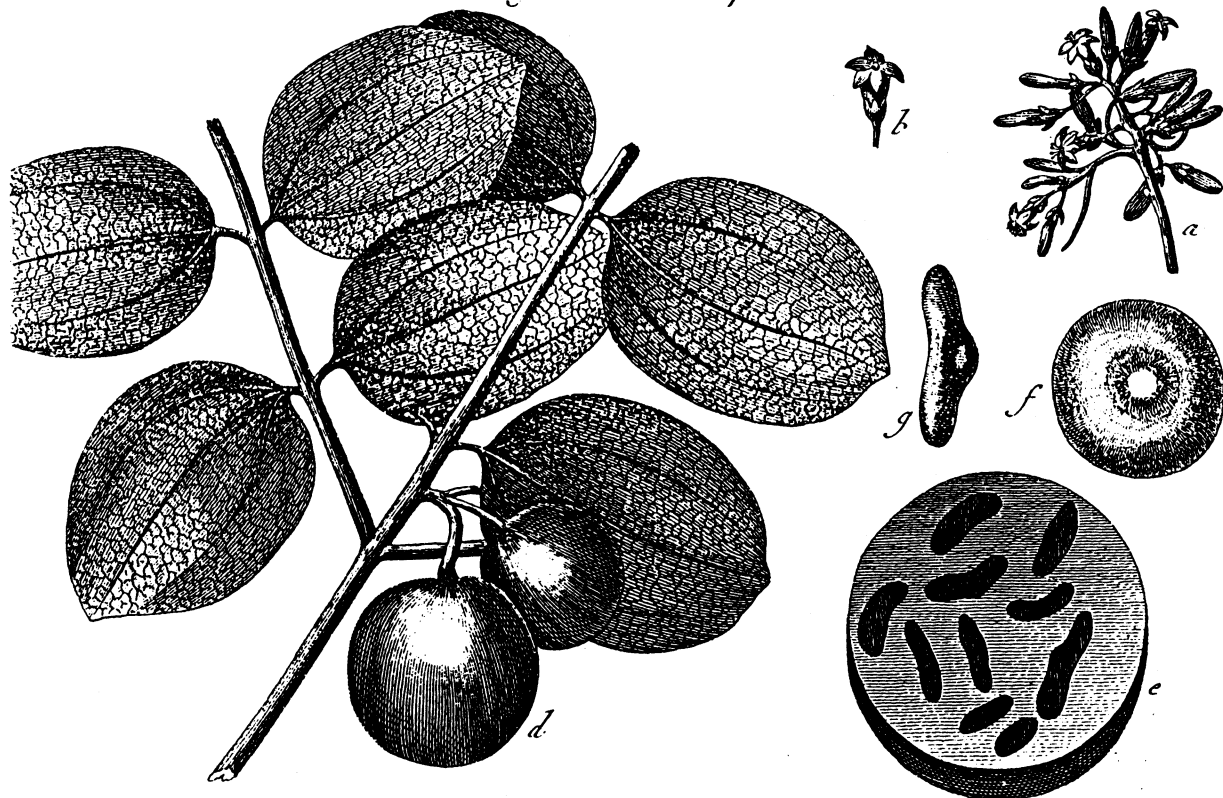
Cette récolte due à la tradition empirique est donc considérable. Mais notre admiration pour ces lointains précurseurs doit être plus grande encore. Il ne suffisait pas d'isoler dans la nature une série d'objets, ce sont les structures mêmes de la pensée qui ont été patiemment construites : le passage du concept de maladie comme malveillance d'un esprit à celui de maladie comme dysfonctionnement du corps est un réel bouleversement. Il dispose tout autrement la tentative thérapeutique.

On le voit, les sciences pharmaceutiques étaient prêtes, à la fin de l'Ancien Régime, à une mutation. Elles possédaient une panoplie de drogues naturelles relativement diversifiées, elles avaient le pressentiment encore un peu confus de principes actifs contenus dans celles-ci, le pressentiment que chacune d'elles correspondait à une indication (mais là, les possibilités du diagnostic étaient encore bien déficientes), le pressentiment, enfin, de la relation dose-effet.

PENTANDRIE ; MONOGYNIE.

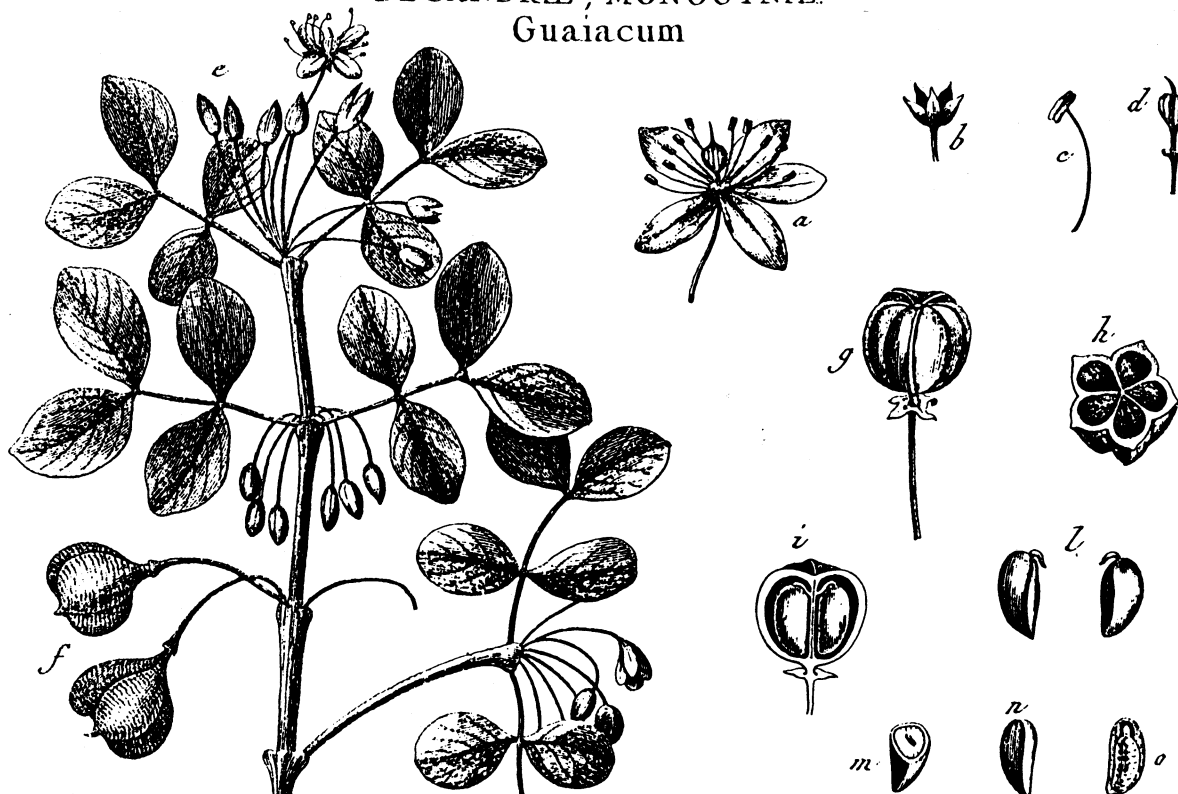
Pl. 119.

Strychnos Vomique.



DÉCANDRIE ; MONOGYNIE.

Guaiacum



Graine de strychnos vomiquier, arbre d'Asie méridionale, dont on extrait la strychnine, alcaloïde de formule brute $C_{21}H_{22}O_2N_2$, et gaïac, plante commune à Saint-Domingue et à la Jamaïque, utilisée en Europe comme antisiphilitique à partir de 1517. Planches extraites du Dictionnaire de Botanique, dirigé par Lamarck (1749-1829).



C'est sur ces prémices que la chimie, d'une part, et les sciences de la vie, d'autre part, allaient bâtir au cours des deux siècles suivants ce qui constitue le médicament de ce jour. Si ces deux approches ont été relativement indépendantes quoique parallèles au XIX^e siècle, leurs interactions ont été de plus en plus profondes et fructueuses au XX^e. Elles sont aujourd'hui indissociables.

UN ART TRÈS ACHEVÉ : FAIRE DES MOLÉCULES

En l'espace d'une génération d'homme, au cours de la période agitée et souvent sanglante qui a vu la fin de l'Ancien Régime et les débuts de la période contemporaine, la chimie a jeté les bases de ses lois essentielles. Elle était passée de l'état de science naturelle, qui décrit une collection d'objets, à celui de science conceptuelle, qui s'efforce d'élucider la nature profonde de ceux-ci, la parenté qui les unit et les modalités de leurs interactions.

Le concept de substance pure est désormais bien établi, ainsi que celui qui distingue substances élémentaires et substances composées. On peut estimer qu'au temps de Lavoisier environ trente substances avaient été purifiées et clairement définies. Dans les substances composées, la constance de la proportion de leurs composants est reconnue, puis celle de leurs proportions multiples. Désormais la théorie atomique qui était un objet d'intuition et de controverse depuis les présocratiques grecs devient un objet de réflexion et d'expérience (voir tableau I, page 82).

Une nomenclature modeste encore vient servir d'état-civil à ce petit monde, enrichi bientôt par les possibilités de l'isomérisie et, plus tard dans le siècle, de la stéréoisomérisie. Enfin, les possibilités des réactions entre les substances avaient été étudiées, et une première tentative de mesure de leurs affinités avait été faite.

La chimie minérale, qui avait identifié une douzaine d'éléments à la fin du XVIII^e siècle, voit ce nombre atteindre 64 lorsque Mendeleïeff établit sa classification en 1869.

Il a aujourd'hui sérieusement dépassé la centaine.

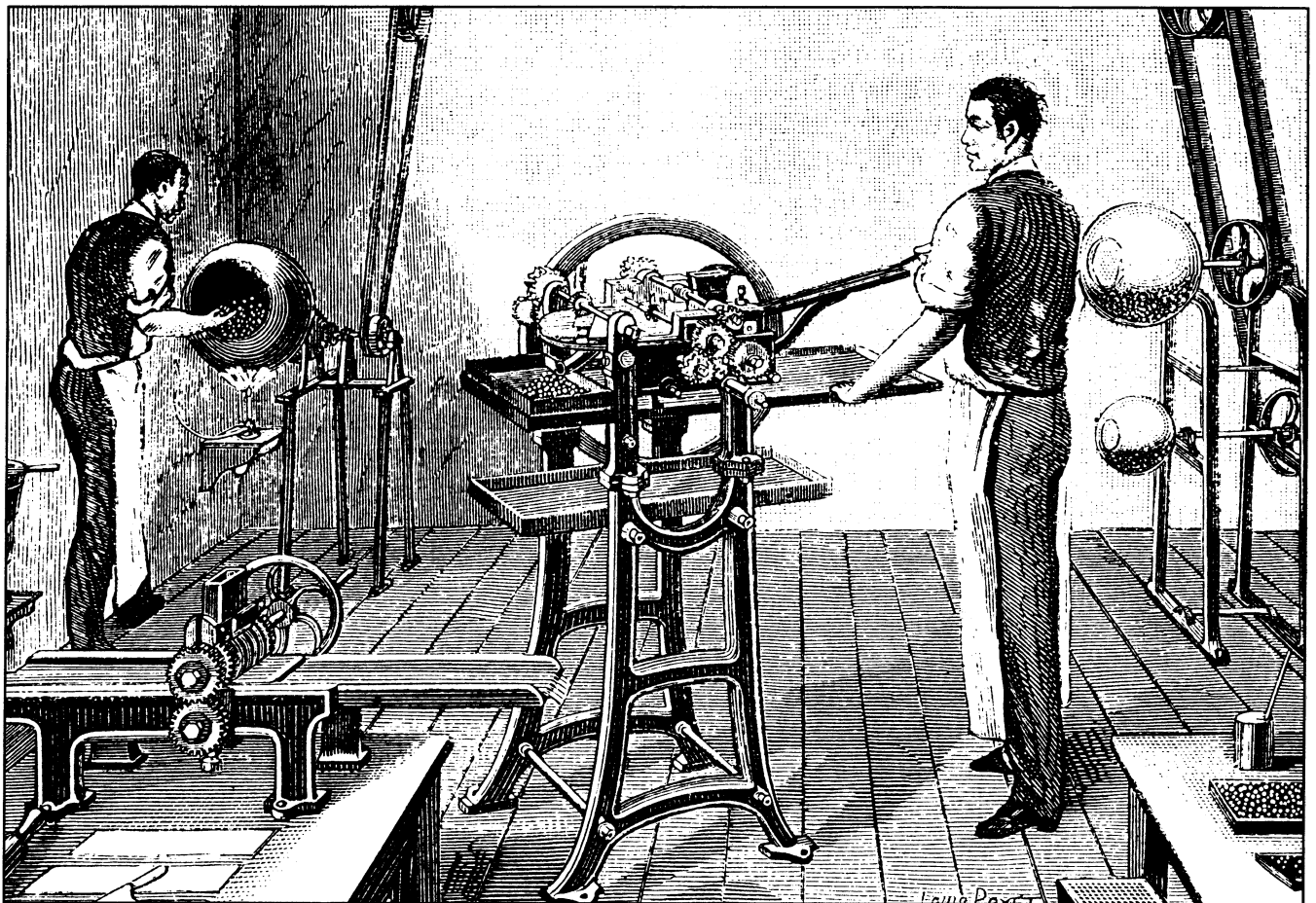
La chimie, ayant décrété ses lois, allait explorer son territoire. Elle se mit en route d'un si bon pas, et son domaine s'étendit si considérablement, que des spécialisations furent nécessaires ; et en premier lieu celle qui sépare la chimie minérale de la chimie organique. Distinction heureuse dans la mesure où il s'agissait de décrire ensemble les corps extrêmement nombreux initialement rencontrés dans la matière vivante animale ou végétale, et qui résultent de la combinaison du carbone et de l'hydrogène auxquels s'ajoutent éventuellement l'oxygène, l'azote et d'autres éléments. Distinction fâcheuse dans la mesure où elle était issue de l'idée que les substances du monde vivant répondaient à des lois qui leur étaient propres, idée qu'il fallut laborieusement écarter.

L'isolement des substances biologiquement actives à l'état pur, comme la morphine ou la quinine, à partir de plantes, devait établir définitivement la nature substantielle et moléculaire de cette activité et permettre d'opérer désormais avec des quantités définies, mesurables et reproductibles de ces principes actifs, dépourvus des interférences dues aux substances étrangères qui les accompagnent dans la plante d'origine (voir tableau II, page 82).

Bientôt, le nombre croissant de substances organiques différentes et de composition globale voisine ou identique conduisit à reconnaître l'importance de la disposition géométrique des atomes dans la molécule. Cette géométrie ne put cependant devenir satisfaisante que lorsque la théorie des valences fut élucidée, et en particulier la tétravalence du carbone (1857).

Mais, pour le propos qui est le nôtre, l'apport très significatif de cette période a été le début de la synthèse chimique (voir tableau III, page 82).

Les réactions chimiques observées jusque-là permettaient déjà de modifier certains corps ; les reconstruire à partir des éléments qui les composent était une étape nouvelle. Elle devait permettre d'abord d'écarter toute nécessité de forces spéciales au monde organique : celui-ci respecte les mêmes lois que la chimie minérale. Mais elle allait conduire à un prolongement d'une importance considérable : réservée d'abord à reproduire des substances isolées initialement de la nature et à confirmer l'exactitude de leur analyse, la synthèse allait très vite permettre l'accès à des molécules nouvelles dont la nature n'offrait pas d'équivalent. Dès 1837, on préparait ainsi le premier colorant artificiel, la mauvéine. Les connaissances relatives à la constitution des molécules et à leurs réactivités se développent alors d'une façon exponentielle et permettent la synthèse de molécules de plus en plus complexes et de plus en plus nombreuses. Ce fut là une œuvre collective considérable à laquelle des milliers de chimistes ont participé depuis cent cinquante ans. Parmi ces molécules, un proportion importante est préparée précisément dans l'attente d'éventuelles propriétés thérapeutiques. De plus, dans les travaux de Pasteur, on avait réalisé que si leur structure est non symétrique ou chirale, et offre une possibilité d'isomérisie optique, les isomères ont des propriétés biologiques différentes, ce qui conduit la chimie à maîtriser l'obtention et la séparation de ces isomères.



On estime que, à ce jour, près de dix millions de substances ont été répertoriées, dont 90 % appartiennent à la chimie organique, et ce nombre croît au rythme d'un demi-million par an.

Avec les acides nucléiques et les protéines, la nature offre le modèle des édifices les plus grands qui aient été ainsi reproduits. Mais des molécules de taille moindre offrent parfois une accumulation extraordinaire de difficultés et en particulier de centres d'asymétrie, dont la reproduction par synthèses oblige la chimie organique à affiner encore, et à chaque fois, ses méthodes. Ainsi, la vitamine B12, dont la formule brute $C_{63}H_{88}CoN_{14}O_{14}P$ et les 16 centres d'asymétrie laissent imaginer la complexité, a été pendant un temps l'édifice le plus difficile d'accès, et sa synthèse totale, en 1973, a été considérée comme une prouesse. Depuis, des substances d'origine marine plus complexes encore ont pris la relève.

L'aptitude désormais quasi illimitée de la chimie à synthétiser à volonté tous les dérivés imaginables étant établie, il convient de la compléter par une réflexion sur les aspects économiques de cette obtention, puis par le repérage des molécules les plus utiles.

Il est évident que la synthèse de ces édifices complexes se fait en ajoutant les briques qui les constituent les unes aux autres en un nombre de stades parfois élevés, ce qui conduit à développer des stratégies de synthèse multistade. Suivant la complexité de la molécule visée, il n'est pas rare que la synthèse exige 20, 30 voire 40 stades pour les cas les plus élaborés. Le rendement global étant le produit des rendements des stades individuels, il est

frappant de retenir que, si ces rendements sont en moyenne de 80 %, pour parvenir au terme de 40 étapes à 1kg de produit, il faut partir de 7,5 tonnes de matière première.

On peut ajouter que la chimie organique fait appel, pour certaines réactions, à l'aide des enzymes dont la spécificité d'action très supérieure à celle des réactifs chimiques apporte, dans des cas difficiles, une contribution très précieuse. On parle dans ces cas de bioconversion.

D'autre part, il n'est bien évidemment pas utile de partir des éléments dans chaque synthèse. Dans bien des cas, les sources naturelles offrent des molécules abondantes et économiques possédant déjà une partie plus ou moins étendue de la molécule visée et susceptible de conduire à celle-ci en un nombre d'étapes plus réduit que celles exigées par la synthèse totale. On nomme cette approche hémisynthèse.

Enfin, les micro-organismes, susceptibles d'être cultivés en quantité quasi illimitée dans les fermenteurs industriels, fournissent une série de molécules fort complexes qui, bien qu'ayant été reproduites par synthèse, sont obtenues plus économiquement par fermentation. C'est le cas en particulier de nombreux antibiotiques, ou encore de la vitamine B12 citée plus haut. Depuis quelques années, la génétique a acquis la possibilité de modifier ces micro-organismes et de les rendre aptes à élaborer des molécules complexes et nouvelles pour eux. Cette voie

*Une boutique d'apothicaire au XVI^e siècle. Dessin de Dellier d'après Sandrart et Hartmann. Extrait du Magasin Pittoresque, 1877.
Fabrication de pilules, dragées et granules pharmaceutiques à l'usine Darasse. Extrait de la Nature, 20 août 1881.*

ajoute une possibilité supplémentaire pour accéder à l'échelle industrielle aux molécules les plus diverses que la thérapeutique peut souhaiter. Il est donc essentiel que les laboratoires pharmaceutiques, dont le métier est la production de ces molécules, aient à leur disposition ces diverses possibilités et en maîtrisent les techniques, afin de choisir dans chaque cas la méthode conduisant au meilleur résultat économique.

Comment, dans le flot des molécules possibles, choisit-on les plus utiles ? Ici, un détour par les sciences de la vie s'impose.

L'AUTRE MOITIÉ DU PROBLÈME : LES SCIENCES DE LA VIE

Au cours de la période que nous venons de parcourir, les sciences de la vie ont connu un développement tout aussi considérable que celui de la chimie, bien que moins ramassé dans le temps et étalé, en quelque sorte, sur la période dans son ensemble.

La cellule, constituant de base de toute matière vivante, avait été observée initialement au XVII^e siècle, et son universalité est bien établie au début du XIX^e siècle où elle s'intègre dans la notion de tissus.

La description moderne de l'organisme sain débute au cours de cette même période avec la circulation du sang, le système nerveux, la respiration et la chaleur animale, la fécondation.

La maladie devient avec Laënnec (1781-1826) l'objet d'une analyse et d'une description solides, où l'on note les symptômes qui l'identifient, son déroulement, son devenir probable, la classification où elle s'insère. Les cas choisis par ce grand médecin ne sont pas des moindres, puisqu'il s'agit du cancer et de la tuberculose. Cette double description de l'organisme sain et de la maladie se développe en particulier grâce à la médecine française, celle de Magendie, Bichat, Broussais, et la pathologie acquiert alors le statut de science à part entière (voir tableau IV, page 83).

L'observation du rôle des micro-organismes comme cause d'infection a été elle aussi étalée sur le siècle. Les champignons ouvrent la série, et, dès 1813, ils sont reconnus à l'origine de maladies des plantes. Les bactéries suivent, avec les travaux de Pasteur et de Koch, et enfin les protozoaires rejoignent cette liste. A la fin du siècle, les méthodes de la bactériologie étant établies, le catalogue des micro-organismes pathogènes pouvait être écrit, en très grande partie par les élèves de Pasteur. En ce qui concerne les virus, bien qu'impliqués dans la rage et pressentis avec précision au tournant du siècle dans le cas de la fièvre jaune, il faut attendre vers le milieu du XX^e siècle des méthodes d'observation plus fines pour les soumettre à l'examen et élucider leur nature.

La vaccination contre la variole en 1796, par Jenner, un extraordinaire précurseur, puis celle contre la rage par Pasteur en 1885, établissent l'existence de nos défenses naturelles déjà entrevues par Laënnec et jettent les bases de l'immunologie. Au milieu de ce siècle, naissent également la physiologie moderne, la génétique et l'endocrinologie.

Mais il ne suffisait pas de connaître l'organisme sain et les symptômes de la maladie pour pouvoir intervenir activement sur cette dernière. Jusque-là, les drogues éventuellement actives offertes par les pharmacopées étaient les fruits du hasard, et les modalités de leur action dans l'intimité des tissus étaient totalement inconnues. Seule une connaissance détaillée de la nature chimique de ceux-ci permettrait de concevoir en termes moléculaires le déroulement de cette action. Il est heureux d'ailleurs que ce degré de connaissances ne soit pas indispensable pour qu'une drogue active puisse être administrée avec succès : parmi les médicaments d'aujourd'hui, il en est fort peu où ce degré soit atteint.

La chimie, depuis deux siècles, a abordé cette tâche. On peut distinguer trois phases principales dans son déroulement. Les noms différents qui ont été attribués à ces chapitres de la chimie soulignent d'une façon significative ce qui différencie ces étapes.

Chimie organique

En un premier temps c'est la chimie organique : le chimiste isole à partir des plantes et des tissus animaux des molécules très diversifiées, qui lui permettent de bâtir sa propre science chimique, mais qui, ne représentant en fait qu'une petite partie de la matière vivante, nous éclairent peu sur celle-ci. L'isolement de la spartéine à partir du genêt est intéressante pour la chimie, qui s'enrichit d'un nouvel hétérocycle, mais nous dit peu de chose sur la vie de ce bel arbuste aux fleurs jaunes. D'autant que les molécules intéressantes pour le chimiste sont les plus exotiques, celles que l'on ne rencontre que dans un petit nombre d'espèces vivantes et que l'on nomme aujourd'hui, pour cela, métabolites secondaires. Elles laissent donc dans l'ombre le tronc commun des métabolites primaires présents dans toutes les espèces, et qui correspondent à la digestion, à la respiration, à la croissance et à la multiplication des organismes vivants.

Chimie biologique

De ce fait, une deuxième science voit le jour à la fin du siècle dernier. Il s'agit d'une chimie consacrée cette fois à la compréhension de la matière vivante dans sa généralité. Cette science, qui a reçu le nom de chimie biologique ou de biochimie, a très honorablement rempli la tâche qui lui était impartie : glucides, lipides, protides, coenzymes sont répertoriés ainsi que les voies de leur élaboration, de leur emploi, de leur dégradation. Les enzymes qui catalysent toutes les étapes de ces voies ont fait l'objet d'études approfondies. Cette tâche se poursuit avec en particulier le souci de jeter un pont entre la morphologie cellulaire et ses divers compartiments et les événements biochimiques qui s'y déroulent.

Biologie moléculaire

Actuellement, une troisième étape est en cours, pour laquelle le nom de biologie moléculaire a été proposé en

1938. On sait, en effet, qu'au coeur de la cellule l'acide désoxyribonucléique (ADN) est le dépositaire de l'information génétique et contrôle donc toute la machinerie macromoléculaire responsable de la croissance et de la multiplication de la cellule. L'étude de ces structures macromoléculaires centrales et de leurs agents d'exécution que sont les acides ribonucléiques et les protéines constituent cette science, dont le développement spectaculaire depuis trente ans a été l'événement scientifique majeur de la seconde moitié du siècle, comme la microphysique avait été celui de la première. Ces deux sciences, biochimie et biologie moléculaire, sont essentielles en totalité à celui qui recherche de nouveaux médicaments. Elles comportent d'ailleurs des parties directement consacrées à l'organisme pathologique, et il est désormais possible de parler, pour une maladie, en termes de molécule déficiente (l'insuline dans le diabète), surabondante (le cholestérol et les lipides dans la maladie thrombotique) ou anormalement constituée (l'hémoglobine dans l'anémie falciforme). Lorsque des molécules à forte activité biologique, éventuellement des médicaments, stimulent un tissu ou le modèrent dans son fonctionnement, cette action exige de toute évidence le contact précis de la molécule avec un site particulier de la cellule disposé pour recevoir cette stimulation et géométriquement complémentaire de la molécule active, site auquel on a donné le nom de récepteur. Le comportement et le devenir du médicament dans l'organisme est étudié, quant à lui, par une série de disciplines scientifiques complémentaires. Ainsi, la pharmacologie analyse son action sur les grandes fonctions physiologiques, la pharmacocinétique examine sa distribution dans les divers compartiments du corps, puis son élimination, cet ensemble étant résumé par la notion de demi-vie de la molécule dans l'organisme. Enfin, la toxicologie se préoccupe des éventuels effets secondaires indésirables, voire néfastes, que la molécule pourrait avoir lors de son administration, que celle-ci soit brève ou prolongée.

NAGUÈRE, MAINTENANT, BIENTÔT...

Les deux piliers, chimie et sciences de la vie, sur lesquels reposent la conception, la création et la production du médicament offrent désormais une assise considérable pour cette tâche. Est-elle pour autant aisée, et le médicament sort-il tout équipé de cette source comme Athéna du cerveau de Zeus ? Il s'en faut de beaucoup, et des tâches tâtonnantes et empiriques demeurent indispensables là où les concepts et les théories sont encore loin de baliser totalement la prodigieuse complexité du réel.

Il faudrait distinguer une première catégorie qui est celle de la supplémentation des produits physiologiques naturels déficients (voir tableau V, page 83).

La première moitié du siècle avait défini la notion de vitamine, série de molécules que l'organisme supérieur n'élabore pas, bien qu'elles soient nécessaires à son fonctionnement, et qu'il doit trouver dans son alimentation. Si celle-ci est insuffisante, il faut y suppléer et mettre ces molécules à la disposition de l'organisme en quantité suffisante. L'insuline, pour le diabétique qui ne l'élabore

pas, appartient en somme à une catégorie toute proche. Dans d'autres cas, des produits naturels comme les hormones stéroïdes, administrées à des doses étudiées et à des moments précis, peuvent provoquer un effet biologique très supérieur à celui que leur concentration spontanée assure : effet anabolisant, protection et prévention de la grossesse, lutte contre les cancers hormono-dépendants, effets anti-inflammatoires divers. Dans ce cas la tâche de la chimie est de produire ces substances en quantité, non limitantes et à des prix acceptables. Si cet effort a été couronné de succès pour les hormones stéroïdes et les vitamines citées plus haut, il se poursuit pour l'insuline et les composants complexes de notre système de défense, les lymphokines.

A côté de ceux-ci, l'immense majorité des situations pathologiques n'ont pas leur solution toute faite dans notre organisme ou dans la nature et attendent que la chimie pharmaceutique fournisse la molécule artificielle qui protège ou qui guérit.

Pour simplifier quelque peu notre description de la recherche de ces molécules nouvelles, on distinguera trois possibilités, qui dans la réalité coexistent et se chevauchent à des degrés divers : le criblage au hasard, la modulation moléculaire, la conception réfléchie.

Le criblage au hasard

Si les connaissances disponibles ne suffisent pas, aujourd'hui, à concevoir *a priori* la molécule qui sera active dans telle situation, il en allait bien évidemment de même au cours des cinquante dernières années, où les grands médicaments actuels ont été préparés pour la première fois. Ces médicaments ont donc pour l'essentiel été le fruit d'un criblage au hasard.

Celui-ci consiste à préparer un grand nombre de molécules et à les soumettre à un test biologique simple, reproductible, pouvant être répété en grande série et dont la corrélation avec une situation pathologique est aussi satisfaisante que possible.

Un certain talent d'observation n'est cependant pas interdit dans la pratique de ces méthodes, afin de ne pas laisser échapper une observation, même fragmentaire, susceptible de mettre sur la voie d'un résultat plus complet. Les Anglo-Saxons ont un bien joli mot pour désigner cette attitude de vigilance active : « *serendipity* », mot forgé en souvenir des princes légendaires de Serendip, à qui leur acuité d'observation ainsi que des connaissances étendues permettaient de découvrir mille différences là où leurs compagnons de route ne voyaient que l'uniforme banalité.

L'exemple le plus achevé de cette démarche a correspondu à la recherche des antibiotiques de première génération. La découverte de la pénicilline, observée dans une culture d'un champignon monocellulaire banal en 1929, isolée et utilisée à partir de 1941, suivie bientôt de l'isolement à partir d'autres micro-organismes de la bacitracine et de la streptomycine, montre que les micro-organismes possèdent une aptitude étonnante à synthétiser des molécules aux structures chimiques les plus diverses, dont un certain nombre possèdent la propriété, non moins étonnante, d'être toxiques pour d'autres micro-organismes

et relativement peu ou infiniment peu toxiques pour l'organisme supérieur et l'homme. De plus, la mise en évidence d'une activité antibactérienne répond bien aux critères énoncés plus haut : elle peut se faire sans peine dans une boîte de Petri, à l'aide d'un petit volume d'une culture même non purifiée de l'organisme producteur. Si l'on sait également que notre environnement, l'eau des lacs et des rivières, la terre des jardins et des champs, renferme une flore abondante et diversifiée de micro-organismes, on conçoit que dès la fin des années 40 une quête pratiquée dans la plupart des pays du monde ait procédé à l'examen de centaines de milliers de colonies isolées des habitats les plus usuels ou les plus exotiques. Celle-ci a conduit à l'isolement en trente ans d'environ 10 000 substances antibactériennes parmi lesquelles figurent la trentaine d'antibiotiques de fermentation, dits de première génération, qui constituent une part essentielle de l'arsenal antibactérien actuel.

Si cette quête est pratiquée aujourd'hui à une échelle importante, tous ceux qui y participent ont constaté que sa productivité s'est considérablement réduite depuis plus de dix ans : l'acquis retenu est déjà très satisfaisant et aucune des molécules plus récentes n'a possédé de propriétés justifiant son utilisation. C'est au cours de cette dernière période que la deuxième approche, celle de la modulation moléculaire, est venue fort heureusement prendre la relève.

Mais la méthode de criblage, désignée à l'origine et encore souvent par son nom anglais « *screening* », n'a pas été employée exclusivement pour les antibiotiques. Elle a été appliquée à la plupart des domaines pharmacologiques, où elle consiste cette fois à préparer de petites quantités des molécules les plus diverses, par extraction ou par synthèse, et à les administrer à des animaux de laboratoire. L'observation de ceux-ci, ou la mesure des paramètres de leur physiologie, permet de déceler une activité biologique dans la substance essayée.

La tâche on le voit est sensiblement plus lourde, son rendement faible et aléatoire, puisque, selon une estimation, il faut tester 10 000 substances pour qu'une de celles-ci ait des chances d'accéder à l'exploitation. C'est ainsi cependant que l'on a détecté au cours de la même période une série d'activités pharmacologiques parmi les plus précieuses. On a donc découvert le pouvoir :

- hypnotique des barbituriques,
- antihistaminique des phénothiazines,
- anxiolytique des benzodiazépines,
- vasodilatateur des dihydropyridines,
- antibactérien de l'acide nalidixique.

Rapidement le praticien de cette recherche renforce son expérience et affine son intuition. Il cesse progressivement d'opérer dans le noir absolu. S'il connaît mieux ses molécules, il va vers leur modulation ; s'il connaît mieux la cible à atteindre, il va vers la conception réfléchie.

La modulation moléculaire

Dès qu'une molécule active est obtenue, il serait vain de vouloir empêcher le chimiste d'en préparer quelques dérivés et analogues... pour voir. Plusieurs de ces molécules

avaient, dans bien des cas, été préparées au cours de la synthèse initiale pour permettre celle-ci. L'étude biologique de ces produits voisins montre bien vite que certaines zones de la molécule acceptent des modifications sans répercussion sur l'activité, et que, pour d'autres zones au contraire, tout changement conduit à une altération notable de l'activité, voire à sa disparition. Ceci conduit à penser que ces dernières sont intimement impliquées dans le contact avec le récepteur.

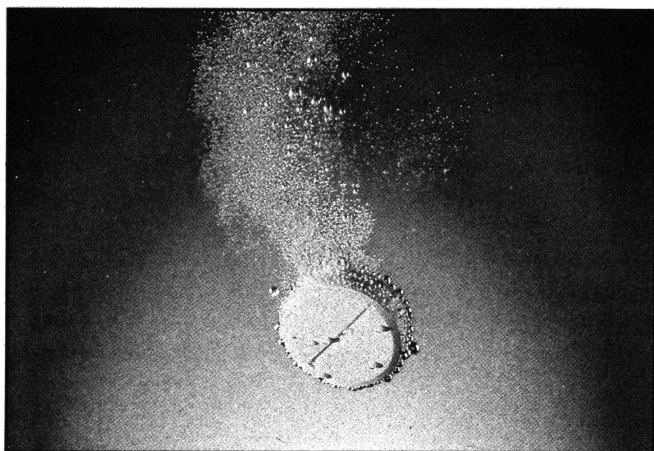
Ces observations incitent à la préparation de plus en plus réfléchie d'analogues et à la conception de méthodes en vue de la comparaison des structures avec les activités qui enrichissent progressivement notre connaissance de la série et conduisent à concevoir des analogues nouveaux qui mènent à petits pas vers une activité utile renforcée, ou encore à l'élimination d'activités indésirables. Des groupes d'atomes ont été reconnus comme ayant bien souvent une activité biologique potentielle, on les nomme pharmacophores, et, en complément de ceux-ci, on a repéré des assemblages d'atomes bien souvent équivalents entre eux, et que l'on nomme bio-isostères. Ainsi, le remplacement dans une molécule complexe d'un cycle benzène par un cycle furanne ou un cycle thiophène conduit en général à une activité biologique voisine.

Il subsiste bien évidemment des tâtonnements, et il faut préparer des séries considérables d'analogues pour parvenir à une molécule offrant un progrès suffisant pour justifier son développement.

C'est cependant par cette voie mi-réfléchie, mi-empirique qu'ont été obtenues, pour le plus grand nombre, les molécules thérapeutiques utiles depuis vingt ans. Gardons à l'esprit toutefois ce paradoxe : si la modulation moléculaire peut à partir d'une molécule active concevoir des analogues de plus en plus satisfaisants, elle est totalement démunie pour donner le jour à la molécule initiale; la tête de série demeure, pour l'essentiel, le seul fruit du hasard.

Reprenons l'exemple de la pénicilline. La molécule naturelle initiale a été introduite en thérapeutique en 1941. Si au cours des années 50 quelques sels et dérivés nouveaux apportent un progrès modeste sur la durée de demi-vie, c'est en 1962 qu'apparaît un progrès majeur. Une modification chimique de la chaîne latérale fournit l'ampicilline au spectre antibactérien significativement élargi. Depuis, on estime que 30 000 dérivés d'hémisynthèse ont été préparés qui ont conduit aux 19 pénicillines utilisées en thérapeutique où elles apportent des caractéristiques particulières de spectre ou de stabilité qui justifient leur emploi.

On pourrait citer des démarches identiques pour toutes les séries pharmacologiques et évoquer par exemple les 25 000 céphalosporines préparées par modulation de la molécule naturelle initiale, ou encore les 20 000 stéroïdes préparés par synthèse ou héli-synthèse à la recherche de propriétés hormonales ou anti-inflammatoires. On peut aussi prendre un exemple dans le domaine de la neuropharmacologie, domaine qui a véritablement vu le jour au cours de cette période. En 1952, la découverte fortuite de l'activité neuroleptique de la chlorpromazine ouvre la série qui, depuis, n'a cessé d'être explorée. La



modulation a conduit en 1960 au chlorodiazepoxide (Librium) et en 1963 au diazepam (Valium). C'est à partir de cette période et dans cette série que les sites récepteurs des tissus sur lesquels ces molécules se fixent ont été reconnus. L'étude de ces liaisons, rendue aisée par l'emploi de molécules marquées, et rendue précise par la séparation et l'isolement des divers récepteurs, a grandement contribué à accroître l'efficacité de la modulation moléculaire et permet l'évaluation rapide des activités potentielles des molécules nouvellement préparées. La purification des récepteurs et l'étude de leur structure biochimique précise, récemment réalisée dans quelques cas, devrait permettre dans un avenir proche un pilotage de la modulation moléculaire de plus en plus précis. Le développement de méthodes informatisées a été rendu nécessaire pour pouvoir effectuer des comparaisons dans des séries si étendues. Petit à petit ces méthodes acquièrent une valeur prédictive ; elles sont désormais indispensables dans l'établissement de projets de synthèse.

La conception réfléchie

Faisons un rêve. Supposons que la macromolécule dont la présence ou le fonctionnement abusif est responsable de la maladie ait été repérée, identifiée, et que sa structure ait été résolue dans ses moindres détails. Supposons que l'on ait pu définir sur son étendue la zone ou le site actif plus particulièrement responsable de son action néfaste. Supposons encore que l'on conçoive, en fonction même de la géométrie de cette zone, une molécule qui offre en relief ce que le site actif possède en creux et inversement, et lui soit donc complémentaire. Supposons enfin que cette complémentarité s'étende non seulement à la forme géométrique, mais encore à la distribution exacte sur la surface frontière des charges électriques, directes ou induites, des parties hydrophobes et hydrophiles, bref de tout ce qui fait qu'une molécule n'en est pas une autre. Une telle molécule, de toute évidence, en rencontrant le site actif s'y logerait avec une précision et une affinité suffisante pour bloquer le fonctionnement de la macromolécule et assurer de ce fait la fin de la maladie. Nous aurons admis également que la molécule ainsi dessinée sera dépourvue d'affinités pour tout autre site et donc sélective et sans toxicité, et pourvue au contraire de tout ce qu'il faut pour parvenir, dans la jungle des tissus et la forêt des cellules, précisément au lieu où il lui faut agir. Il suffira alors au concepteur de la molécule d'en fournir le plan au chimiste qui en assurera la préparation, et le médicament nouveau aura vu le jour. Sans tâtonnements, le dessein sera devenu réalité. Mais ceci est un rêve.

Aucune des étapes que l'on vient de décrire n'est aujourd'hui réalisable, notre degré de connaissance dans chaque cas est encore très insuffisant. Mais depuis dix ans des efforts considérables sont accomplis dans ce sens, des progrès significatifs sont enregistrés, et il est certain que, à partir d'une date qui appartient au troisième millénaire, ce rêve sera réalité. Alors s'il y a encore des hommes, ce qui est possible, et s'ils souffrent, ce qui est certain, ils auront l'avantage de se guérir à l'aide de médicaments sans mystère.

L'aspirine, ou acide acétylsalicylique, préparée pour la première fois en Allemagne en 1899 par Dreser, est encore aujourd'hui le médicament le plus utilisé dans le monde.



Ce progrès a porté d'une part sur la connaissance des macromolécules et essentiellement des protéines. Dans de nombreux cas maintenant, leur structure spatiale a été établie avec un degré de précision considérable, grâce à un ensemble de méthodes physico-chimiques et en particulier à la radiocristallographie.

Toutefois l'image fournie est celle de la molécule immobilisée dans le cristal, et on sait qu'en solution dans le milieu biologique elle dispose d'une flexibilité indispensable à son action. Une méthode cristallographique à grande vitesse toute récente commence à saisir ces mouvements. D'autre part, la possibilité, maintenant acquise par la biotechnologie, de modifier à volonté un acide aminé à la fois dans ces protéines permet d'étudier dans le détail les rôles respectifs de chacun de ces maillons dans les interactions de la macromolécule avec son environnement.

Ce progrès a porté aussi sur la connaissance rigoureuse de la géométrie des molécules biologiquement actives, qui est maintenant parfaitement établie, ainsi que la nature précise des forces non covalentes qui unissent des molécules complémentaires lors de leur rencontre.

Enfin, il y a quatre ans, la première image cristallographique d'un couple moléculaire du type que nous évoquons ici, où sont associés un anticorps et un antigène, a été obtenue par un chercheur de l'Institut Pasteur à Paris.

Voilà donc les méthodes qui ont conduit aux quelque 4 000 molécules qui constituent la pharmacopée actuelle, méthodes qui sont pratiquées aujourd'hui par la centaine de firmes qui composent l'industrie pharmaceutique mondiale et qui assurent la majeure partie de la recherche dans ce domaine.

C'est une recherche longue et coûteuse. La phase de recherche proprement dite est la plus aléatoire dans sa durée. Il n'est pas rare qu'il faille de cinq à dix ans à une équipe formée pour fournir la première molécule originale active. Suivent les phases de développement où l'on effectue l'étude préclinique et clinique, la toxicologie chronique, l'étude analytique, celle de la formulation. Au cours de ces phases se met au point le procédé industriel de préparation.

Cet ensemble exige de l'ordre de sept à dix ans, et, si tout s'est déroulé avec succès, il conduit à la présentation du dossier d'enregistrement et à son évaluation par les autorités qui délivrent alors l'autorisation de mise sur le marché (AMM) et la décision de remboursement. La commercialisation peut alors commencer. Il a été estimé qu'en moyenne à ce moment la somme de 700 millions de francs a été investie dans cette création.

Cette quête inachevée se poursuit. L'apport des cinquante années de chimie pharmaceutique moderne qui viennent de s'écouler a été considérable, mais tout est loin d'être résolu. Dans les meilleurs cas, là où un médicament actif est disponible, rapidité d'action, absence d'effets indésirables, confort, coût du traitement peuvent encore être améliorés. Et combien de situations qui attendent leur premier traitement autre que symptomatique. Faut-il évoquer la cancérologie, la virologie, la gériatrie, la neuro-psychiatrie, les malfonctionnements des systèmes

immunitaires, les maladies tropicales, pour voir que bien des progrès sont encore attendus.

Dans ce monde de plus en plus conceptualisé, on assiste d'ailleurs périodiquement à des sortes de résurgences de médecines anciennes ou à une nostalgie d'un temps où la guérison était attendue d'une nature supposée plus proche et plus mystérieuse. Médecines alternatives, médecines douces, homéopathie font partie de ces démarches, peu fondées scientifiquement et d'une efficacité plus ou moins incertaine, où la seule conviction joue le rôle essentiel. Leurs tenants refuseraient-ils de reconnaître que, grâce à la thérapeutique scientifique dont il est question ici, jointe aux progrès de l'hygiène, la durée de la vie humaine qui était de 35 ans à la fin du XVIII^e siècle et de 50 ans en 1900, a dépassé les 75 ans aujourd'hui ?

Bibliographie

L'Industrie chimique et pharmaceutique française dans la perspective de 1992. Commissariat général du Plan, janvier 1990, la Documentation française, Paris.

Le Médicament : éthique et réalité industrielle. Ouvrage collectif en 5 tomes réalisé par l'association MERI. Éditions de Santé, Paris. En particulier, le tome 2 (1989), *Recherche et développement pharmaceutique*, apporte une vue détaillée des thèmes évoqués ici et une bibliographie étendue.

Deux exemples de chimie pharmaceutique actuelle : la fabrication du Céfotaxime (en haut) et la fabrication de cortisoniques (en bas) dans des usines du groupe Roussel-Uclaf.

Tableau I

Naissance de la chimie moderne

1765	Cavendish	Découverte de l'hydrogène
1774	Priesley, Scheele, Lavoisier	Azote, oxygène et chlore
1783	Lavoisier	Composition de l' eau
1785	Berthollet	Ammoniaque
1789	Lavoisier	Nomenclature chimique
1803	Dalton	Théorie atomique
1803	Davy	Métaux alcalins et alcalino-terreux
1811	Courtois	Iode
1830	Berzelius	Isomérisie
1836	Laurent	Théorie des substitutions
1857	Kékulé	Tétravalence du carbone
1869	Mendeleïev	Classification des éléments
1874	Le Bel, Van't Hoff	Stéréochimie

Tableau II

Les progrès de la chimie organique : isolement des substances naturelles

1806	Morphine
1817	Narcotine
1818	Strychnine
1819	Brucine
1820	Quinine, naphthalène
1824	Benzène
1826	Aniline, berberine
1832	Anthracène
1834	Quinoléine
1835	Méthanol
1838	Toluène
1859	Cocaïne
1868	Digitaline

Tableau III

Les progrès de la chimie organique : synthèses

1824	Acide oxalique
1828	Urée
1837	Acide salicylique
1845	Acide acétique
1860	Acétylène
1868	Alizarine
1880	Indigo

Tableau IV

Quelques étapes de la connaissance du vivant

1619	Harvey	La circulation du sang
1671	Malpighi	La cellule
1688	Leeuwenhoek	Les micros-organismes, le globule rouge
1780	Spallanzani	La fécondation
1796	Jenner	La vaccination antivariolique
1801	Bichat	La notion de tissus
1831	Brown	Le noyau de la cellule
1848	Bernard	La fonction glycogénique du foie
1850	Helmholtz	La vitesse de l'influx nerveux
1856	Brown-Sequard	Les glandes surrénales
1865	Mendel	La loi de l'hybridation
1873	Golgi	La fibre nerveuse
1876	Koch	Un bacille cause de l'anthrax
1880	Laveran	Un protozoaire cause du paludisme
1885	Pasteur	La vaccination antirabique

Tableau V

Dates des découvertes de quelques grands médicaments contemporains

1929-1941	La pénicilline
1935	Prontosil et sulfamides, premiers antibactériens
1942	Antihistaminiques
1943	Nivaquine, antipaludique
1945	Streptomycine et isoniazide, premiers antituberculeux
1947	Anticoagulants coumariniques
1948	Cortisone, anti-inflammatoire stéroïdien
1952	Largactil, premier neuroleptique
1957	Diurétiques chlorothiaziques
1957	Antidépresseurs imipraminiques
1962	Ampicilline, pénicilline d'hémisynthèse à spectre élargi
1963	Indométacine, anti-inflammatoire non stéroïdien
1980	Cefotaxime, cephalosporine de la 3 ^e génération

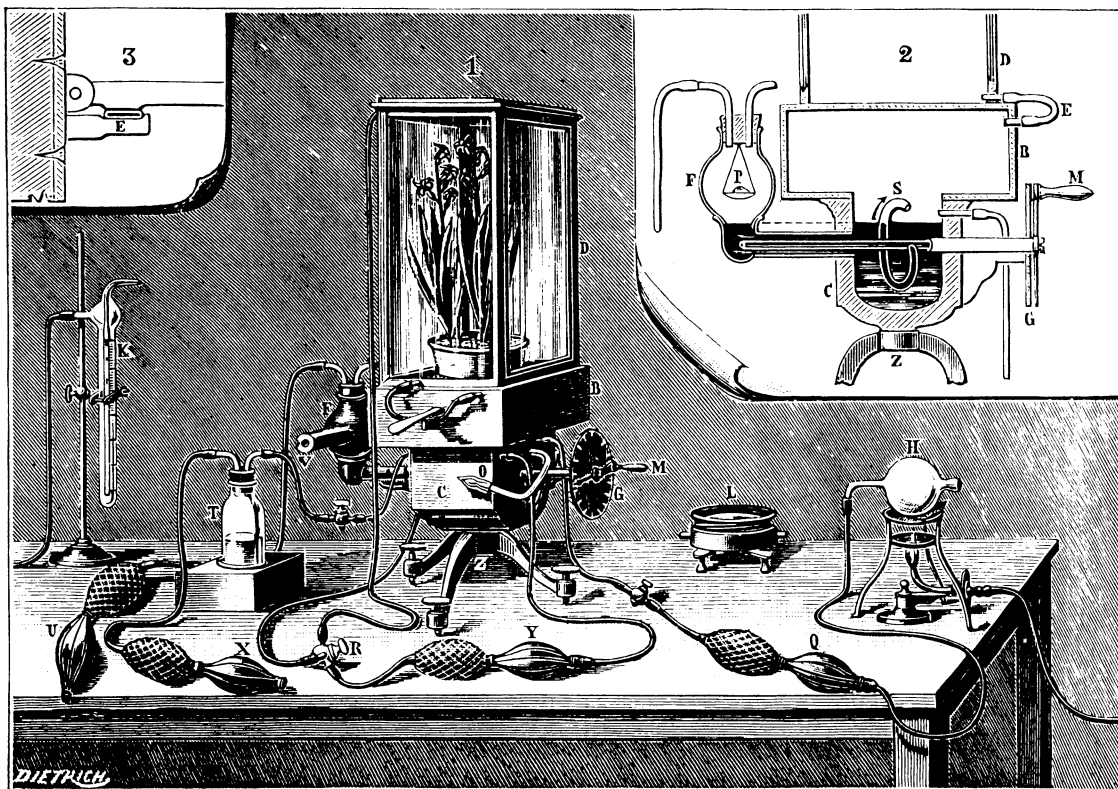
LE PARFUM DES FLEURS

APPAREIL POUR EN MESURER L'INTENSITÉ

Un de nos botanistes les plus ingénieux, M. Eugène Mesnard, poursuit déjà depuis plusieurs années de savantes recherches sur les parfums que dégagent les fleurs, recherches intéressantes non seulement pour la biologie végétale, mais encore pour l'art du parfumeur. De fait l'art qui consiste à extraire l'arome des corps odorants et à en faire des mélanges agréables à l'odeur est d'un empirisme peu ordinaire. Ce n'est guère que par une pratique journalière

et par des comparaisons multiples que les parfumeurs sont parvenus à établir les règles qui définissent les combinaisons d'odeurs devant entrer dans les bouquets ou les différents articles de vente. D'autre part, en ce qui concerne la production du parfum par les fleurs, on chercherait en vain le moindre travail sur la question.

Une étude attentive du phénomène au point de vue biologique et industriel devait nécessairement se présenter à l'esprit d'un botaniste. Félicitons M. Mesnard de l'avoir eue et surtout de l'avoir menée à bonne fin. La chose en effet n'était pas des plus faciles. Le parfum des fleurs est une chose si sub-



Ensemble de l'appareil pour la mesure de l'intensité du parfum des fleurs. — N° 1. D, Boîte vitrée qui renferme les essences. Z, Trépied à vis calantes. C, Cuvette renfermant du mercure. — N° 2. Coupe intérieure du piédestal sur lequel repose la boîte vitrée D. — N° 3. Vue du levier à frottement dur permettant de fermer le tube E par pression.

tile, si impalpable, si difficile à comparer, qu'on se demande comment on arrive à le rendre maniable. Le point important à établir tout d'abord est son intensité, c'est-à-dire l'action plus ou moins forte qu'il exerce sur l'organe de l'olfaction; sa mesure est très délicate.

La méthode détournée que M. Mesnard a employée¹ pour arriver à mesurer cette intensité est très précise. Comme le remarque l'auteur, si l'odorat n'est pas capable, comme on peut le supposer *a priori*, d'évaluer l'intensité d'une odeur en mesure absolue, il peut être un comparateur merveilleux. Le parfumeur qui possède, dans son magasin, cinq ou six cents espèces d'odeurs, sait parfaitement les

distinguer les unes des autres, alors qu'il n'est pas en son pouvoir de définir leur intensité d'une manière certaine. De même il est possible de reconnaître, par l'odorat, l'existence d'un grand nombre de substances chimiques, mais sans qu'on puisse en rien préjuger de la quantité de ces substances qu'on trouve répandues dans l'air. Supposons donc, dit-il, que l'on fasse venir, dans un récipient donné, de l'air chargé d'un parfum connu et de l'air ayant passé sur une essence spéciale, de l'essence de térébenthine, par exemple. On peut réaliser un mélange pour lequel l'odorat arrive à ne percevoir qu'une odeur neutre, c'est-à-dire une odeur telle qu'il suffirait de faire varier un peu la proportion des essences dans un sens ou dans l'autre, pour sentir, soit le parfum, soit l'essence de térébenthine.

¹ *Revue générale de Botanique.*

Les arômes

Produits chimiques ou naturels ?

Patrick Etievant

Les arômes sont jugés avec circonspection, sinon avec méfiance, par certains consommateurs. Cette attitude peut être attribuée en partie à une mauvaise compréhension des définitions qui figurent sur les étiquettes, généralement à la fin de la liste des additifs. Pourtant, la définition de ces arômes est plus transparente que les énigmatiques symboles en « E » utilisés pour les épaississants, les gélifiants, les émulsifiants, les anti-oxydants ainsi que pour les colorants. En effet, trois définitions existent légalement en France pour définir les arômes : « naturels », « identiques au naturel » et « artificiels ». Les premiers rassurent le consommateur et laissent envisager, *a priori*, une bonne qualité organoleptique. Les seconds inquiètent quant à leur origine, car le vocable d'« identique » indique clairement qu'il s'agit de produits non naturels sans préciser comment ils sont produits. Enfin, le troisième, de plus en plus rare, provoque quelquefois le rejet du produit, suspecté de moindre qualité sinon d'être plus ou moins dangereux.

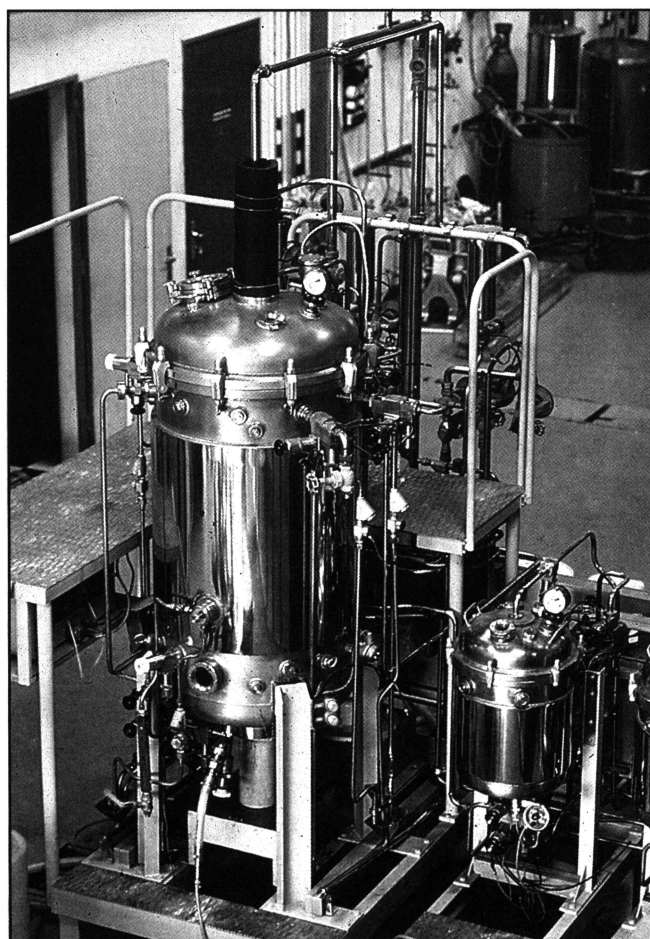
Une question également intrigue le consommateur : pourquoi est-il nécessaire d'ajouter des arômes à des produits contenant des fruits, des épices ou des légumes justement adjoints au produit dans le but de lui communiquer leur arôme ? A cette question, il existe plusieurs réponses.

Tout d'abord, l'adjonction d'arômes comme additifs permet à l'industriel de s'affranchir dans une certaine mesure des problèmes de l'approvisionnement. Les arômes industriels sont en effet disponibles toute l'année, alors que les fruits et les légumes ne sont produits qu' à certaines périodes. L'approvisionnement saisonnier en produits frais est, de plus, sujet à des variations quantitatives, et il peut être même totalement défaillant à la suite de catastrophes naturelles comme les inondations, le gel, la grêle. De plus, la qualité des arômes concentrés varie peu dans le temps, alors que la qualité organoleptique des substances et extraits végétaux et animaux produits est fonction de nombreux paramètres comme la variété, le rendement, la durée du jour, la nature du sol. D'autre part, il est beaucoup plus facile d'utiliser des poudres (cas des arômes encapsulés) ou des liquides plus ou moins visqueux (cas des alcoolats, des huiles essentielles et des résinoïdes), qui sont facilement stockables et dont le pouvoir aromatique, bien plus important que celui de la matière première fraîche, est connu et contrôlé. Enfin, ces arômes peuvent avoir une composition adaptée à un processus technologique particulier que devra subir le produit alimentaire, c'est-à-dire qu'ils peuvent être fabriqués dans le but de résister à un mode de fabrication impliquant des contraintes particulières, comme la cuisson-extrusion, ou à une préparation avant consommation particulière, comme le chauffage dans un four à micro-ondes. Enfin, le coût des arômes est, dans certains cas, beaucoup plus faible pour les molécules de synthèse que pour les molécules naturelles. L'exemple typique sans cesse présenté est celui de la vanilline dont la production industrielle par synthèse (4 000 tonnes par an) permet de réduire le coût à 80 F par kilo, alors que la vanilline obtenue à partir de gousses de vanille coûte environ 20 000 F le kilo !

L'intérêt ou la nécessité d'utiliser des arômes concentrés étant expliqués, il nous reste à expliciter ces vocables d'« arômes » « naturels », « identiques au naturel » et « artificiels » qui figurent sur les étiquettes.

LES « ARÔMES NATURELS »

Les arômes « naturels » sont des mélanges de substances aromatiques qui sont extraites d'une matière première végétale ou animale. De plus, cette matière première doit obligatoirement correspondre, au moins pour partie, à ce que l'arôme en question est sensé évoquer, c'est-à-dire à ce qui est indiqué sur l'étiquette soit par une image soit par le texte. La figuration simultanée sur un pot de yaourt d'une fraise et de la déclaration « arôme naturel » veut donc dire que cet arôme ajouté a été extrait par un procédé dont nous parlerons plus tard, mais à partir de fraises. Cette précision est importante, car il est possible, par des procédés de séparation des extraits aromatiques naturels, d'obtenir des fractions aromatiques dont les caractéristiques olfactives originales permettraient de fabriquer des mélanges aromatiques présentant l'odeur de légumes, de fleurs ou de fruits, sans que ceux-ci n'aient été utilisés comme matière première.



Ces arômes naturels, dont l'origine est donc connue, sont des mélanges concentrés obtenus par des traitements de la matière végétale ou animale. Ces traitements, qui doivent être physiques, consistent le plus souvent en un chauffage, un broyage, une lyophilisation, une encapsulation ou une émulsification. Ils ne peuvent, par contre, être de nature chimique ou mettre en jeu une étape de cette nature, sauf en ce qui concerne l'isolement de substances acides ou basiques (acides gras ou aminés par exemple) sous forme de sels communs. Les techniques utilisées pour l'extraction de ces arômes font appel soit à la volatilité des substances aromatiques, soit à leur caractère lipophile. La distillation sous toutes ses formes (à la vapeur d'eau, sous pression réduite, à court trajet) est ainsi utilisée pour séparer les substances aromatiques des substances naturelles qui les contenaient. Les autres procédés, qui peuvent être utilisés en conjonction avec des procédés de distillation, font appel à une extraction par un solvant organique. Mis à part l'éthanol, les autres solvants organiques ayant servi à l'extraction, tels que l'hexane ou le chloroforme, doivent être ensuite obligatoirement exclus de l'extrait avant leur utilisation. Actuellement, plus de 60 % des arômes sont vendus sous forme d'arômes naturels en Europe, et ce pourcentage est sans cesse croissant afin de satisfaire la demande des consommateurs.

Vue du dessus du fermentateur alcoolique pilote de 400l. Cl. O. Sebart/INRA.



LES ARÔMES « IDENTIQUES AU NATUREL »

Les arômes « identiques au naturel » sont, contrairement aux arômes naturels, des substances pures. Celles-ci sont généralement obtenues par synthèse chimique à partir de matières fossiles, mais quelquefois par hémisynthèse à partir de produits naturels. Comme la plupart des arômes naturels, ces substances sont obtenues dans un solvant organique qui a cette fois-ci servi de solvant pour la synthèse, et qui devra être éliminé avant la commercialisation. Pour avoir le label « identique au naturel », ces substances doivent simplement posséder une structure identique à celle de substances ayant été identifiées comme naturelles. Cette définition n'inclut toutefois pas la notion de chiralité dont nous reparlerons plus tard. Les avantages de l'utilisation de telles substances sont d'abord liés à leur grande pureté qui leur permet de présenter des caractéristiques organoleptiques en général bien définies et uniques. Ensuite, comme ces substances sont obtenues à l'état pur, elles possèdent un pouvoir aromatisant remarquable et ne sont donc utilisées qu'en très faibles quantités. Il est d'ailleurs rare que ces substances de synthèse soient utilisées seules. Elles sont plutôt utilisées pour améliorer certaines caractéristiques olfactives d'un extrait naturel, qui seraient par exemple altérées par l'extraction. L'arôme ainsi obtenu est désigné par les professionnels de « renforcé » et contient majoritairement

des substances naturelles (96 à 98 %), compte tenu du fort pouvoir aromatisant des substances ajoutées.

Comme nous l'avons évoqué ci-dessus, la définition d'« identique au naturel » ne tient pas compte de la notion de chiralité, c'est-à-dire du fait que certaines substances d'arôme peuvent, de par leur structure, exister sous la forme d'isomères optiques dont l'un d'entre eux est généralement prépondérant dans la nature. Cette imprécision vient de plusieurs faits. Tout d'abord, les propriétés physiques de deux isomères optiques sont absolument identiques (masse moléculaire, point d'ébullition, constante diélectrique...), hormis le sens dans lequel ils sont capables de polariser la lumière. De même, leurs propriétés chimiques sont identiques (solubilité dans les solvants, pK, réactivité chimique), à l'exception de leur réactivité vis-à-vis d'agents chimiques eux-mêmes chiraux. La seconde raison, dérivant de la première, est que l'on ne sait reconnaître la chiralité des substances d'arôme que depuis fort peu de temps compte tenu des techniques particulières devant être mises en jeu pour les séparer. Enfin, le coût d'une molécule énantiomériquement pure est très élevé par rapport au coût du racémique, c'est-à-dire du mélange équimoléculaire des deux énantiomères.

Cette petite différence entre le produit naturel et le produit de synthèse est négligeable pratiquement. En effet, bien que les seuils de perception de deux énantiomères

Un framboisier et son fruit. Cl. J. Niore/INRA.

soient un peu différents, il suffit de corriger cette différence par un dosage légèrement modifié. Dans certains cas seulement, les profils aromatiques différents des deux énantiomères peuvent rendre plus délicate la réaromatisation. L'exemple typique est celui de la carvone, qui, sous forme lévogyre, possède une odeur de menthe et, sous sa configuration dextrogyre, une odeur de cumin.

LES ARÔMES ARTIFICIELS

Les arômes artificiels, enfin, sont des substances obtenues par synthèse qui n'ont jamais été trouvées dans la nature. Ces substances ne peuvent être utilisées que si elles figurent sur la liste des substances aromatiques autorisées.

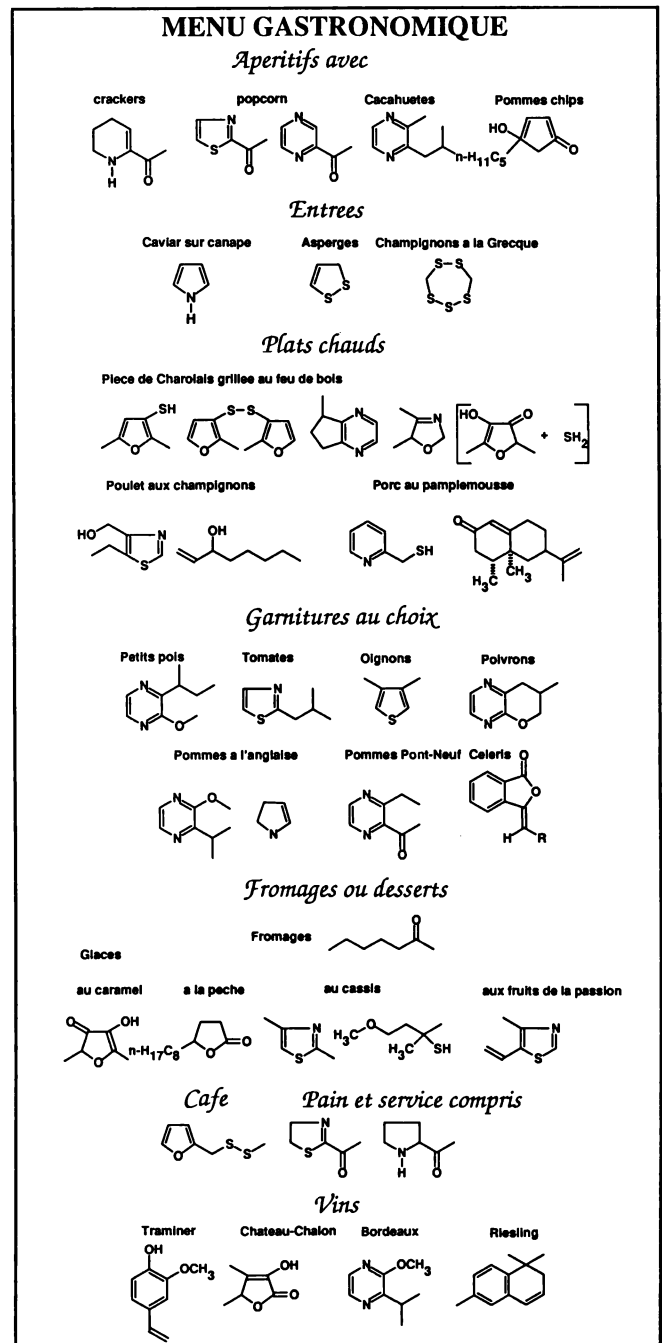
Ces substances sont peu nombreuses et possèdent des propriétés olfactives plus intenses que les molécules naturelles qu'elles remplacent. Leurs structures sont d'ailleurs très proches des molécules naturelles qui ont servi de point de départ pour leur élaboration. C'est le cas de l'éthyle vanilline et du méthyle eugénol qui dérivent du produit naturel par une simple alkylation et qui possèdent des seuils de perception améliorés.

Face à cette situation relativement claire, une véritable révolution technologique est venue bouleverser le monde de l'aromatisation. Cette révolution, née de la demande sans cesse croissante d'arômes naturels par le consommateur, consiste à faire produire des substances aromatiques par des systèmes enzymatiques proches ou identiques à ceux normalement mis en jeu dans la matière première végétale, mais dans des conditions optimisées. Cette production par la biotechnologie est maintenant du domaine de la réalité et suscite une activité scientifique importante.

La voie la plus proche des systèmes traditionnels consiste à produire des arômes par voie de fermentation, comme cela est pratiqué depuis l'antiquité, mais en optimisant les souches utilisées et les conditions de culture afin d'augmenter la productivité. Des applications de cette approche sont maintenant du domaine de la réalité. Il s'agit de la bioproduction d'arômes de fromages concentrés ou d'arôme de beurre, qui sont obtenus en combinant l'action d'une lipase et d'une culture de ferments laitiers ou de champignons, et en utilisant comme milieu de culture de la matière grasse de beurre ou un caillé hydraté. Grâce à de tels systèmes, on peut obtenir des arômes au moins dix fois plus concentrés que ceux qui sont traditionnellement produits par des micro-organismes semblables, et de plus dans un temps record de quelques dizaines d'heures.

Une autre voie consistant à cultiver des cellules de plantes aromatiques *in vitro* a été également envisagée. Les problèmes liés à la difficulté d'expression, dans des cellules en culture, de gènes contrôlant la production de métabolites secondaires comme les molécules aromatiques, ainsi que les temps de croissance importants comparés à ceux de bactéries ou de levures, sont apparus comme des obstacles trop importants pour une poursuite active.

Des voies un peu plus éloignées des systèmes biologiques classiques sont maintenant étudiées. Elles



consistent à utiliser des systèmes enzymatiques particuliers et définis, connus comme responsables de la production d'arômes dans les plantes. Ces systèmes enzymatiques sont nombreux et peuvent être utilisés *in vivo* dans des micro-organismes ou bien *in vitro* après avoir été isolés. Dans les deux cas, les réactions mises en jeu sont simples et souvent unitaires. On utilise donc un substrat riche en un précurseur particulier naturel qui est converti en une molécule, ou en une série homologue de molécules aromatiques. On parle alors de bioconversion et non plus de bioproduction, et les concentrations ainsi atteintes sont beaucoup plus importantes puisqu'elles doivent dépasser le gramme par litre pour devenir rentables.

Menu gastronomique, reproduit après modification avec l'autorisation de M. Marion, Nestec s.a.



Ces arômes, quelquefois appelés « néo-naturels », bénéficieront très probablement dans la nouvelle législation européenne du label « naturel », dès l'instant où le substrat utilisé sera naturel, et dans la mesure où aucune transformation chimique ne sera mise en œuvre parallèlement lors de leur production. Cette promesse de label explique l'intérêt suscité par de telles techniques qui, si elles offrent tous les avantages de la non-dépendance d'une matière première végétale déjà évoqués, nécessitent de coûteuses recherches et ont un coût de mise en œuvre très supérieur à celui des techniques d'extraction classiques. En effet, il est très probable que le consommateur sera prêt à payer la différence de coût qui existe entre un arôme de synthèse et un arôme de biosynthèse, de la même manière qu'il paie aujourd'hui l'écart avec l'arôme naturel. Ceci est d'autant plus vraisemblable que les très faibles ajouts effectués n'entraînent que de faibles variations de prix dans le produit fini.

L'importante différence de prix des diverses matières premières aromatiques vendues sur le marché et l'obligation de faire figurer sur l'étiquette la nature des arômes utilisés imposent de pouvoir contrôler l'origine de ces produits dans les concentrés aromatiques et dans l'aliment. Compte tenu des faibles concentrations finales des substances d'arôme dans l'aliment, ce problème est un véritable défi que les chimistes analystes tentent de relever.

L'analyse qualitative d'extraits obtenus à partir de l'aliment permet de fournir quelques renseignements sur l'origine végétale des arômes, puisque certaines molécules, présentes naturellement en quantités majeures dans

certain produits, ne sont pas présentes ou ne se trouvent qu'en quantités mineures dans d'autres produits. Pour les arômes de fruits, et en simplifiant, la présence de nootkatone indique l'utilisation de l'ananas, celle de frambinone de rajout d'extrait de framboise, et la présence de mésifuranne et de furanéol laisse suspecter l'utilisation de fraises. De plus, cette analyse permet de détecter facilement les arômes artificiels puisqu'ils n'existent pas par définition dans le monde végétal et animal. Néanmoins, cette analyse qualitative ne nous renseigne nullement sur l'origine naturelle ou synthétique des molécules analysées.

Une analyse quantitative devrait donner des renseignements utiles sur des rajouts éventuels de molécules de synthèse dans un extrait naturel. Malheureusement, il est quasiment impossible d'établir des banques de données quantitatives pour les arômes, car leur volatilité et leur fragilité vis-à-vis d'agents physiques et chimiques entraînent des modifications profondes de leurs concentrations relatives au cours des diverses étapes technologiques mises en jeu pour la fabrication des aliments. Seuls des ajouts massifs de molécules de synthèse entraînant des concentrations finales nettement supérieures aux concentrations attendues pourront être détectés.

En allant dans un sens croissant de complexité, une analyse énantiomérique peut apporter des preuves supplémentaires du rajout de molécules de synthèse, mais seulement si ces molécules possèdent des centres

Un atelier de mélanges sur fond d'aromatègue. Doc. Sanofi.

d'asymétrie. En effet, il est assez fréquent que certaines formes énantiomériques de molécules aromatiques soient minoritaires ou inexistantes dans la nature. Comme les molécules de synthèse sont généralement vendues sous la forme d'un mélange racémique, leur introduction dans un extrait naturel se traduit par une déviation anormale de ce rapport isomérique. Néanmoins, il est possible, à un coût plus élevé, de synthétiser l'énantiomère désiré et de reproduire par mélange le rapport « naturel ». L'hémisynthèse faisant appel à une bioconversion d'un produit de synthèse achiral en un produit chiral, ou la fermentation d'un mélange racémique de synthèse dégradant sélectivement un des deux énantiomères, permet d'atteindre ce but plus simplement que par synthèse pure. Néanmoins, les produits de telles réactions biologiques ne possèdent pas le label « naturel ».

La solution ultime à la disposition des chimistes est alors d'effectuer des dosages isotopiques sur le carbone, l'hydrogène ou l'oxygène. Le dosage sur le carbone, qui peut être effectué en couplant un chromatographe en phase gazeuse et un spectromètre isotopique, indique si les diverses molécules de l'extrait sont d'origine fossile ou non, donc issues de la synthèse ou non. Cependant, il est toujours possible d'utiliser, lors de la synthèse, moyennant encore un surcoût, une matière première enrichie en isotopes qui sera détectée comme naturelle par une telle analyse. D'autres dosages isotopiques complémentaires, par exemple du rapport isotopique de chacun des atomes de la molécule par résonance magnétique nucléaire, permettront alors de détecter la fraude. De telles analyses ne portent que sur des molécules importantes commercialement par leur tonnage vendu, et dont la différence de prix entre le naturel et le synthétique est très importante (vanilline, anéthol). Elles ne permettent pas à ce jour de contrôler des molécules qui, en raison de leur très bas seuil de perception, sont rajoutées en très faibles quantités dans les aliments (exemple du corps cassis qui remplace les extraits de bourgeons de cassis).

Cette partie de cache-cache entre analystes et fraudeurs ne concerne pratiquement que les professionnels, dans la mesure où l'inocuité des substances utilisées est garantie et puisque ces énormes différences de prix entre molécules naturelles et synthétiques ne se répercutent que peu sur le produit fini. Néanmoins, il est normal que le contenu soit conforme à l'indication dès l'instant où une règle d'étiquetage a été établie.

L'assimilation des molécules de bioproduction et de bioconversion à des molécules naturelles semble, dans cet esprit de contrôle, souhaitable dans la mesure où ces molécules seront indissociables des molécules naturelles par quelque analyse que ce soit. Elles sont en effet absolument identiques puisque produites à partir de produits naturels par des systèmes biologiques.

En conclusion, il paraît évident que les arômes ne présentent pas de danger pour le consommateur, dès lors que les extraits utilisés, qu'ils soient issus de synthèse, d'une extraction de produits naturels ou de bioconversion, ne contiennent pas de trace de solvants organiques. Les molécules utilisées sont, comme nous l'avons vu, soit naturelles, soit identiques au naturel à de très rares

exceptions près. La tendance actuelle est à l'abandon complet de l'artificiel et au retour aux seules molécules naturelles. De plus, pour finir de rassurer le consommateur, ces molécules, quoique fortement présentes par l'impression olfactive qu'elles provoquent, ne sont finalement présentes qu'à des concentrations n'excédant souvent pas la centaine de parties par million (mg/kg), quelquefois même pas quelques parties par billion ($\mu\text{g}/\text{kg}$).

Les innovations technologiques récentes vont dans le sens d'un retour en force du naturel, bien que celui-ci ait toujours eu la première place du marché. Elles vont également dans le sens d'une amélioration de la qualité aromatique, car l'extraction de traces à partir de parties de plantes ne permet pas toujours, en raison de la fragilité et de la réactivité de certaines substances aromatiques, d'obtenir la qualité espérée.

Chimie et agriculture

L'exemple du vignoble français

Jean Grelon

De tout temps les agriculteurs se sont efforcés d'imaginer des systèmes de production adaptés aux contraintes du milieu et aux possibilités des hommes, et les techniques, d'abord empiriques, ont été progressivement perfectionnées. A l'avènement de l'ère industrielle, la chimie a fait une entrée en force dans le monde agricole, d'abord dans le domaine des engrais puis dans celui des produits phytosanitaires (voir tableau I). La période euphorique des débuts s'est bientôt effacée devant les coûts de plus en plus élevés de la production agricole au moment où la saturation des marchés tirait les prix à la baisse. Par nécessité, les exploitants ont dû réapprendre à gérer de façon économe les facteurs de production, en constatant que les résultats obtenus sur le plan financier n'étaient pas à la hauteur des dépenses engagées. La modification du comportement des exploitants, qui s'est traduite par une réduction des achats d'engrais et de produits phytosanitaires, a eu une incidence sur l'industrie chimique en freinant partiellement l'innovation. Actuellement, en ce qui concerne les engrais, la consommation européenne, qui est une des premières du monde, (18,6 millions de tonnes sur les 132 consommés dans le monde en 1986-1987) est en train de plafonner (tableaux II, III et IV) ; il en est de même pour celle des produits

phytosanitaires chez les principaux pays concernés. Elle serait même en régression aux États-Unis et au Japon. Enfin, il faut tenir compte des graves problèmes d'environnement liés à la pollution par les nitrates et, dans une moindre mesure, par les phosphates.

Pour faire face à cette situation et à la mise en place du marché unique de 1993, l'industrie chimique réorganise ses outils de production, concentre ses entreprises, implante des nouvelles unités au cœur même du marché européen et surtout développe une recherche scientifique performante tant dans le domaine des nouvelles molécules que dans celui des biotechnologies, des semences ou de l'agro-alimentaire.

Le secteur particulier de la viticulture n'échappe pas aux problèmes généraux du monde agricole, car une vive situation de concurrence s'est développée, aussi bien sur le marché intérieur que sur les marchés d'exportation, si bien qu'un contrôle sévère des coûts de production s'impose désormais à tous les viticulteurs.

Il faut pour cela agir sur les postes coûteux, parmi lesquels celui de la protection des cultures occupe une large place. À côté des traitements contre les ravageurs, la lutte contre les mauvaises herbes par l'application de produits mis au point par l'industrie chimique mondiale a été un apport considérable en viticulture au cours des dix dernières années.

Par rapport à la culture traditionnelle, le désherbage chimique a influé sur le bilan de l'exploitation, en agissant non seulement sur le prix de revient mais encore sur la disponibilité de la main d'œuvre et la consommation d'énergie. Du côté du produit récolté, il a permis de meilleurs rendements ainsi qu'une amélioration de la qualité du vin, le vigneron ayant désormais davantage de temps pour traiter sa récolte. Ajoutons enfin que l'aspect esthétique d'une vigne propre est pour le producteur comme pour le visiteur-consommateur un argument en faveur du récoltant.

Si, pendant plusieurs années, le désherbage chimique a paru une solution facile, on s'est vite aperçu que son utilisation non raisonnée faisait apparaître un certain nombre de difficultés. Outre le problème général de la pollution des sols, on constate une évolution de la flore avec l'extension des plantes vivaces et ligneuses et le développement de phénomènes de résistance à certaines familles chimiques, en particulier les triazines. C'est pourquoi, sans remettre en question la liaison chimie-viticulture, de nouvelles techniques de lutte contre les mauvaises herbes sont apparues, mettant en œuvre un nouveau mode d'utilisation des herbicides ou encore une nouvelle façon culturale. Il appartient désormais au viticulteur de raisonner son désherbage en choisissant la technique la mieux adaptée à la situation de son exploitation, et de la mettre en pratique dans les meilleures conditions.

LES MAUVAISES HERBES OU ADVENTICES

Selon la définition de l'Afnor (Association française de normalisation), une mauvaise herbe est « *une plante*

herbacée ou, par extension, une plante ligneuse qui, à l'endroit où elle se trouve, est indésirable ». Ainsi, une plante usuelle quelle qu'elle soit peut devenir « mauvaise » si, tout simplement, on ne veut pas d'elle dans une culture.

Pourquoi sont-elles là ? D'abord parce qu'elles se trouvent dans les sols. On estime en effet que les terres cultivées en contiennent des millions à l'hectare. Il y a donc là une réserve considérable, et cela d'autant plus que la longévité de certaines d'entre elles peut atteindre plusieurs dizaines d'années. De plus, ces plantes sauvages ont la plupart du temps un pouvoir de fructification et de dissémination intense. Pensons par exemple aux semences de pissenlit transportées par le vent ou aux graines de saule et de peuplier qui envahissent les routes au printemps. Enfin, leur qualité de plantes sauvages leur confère une réelle agressivité vis-à-vis des plantes cultivées, agressivité qui se traduit par la concurrence pour la nourriture et par la possibilité de résistance aux traitements. C'est donc une lutte incessante entre le cultivateur et la nature.

Les mauvaises herbes appartiennent à de nombreuses familles botaniques. Leur distinction en plusieurs groupes est basée sur leurs caractères biologiques.

Les annuelles

Elles bouclent leur cycle en une année. Certaines germent en automne, passent l'hiver à l'état de rosette, fleurissent au printemps et disparaissent avant l'été. D'autres ne germent au printemps qu'après avoir subi le froid de l'hiver ; elles fleurissent en été pour mourir au début de l'automne. En revanche, certaines espèces plus méridionales ont besoin de chaleur ; elles germent en été avant de disparaître, elles aussi, au début de l'automne. Enfin, il y a le groupe des indifférentes, aux exigences très souples, qui peuvent germer tout au long de l'année et même présenter plusieurs cycles de génération par an. Telles sont le pâturin annuel, la capselle bourse-à-pasteur, le séneçon, le mouron blanc.

Les bisannuelles et pluriannuelles

Certaines espèces, après avoir germé, construisent une rosette, entrent en repos, puis fleurissent et fructifient la seconde année. Ce sont les bisannuelles, comme la carotte. D'autres fleurissent et persistent d'une année sur l'autre, développant ainsi plusieurs cycles successifs : pissenlit, mauve des forêts.

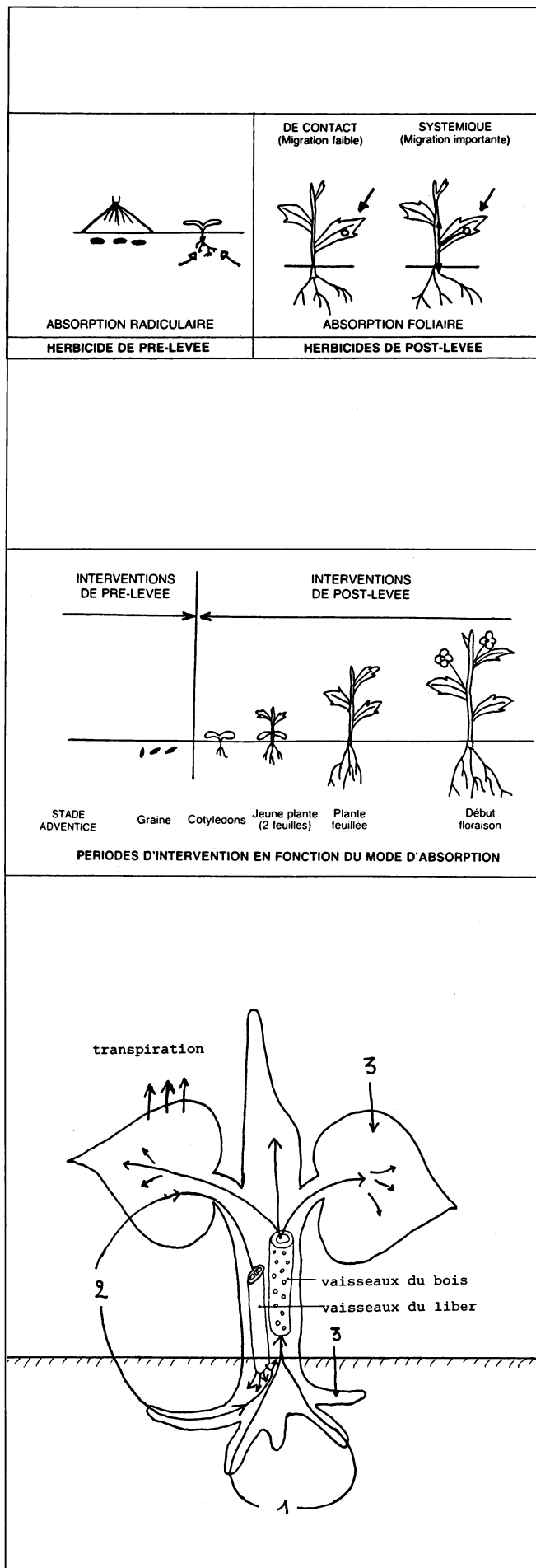
Les vivaces

Alors que la reproduction des annuelles, bisannuelles et pluriannuelles est toujours forte, celle des vivaces est presque négligeable. C'est l'appareil végétatif qui, sous diverses formes (bulbe, rhizome, stolon, etc.), assure la multiplication et la pérennité de l'espèce. Le liseron, bien connu, est une espèce à rhizome particulièrement envahissante.

Les semi-ligneuses et ligneuses

La disparition du désherbage mécanique a fait que les ronces, les lianes du genre clématite ou garance ont envahi les vignes. Il n'est pas rare de voir dans certains vignobles de jeunes arbres : chênes, ailanthes, etc.

Ainsi se succèdent dans l'année des espèces de différents groupes qui vont donner au vignoble une physionomie saisonnière. En général, au printemps dominent les annuelles, puis celles-ci disparaissent devant les



vivaces qui en été occupent le sol ; enfin, au début de l'automne apparaissent les annuelles d'hiver tandis que, çà et là, tout particulièrement autour des pieds de vigne, les lianes et semi-ligneuses prennent, si l'on n'y prend pas garde, de plus en plus d'extension.

LA LUTTE CHIMIQUE (fig. 1,2,3)

Face à cette situation, le vigneron qui désire utiliser la lutte chimique n'a que l'embarras du choix, car les spécialités commerciales proposées par les différentes firmes de produits phytosanitaires sont nombreuses. La classification des matières actives est basée sur leur mode d'absorption par les plantes et leur utilisation par les agriculteurs.

Les herbicides de pré-levée

Il s'agit de produits à action préventive. Déposés sur un sol nu, ils agissent sur les levées de graines en pénétrant au niveau des racines. Pour que leur action soit efficace, il est nécessaire que leur application soit suivie d'une pluie (en général 30 à 50 mm) ; ils migrent alors dans les couches superficielles du sol et sont absorbés par les racines des jeunes plantes au fur et à mesure de leur germination.

La solubilité de l'herbicide, et donc sa persistance ou rémanence, sa plus ou moins grande vitesse de migration en fonction de la nature du sol (argileux ou sableux), la teneur de celui-ci en matière organique sont autant de facteurs qui interviennent sur l'efficacité du produit.

En général, les herbicides de pré-levée ont peu d'action sur les herbes en place, en particulier les vivaces. En revanche, dans des sols filtrants ils peuvent provoquer sur la vigne des symptômes de toxicité. Leur emploi doit donc être raisonné et tenir compte de la nature du sol et des conditions climatiques.

Les herbicides de post-levée

Ils sont absorbés par les feuilles. En raison de ce mode d'absorption, ils doivent être appliqués directement sur des adventices déjà développées. Leur gros inconvénient est que la plupart d'entre eux ne sont pas sélectifs de la vigne. Il est donc nécessaire de prendre des précautions pour éviter les projections du produit, soit directement sur le feuillage, soit indirectement par les embruns.

On en distingue deux catégories, ceux qui ont une action uniquement de contact, et qu'on appelle encore défanants, et ceux qui ont en plus une action systémique. Les premiers détruisent de façon rapide tout ce qui est herbacé, mais leur action est temporaire, et les réserves de

Fig. 1 : Types d'herbicides.

Fig. 2 : Périodes d'intervention, (d'après Agulbon et coll.).

Fig. 3 : Voies de pénétration et de transport des herbicides chez les plantes supérieures (d'après Tissut et Severin, 1984).

1 - Pénétration par les racines et transport par les vaisseaux du bois.

2 - Pénétration par les feuilles (contact) et transport par les vaisseaux du liber.

3 - Action de contact uniquement.

la plante permettent souvent une reprise de la végétation. C'est pourquoi leur meilleure utilisation est en début d'apparition des mauvaises herbes. La seconde catégorie concerne des herbicides qui, après avoir pénétré dans la plante au niveau des feuilles, sont véhiculés dans la racine et dans la tige au moyen du système vasculaire. Tous les organes sont donc susceptibles d'être atteints. Les herbicides dits systémiques ont donc une action plus complète ; en particulier, ils sont efficaces sur les plantes vivaces.

Les associations d'herbicides

Quel que soit le type d'herbicide employé, il est rare que la destruction des mauvaises herbes soit complète. Ceci est dû soit au mode d'action de l'herbicide non adapté aux adventices en place, soit au spectre d'efficacité du produit qui ne couvre pas la totalité des espèces présentes. Pour résoudre cette difficulté, les firmes phytosanitaires proposent des spécialités où sont associés des produits de modes d'action différents, par exemple un herbicide de pré-levée et un herbicide de contact, un herbicide anti-graminées et un herbicide antidicotylédones. Dans tous les cas il sera nécessaire de tenir compte des remarques ci-dessus concernant la présence plus ou moins abondante des mauvaises herbes, la nature du sol et les conditions climatiques. Les mélanges peuvent être faits par le vigneron, mais il faut en ce cas faire attention à l'incompatibilité de certaines formulations, à la possible baisse d'efficacité du mélange réalisé en raison d'une réaction chimique, ou encore aux erreurs de dosage.

LA CONDUITE DU DÉSHÉRBAGE

En pratique, devant une vigne à désherber le vigneron a plusieurs choix possibles :

Faire un désherbage temporaire

Le vignoble est traité selon les techniques habituelles de labour et de sarclage, mais une flore de mauvaises herbes peut s'installer localement et abondamment. Un passage supplémentaire de labour serait onéreux en temps. On peut préférer un désherbage chimique sur les taches au moyen d'un herbicide de contact ou d'un herbicide systémique. L'efficacité n'en reste pas moins aléatoire, et le coût en sera élevé.

Faire un désherbage localisé à une bande de terrain située de part et d'autre de la ligne de ceps

Le milieu de l'inter-rang continue à recevoir les façons culturales habituelles. La conduite de ce mode de désherbage n'est pas facile à contrôler, car les mauvaises herbes encore présentes sur l'inter-ligne sont autant d'éléments défavorables à la propreté du rang, soit en raison de la possible dissémination des graines et des fruits des annuelles, soit en raison de la croissance des rhizomes et stolons des vivaces.

Faire une non-culture totale

Cela consiste à appliquer des produits herbicides sur toute la surface du sol et à supprimer les façons culturales. Cette technique nécessite au départ une opération assurant la mise à plat du sol suivie de l'épandage d'un herbicide persistant à action racinaire, dont la dose par hectare tient compte de la nature du sol. On recommence les années suivantes en fonction du régime des pluies, et on intervient au cours de la saison avec des produits de post-levée si c'est nécessaire.

LES LIMITES DU DÉSHÉRBAGE

L'usage mal raisonné des produits phytosanitaires engendre plusieurs difficultés, en particulier celle de prévoir la phytotoxicité des matières actives sur la vigne. En effet, en raison de leur diversité, les espèces à combattre présentent des réactions différentes selon leur sensibilité au produit. De plus, on sait que la répétition de l'emploi de produits contre les maladies des plantes et les ravageurs provoque des déséquilibres écologiques qui se traduisent par la pullulation de certaines espèces ou l'apparition de races résistantes. Il en est de même pour les adventices.

En effet, sur un sol où la concurrence entre espèces n'existe plus, les mauvaises herbes trouvent des conditions nouvelles de développement ; certaines, limitées antérieurement à des milieux particuliers, se multiplient considérablement. On constate alors que les espèces annuelles, qui constituaient le fonds commun des adventices des cultures sarclées, disparaissent et sont remplacées par des espèces bisannuelles puis vivaces ou même parfois ligneuses. Il se produit ainsi une évolution de flore un peu comparable à celle que l'on constate lors du passage de la pelouse à la forêt lorsque l'homme n'intervient pas.

Certaines espèces échappent aussi à l'action d'un herbicide parce que, la plupart du temps, le spectre d'action du produit n'est pas assez étendu. On constate par exemple que les urées substituées favorisent le gaillet, que les phytohormones de synthèse en font de même pour le vulpin. Quelquefois, c'est une erreur de manipulation qui a entraîné un mauvais positionnement de l'herbicide par rapport à l'adventice que l'on veut éliminer. On la retrouve intacte après le passage. Une pluie trop faible ou un soleil trop ardent peuvent rendre certains produits inefficaces.

Enfin, depuis plusieurs années sont apparus des phénomènes de résistance aux herbicides. Ils ont pour cause les caractères génétiques des espèces. Il peut s'agir soit d'une sélection naturelle au sein d'une population soit d'une mutation qui rend la plante insensible au traitement. Le premier cas connu de résistance a été signalé aux États-Unis en 1970 : il s'agissait d'une population de sénéçon. Depuis, ce nombre n'a fait qu'augmenter, si bien qu'actuellement on connaît une cinquantaine d'espèces résistantes dans le monde, dont une vingtaine en France.

Un vignoble envahi par les adventices. Cl. J. Grelon (ci-contre).



UNE SOLUTION : LE PROGRAMME DE DÉSHÉRBAGE

Face à cette stratégie adaptative des plantes, le vigneron doit raisonner son désherbage, c'est-à-dire étudier un programme d'action qui tiendra compte de la nature du sol, du climat de la région, de l'âge du vignoble (les jeunes plants sont plus sensibles aux produits) ainsi que des adventices présentes, ce qui suppose de sa part une bonne connaissance de la flore locale et des produits employés, surtout lorsque ceux-ci sont des mélanges d'herbicides de pré et de post-levée. Il lui est recommandé également de faire une rotation de produits.

Dans les régions où la non-culture est pratiquée, la tendance actuelle est au fractionnement des doses avec deux ou trois applications (généralement en février puis en mai-juin). On surveille alors l'apparition des dicotylédones résistantes, et, pour certaines espèces, telles le liseron, on ne traitera qu'après leur complet développement.

Le programme, quel qu'il soit, doit être adapté chaque année et tenir compte de la situation particulière des régions.

Ainsi, en Champagne, le désherbage par la non-culture est pratiqué à peu près partout ; de même en Anjou et en Touraine, où 90 % des vignes reçoivent des herbicides. En général, cette application se fait du printemps à l'automne. Les autres vigneron utilisent encore les techniques traditionnelles, mais certains (2 %) tentent une nouvelle méthode, celle de l'enherbement permanent.

Dans ce procédé, seul le rang est désherbé, le reste du vignoble est ensemencé en graminées (fêtuque ou ray-grass) ou en légumineuses (trèfle) ce qui permet de lutter contre l'érosion et la dégradation des sols par le passage des engins. Le vignoble d'Alsace utilise un peu toutes ces méthodes ; de même celui de Bourgogne. Les vigneron bordelais du Médoc et des Graves emploient uniquement les techniques d'autrefois ; ceux de l'Entre-deux-mers désherbent le rang, laissant la végétation naturelle spontanée s'installer dans l'entre-rang où elle est fauchée régulièrement. Enfin, les sols des vignes du midi sont griffés superficiellement ; la non-culture intégrale ne pouvant être pratiquée en raison de la sécheresse.

On constate donc une grande variété de situations et de réponses aux problèmes posés. Le désherbage chimique du vignoble français reste finalement une opération très complexe et, aujourd'hui encore, assez mal maîtrisée.

L'APPLICATION DES HERBICIDES

Traiter une vigne contre les mauvaises herbes est une opération toute différente de celle qui consiste à la protéger contre les maladies ou les insectes. En effet, il s'agit ici de recouvrir le sol d'un produit toxique contre certaines plantes tout en protégeant la végétation en place ; il faut donc éviter les pulvérisations génératrices d'embruns. Pour cela, le matériel devra à la fois couvrir la totalité de la surface à désherber, produire des gouttes suffisamment grosses et les projeter sur le sol à une faible pression.

En dehors des spécialités qui se présentent sous la forme de granulés, ce qui est généralement le cas pour les produits de pré-levée qui sont ainsi directement répandus sur le sol, les herbicides sont proposés sous forme de poudre ou de bouillie qu'il faut diluer au moment de l'emploi. Les différents modèles de pulvérisateurs comportent toujours :

- une cuve d'assez grandes dimensions permettant de ne faire qu'un seul passage par hectare (environ 300 à 500 litres) ;
- un ensemble régulateur et contrôleur avec amortisseur de pression et manomètre ;
- un distributeur de produit associé à une ou deux rampes munies de buses à fente ou à miroir. Les premières projettent directement le produit sur le sol, les secondes le font après avoir projeté d'abord le produit sur une surface polie.

ACTION HERBICIDE ET RÉACTION DES PLANTES (fig. 4, 5, 6, 7)

L'application des produits phytosanitaires ne donne pas toujours les résultats escomptés, soit parce que les plantes que l'on désire détruire demeurent en partie en place après le traitement, soit parce que la culture est elle-même atteinte de phytotoxicité en raison du manque de sélectivité du produit. Il faut en effet se rappeler que la plupart des herbicides sont toxiques pour toutes les plan-

tes, et que seuls le mode d'emploi et les doses d'application permettent à la fois la destruction des mauvaises herbes et la protection de la culture. C'est donc tout le problème de la sélectivité des produits qui se trouve ainsi posé, l'idéal à atteindre étant que toutes les plantes indésirables soient détruites, mais surtout pas celles que l'on veut protéger.

La sélectivité d'un herbicide par rapport à une plante peut s'exercer d'abord en fonction de la position de celle-ci dans le sol. Un herbicide peu soluble dans l'eau, tels la simazine ou le diuron, ou fortement retenu en surface par les colloïdes du sol, telle la trifluraline, n'aura d'action que sur les plantes à enracinement superficiel. Les graines de petite taille dont la racine demeure en contact suffisamment longtemps avec le produit seront également détruites. Inversement, les produits plus solubles migrent en profondeur et peuvent atteindre les plantes à enracinement profond. On parle ici de sélectivité de position.

La sélectivité de l'herbicide peut s'exercer aussi en fonction des caractéristiques morphologiques de la plante. La position de la feuille dans l'espace, la surface foliaire, la présence d'une cuticule plus ou moins épaisse, la pilosité sont autant de facteurs qui agissent sur la rétention et la pénétration du produit. En général, les feuilles de graminées sont peu mouillables, les plantes jeunes ont une cuticule peu épaisse, une feuille glabre retient très peu le produit, une feuille à forte pilosité le retient beaucoup mieux mais la pénétration est faible. Enfin, il faut tenir compte de l'humidité atmosphérique : un temps chaud et

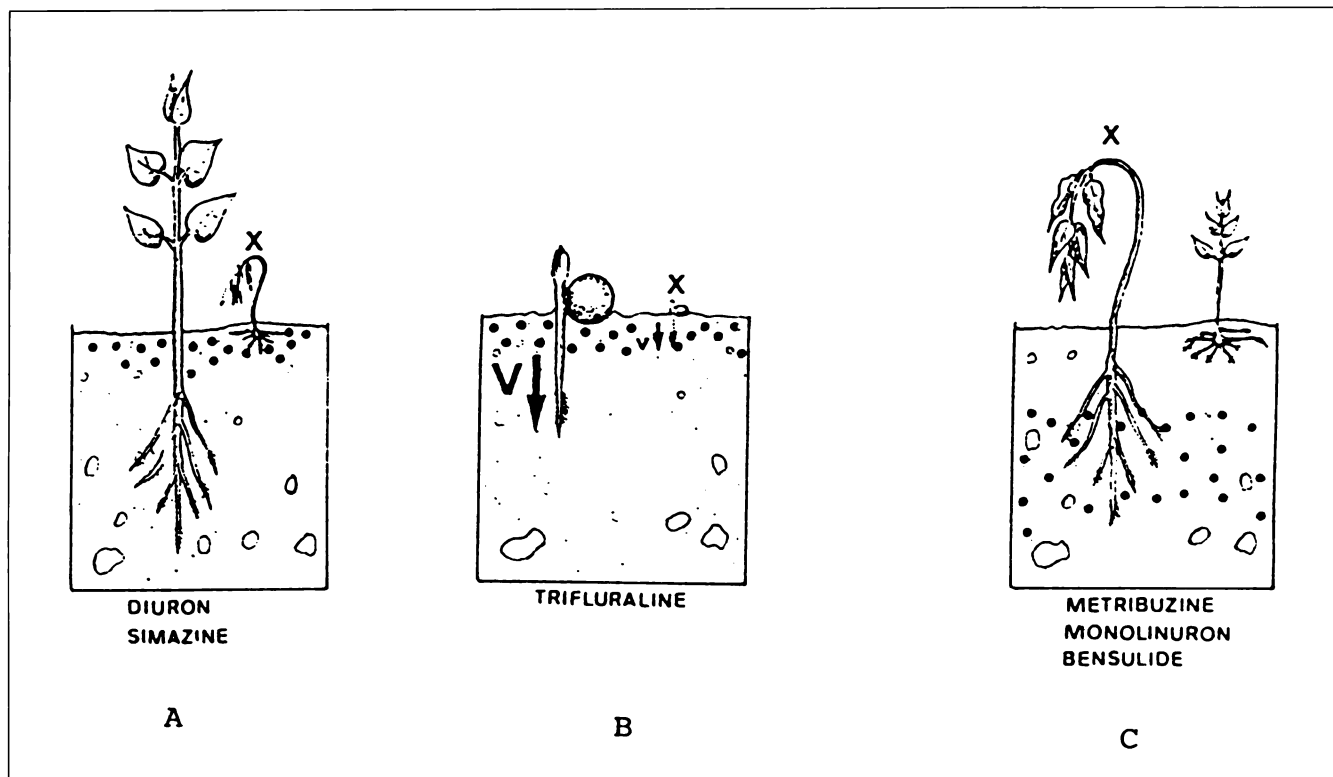
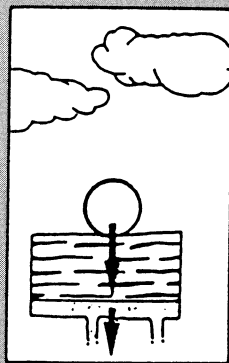
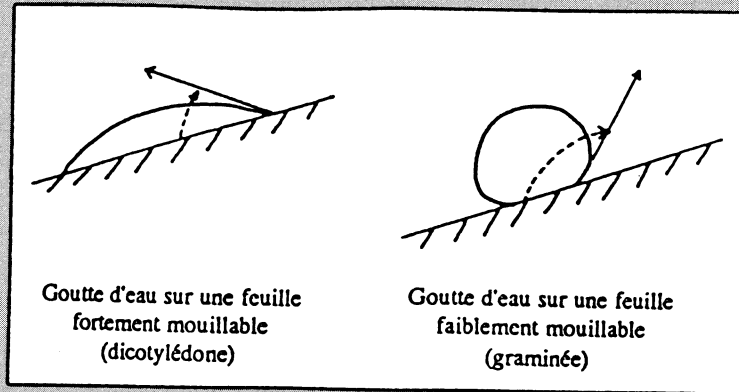


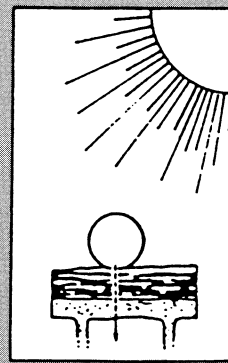
Fig. 4 : Sélectivité d'un herbicide en liaison avec sa position dans le sol
 • herbicide ;
 X plante atteinte par l'herbicide ;
 V semence de grande taille dont la racine se développe rapidement ;
 v semence de petite taille dont la racine reste dans la zone d'herbicide.
 (D'après Tissut et Severin).

Fig. 5, 6, 7 : Herbicide et morphologie foliaire (d'après Severin, 1987).

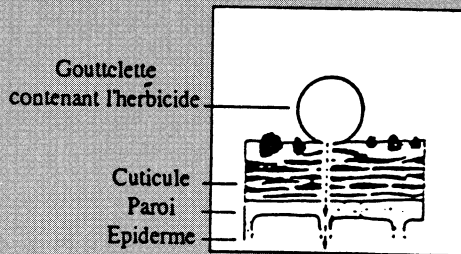
Herbicide et morphologie foliaire



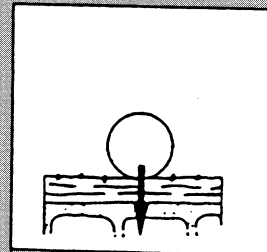
Temps "poussant" :
pénétration cuticulaire forte



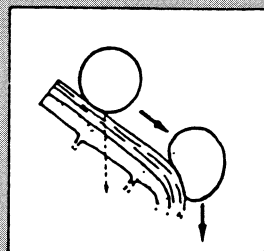
Temps sec :
pénétration cuticulaire faible



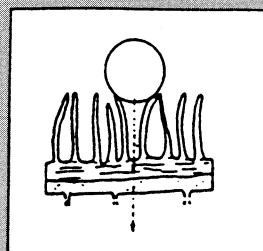
Cuticule de plante âgée :
faible pénétration



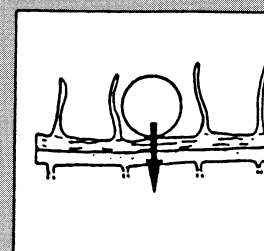
Cuticule de plante jeune :
pénétration forte



Feuille glabre :
tendance au lessivage
Ex. Ail des vignes,
certaines crucifères.



Forte pilosité :
faible pénétration
Ex. Grémil, Myosotis.



Faible pilosité :
pénétration favorisée
Ex. Mouron des champs,
Pensée sauvage.

humide favorise la pénétration, parce que la couche cireuse de cutine, normalement imperméable, se gonfle et peut ainsi favoriser les échanges d'eau à travers la paroi cellulaire.

La sélectivité de l'herbicide peut enfin s'exercer en fonction des caractéristiques physiologiques de la plante. Nous avons vu ci-dessus que l'utilisation des herbicides favorisait le maintien d'espèces bisannuelles et vivaces au détriment des espèces annuelles plus sensibles. Ceci est dû à la présence de réserves souvent localisées dans un système racinaire très développé qui favorise la reprise de la plante. Il existe donc une large sélectivité entre les annuelles et les autres.

Détruire les bisannuelles et vivaces suppose que l'herbicide puisse être transporté par les vaisseaux jusque dans les parties souterraines. Or on sait que certains herbicides sont très peu transportés, ce sont les herbicides de contact qui tuent les cellules au seul point d'application. Utilisables contre les annuelles, ils sont peu efficaces sur les espèces à réserves importantes. La recherche s'est appliquée à la réalisation de produits systémiques qui circulent dans les vaisseaux du liber et peuvent ainsi atteindre les organes les plus éloignés. Toutefois la règle n'est pas générale, et un bon nombre de produits systémiques efficaces sur certaines espèces ne le sont pas sur d'autres. Ceci introduit à la notion de détoxification et de résistance de la plante aux herbicides.

Les herbicides sont des produits toxiques. Or, pour la survie de l'écosystème agricole, il est indispensable que leur toxicité disparaisse. En général les sols contiennent toute une flore et une faune de microorganismes qui assurent cette dégradation jusqu'au CO_2 , H_2O , N_2 , NO_3 . Il en est de même chez les plantes qui par divers procédés peuvent rendre les herbicides partiellement ou totalement inefficaces. Ce peut être par la localisation et l'accumulation en des sites inactifs comme les cellules sécrétrices, par la fixation sur une autre molécule, généralement un sucre ou un acide aminé, avec formation d'un complexe non toxique, enfin par la dégradation partielle ou totale par voie enzymatique ou non. On connaît actuellement de telles détoxifications pour la simazine, le 2,4 D et l'aminotriazole.

On entend souvent parler de plantes résistantes aux traitements. En réalité, la notion de résistance s'applique à une espèce ou à une population d'individus ayant acquis par sélection une capacité d'insensibilité à l'action d'une molécule toxique. Le phénomène est donc différent de celui qui a été évoqué précédemment dans le cas de la détoxification. Ici en effet la molécule toxique n'est pas dégradée et se retrouve donc intacte dans les organes à une dose suffisante pour en provoquer la destruction. Les hypothèses quant à l'explication de cette insensibilité font intervenir soit la fixation de la molécule toxique sur certains sites inactifs, soit une modification de la protéine cible qui empêche la fixation de la matière active. En bref, la clé ne s'adapte plus à la serrure.

Le cas de certaines espèces de chénopodes résistants aux triazines, et en particulier à l'atrazine, est un exemple actuellement bien connu. L'atrazine bloque la photosynthèse en stoppant le transport des électrons par les quinones des

chloroplastes, et ceci en se fixant sur un site protéique bien précis. C'est une légère modification de la structure de cette protéine qui empêche la fixation de la matière active. On parle de résistance chloroplastique. Cette résistance peut être décelée par de nombreuses méthodes, en particulier par l'étude de la fluorescence des parties chlorophylliennes, la fluorescence devenant très forte en cas de blocage. La résistance chloroplastique concerne plusieurs espèces (amarante, sénéçon, chénopode, morelle, pâturin); le gène dominant serait porté par l'ADN chloroplastique. Il s'agirait donc d'une transmission à hérédité cytoplasmique et non nucléaire.

QUELLES PERSPECTIVES ?

Protéger de manière efficace une culture contre les mauvaises herbes fait appel, nous l'avons vu, à la notion de sélectivité, l'idéal étant que, pour une culture donnée, un herbicide détruise toutes les mauvaises herbes présentes ou potentielles, et, en même temps, soit sélectif de l'espèce cultivée.

Une des voies de recherche consiste à trouver de nouveaux herbicides sélectifs en les testant au laboratoire sur les adventices et sur les espèces à protéger. On réalise ainsi un criblage différentiel pouvant faire apparaître des résistances naturelles au produit testé. C'est ce procédé qui a permis de découvrir la plupart des molécules, et qui est toujours utilisé. Il faut cependant remarquer que c'est une méthode empirique aux rendements faibles et aux résultats aléatoires. La recherche s'oriente actuellement vers l'obtention de nouvelles molécules pouvant être utilisées à faible dose sur des cibles biochimiques bien précises, par exemple une enzyme responsable de la synthèse du carotène.

Une autre voie de recherche semble très prometteuse, celle qui fait appel aux biotechnologies et en particulier au génie génétique. On a dit ci-dessus que la résistance naturelle de certaines espèces à l'atrazine était liée à la présence d'un gène localisé sur l'ADN des chloroplastes. Par ailleurs, un certain nombre d'herbicides, par exemple le glyphosate, ont une très grande efficacité sur la plupart des mauvaises herbes tout en étant rapidement dégradés dans le sol. S'il était possible de transférer la résistance naturelle à l'atrazine à une plante cultivée ou de lui faire acquérir une résistance au glyphosate, on aurait du même coup résolu un bon nombre de problèmes de désherbage. Les techniques de biotechnologie permettent de tels transferts.

Actuellement, il existe plusieurs méthodes pour introduire une résistance dans une plante.

La sélection conventionnelle consiste à croiser une espèce résistante à l'herbicide avec une espèce cultivée. Ce procédé classique est limité par la nécessité de disposer d'une plante résistante susceptible de réaliser ce croisement. Il faut ensuite sélectionner les hybrides. C'est une technique longue.

La fusion de protoplastes (cellules végétales dépourvues de paroi) évite les contraintes de la reproduction sexuée. Généralement, on opère la fusion en utilisant des



chocs électriques. Les cellules hybrides ou cybrides sont ensuite régénérées par culture *in vitro* puis sélectionnées. Ici encore, il faut disposer d'une plante résistante dont les protoplastes peuvent être fusionnés facilement avec ceux de la plante cultivée.

Les cultures *in vitro* de tissus de plantes permettent d'abord d'obtenir de nombreux individus que l'on peut ensuite soumettre à différents stress : traitements mutagènes, mise en contact progressive avec l'herbicide, etc. On peut ainsi provoquer l'apparition d'individus résistants que l'on sélectionnera et rajeunira. Ce procédé a permis d'obtenir quelques résultats pour le maïs et le tabac, mais les essais pour rendre les plantes insensibles au glyphosate se sont pour le moment soldés par des échecs.

La technique du génie génétique consiste à introduire dans la culture un gène correspondant à une protéine qui apportera la résistance à l'herbicide. Les cultures utilisées sont des protoplastes ; l'introduction du gène se fait soit directement avec de l'ADN nu, soit par l'intermédiaire d'une bactérie phytopathogène.

Récemment, les techniques de fusion de protoplastes ont permis de réaliser l'introduction d'une résistance chloroplastique aux herbicides du groupe des triazines dans quelques lignées du colza d'hiver. Sur le plan commercial, un seul produit est disponible. Il a été obtenu par les méthodes de sélection conventionnelles.

La lutte chimique contre les mauvaises herbes ne s'est pas encore généralisée dans le vignoble français. Les raisons en sont diverses : qualité des sols, climat peu favorable, échecs répétés ou insuffisance des résultats,

peut-être aussi une certaine appréhension en face de produits chimiques toxiques, non seulement pour les plantes et les sols, mais également pour l'homme. Ce qui est certain, c'est que l'emploi de ces méthodes nécessite de la part de l'utilisateur une réelle technicité, et que la lutte chimique bien conduite n'a aucun effet néfaste sur la qualité et la quantité du produit récolté.

On peut souhaiter une amélioration de la spécificité des matières actives et une plus grande efficacité de leur spectre d'action, ce qui permettra de diminuer les doses et de traiter moins en traitant mieux.

Des méthodes plus biologiques et plus écologiques que chimiques commencent à être utilisées, en particulier l'enherbement permanent. Il peut être en effet tentant de remplacer la technique de la non-culture par une couverture permanente ou temporaire de graminées ou de légumineuses sur tout ou partie de la surface cultivée.

Les effets se situent au niveau des sols et de la vigne. Au niveau des sols, on constate une diminution de l'érosion et une meilleure stabilité au passage des engins, une amélioration de leur qualité par augmentation de la teneur en matière organique. En revanche, les gelées printanières sont plus nombreuses. En ce qui concerne la vigne, on a constaté une baisse de vigueur et une diminution des rendements, ceci en raison de la concurrence pour l'alimentation en eau.

Actuellement, un protocole expérimental a été mis en place par le groupe « vigne » ANPP-Columa pour étudier les effets de l'enherbement sur la vigne. C'est une preuve de l'intérêt que ce procédé suscite. A défaut de « la solution de demain pour tous », cette technique permettra aux nombreux viticulteurs qui le souhaitent de pouvoir lutter autrement contre les mauvaises herbes.

CONCLUSION

Au terme de cette étude consacrée à une mise au point sur les méthodes et les perspectives de la lutte chimique contre les mauvaises herbes dans le vignoble français, un certain pessimisme pourrait se dégager face à un éventuel recul de l'emploi de la chimie non seulement dans le domaine spécifique de la lutte phytosanitaire, mais sans doute aussi dans le domaine des engrais.

En effet, le regard que l'on peut jeter sur l'évolution des ventes de produits phytosanitaires en France dans les années récentes n'incite pas à l'optimisme. Il en est de même pour la fabrication des engrais. Selon J.-Cl. Achille, président de la Fédération nationale de l'industrie des engrais, en France, la consommation, tous produits confondus, plafonne depuis plusieurs années autour de quinze millions de tonnes. Si la consommation de l'azote progresse, celle des phosphates continue de baisser, tandis que la demande en potasse reste stable.

De plus, bien que toutes les sociétés travaillent dans le domaine de la synthèse chimique pour mettre au point de nouvelles molécules, on constate que parallèlement la

Chemin de roulement dans un vignoble pour le passage des engins. Cl. J. Grelon.

plupart des acteurs se sont engagés dans des programmes de recherche en biotechnologies, et plus particulièrement dans celui des transferts de gènes. Si on ajoute les contraintes écologiques ainsi que l'effet perturbant du futur marché unique européen qui entraîne une adaptation aux rigueurs croissantes des normes écotoxicologiques et des procédures d'homologation, en même temps qu'une harmonisation des prix et de la fiscalité, on peut craindre que la demande de tous ces produits n'en soit affectée.

Face à cette situation, les grands groupes se diversifient en élargissant leur champ d'action. Depuis une dizaine d'années, les firmes de produits chimiques ou agro-alimentaires se sont restructurées et ont fait une intrusion forte dans le monde des semences et des biotechnologies végétales, créant elles-mêmes leurs propres unités de recherche. La demande en nouvelles variétés est importante, tandis que parallèlement leur durée de vie tend à diminuer. Il y a donc une stimulation de la recherche fondamentale avec un glissement très net vers une privatisation au détriment des pratiques traditionnelles de l'agronomie.

Il en est de même dans le secteur de la production des aliments pour le bétail, avec la fabrication de produits de substitution des céréales. Le chiffre d'affaires est évalué en France à 40 milliards de francs. L'élargissement à l'Europe et la mondialisation ne pourront que favoriser cette activité.

L'industrie chimique a été largement présente jusqu'ici dans le monde agricole, avec la fourniture d'engrais et de produits phytosanitaires (fongicides, insecticides, herbicides). Elle prend pied maintenant dans le domaine des semences et de l'alimentation animale. Il lui reste certainement de beaux jours en perspective.

Bibliographie

- R. Agulhon et coll. *Désherbage de la vigne*, Guide pratique, Institut technique de la vigne et du vin, 1984, 156 p.
- ANPP-Columa - Groupe vigne -, *Protocole d'études des effets de l'enherbement sur la vigne*, Association nationale pour la protection des plantes, Comité français de lutte contre les mauvaises herbes, 1990, 9 p.
- R. Calvet et coll., *les Herbicides et le sol*. ACTA, 1977, 144 p.
- Economie et finances agricoles*, 1989, 239.
- B. Fabre et M. Gugliemi, « L'évolution des pratiques agricoles et leurs répercussions sur le milieu. Point de vue d'un économiste et d'un agronome », *Défense des végétaux*, 1988, 25, pp. 3-11.
- A. Fougeroux, « De nouveaux horizons », *Phytoma*, 1989, 414, pp. 24-25.
- G. Freyssinet, « Résistance aux herbicides et transfert de gènes », *Phytoma*, 1990, 415, pp. 9-13.
- G. Freyssinet et coll., *Nouvelles Approches de la résistance des cultures aux herbicides : la résistance au bromoxynil*. C.R. Ac. Agric. Fr., 1989, 75, 6, pp. 49-55.
- P. Gaillardon, « Les nouveaux herbicides », *Phytoma*, 1990, 415, 8.
- J. Grelon, « Remarques sur la flore adventice des vignobles de la Loire moyenne : région de Bourgueil, Chinon, Saumur » *Bull. Soc. Et. Sci. de l'Anjou*, 1989, 13, pp. 171-178.

J. Grelon et J.-Cl. Lepine, « Résultats de cinq années de désherbage en vignoble ; comparaison de quatre programmes », Journées d'études sur le désherbage, 11^e conférence du Columa, Versailles, 1981, pp. 652-664.

J. Grelon et Ph. Guigneault, « Un essai sur le désherbage en verger de pommiers », *Bull. Soc. Et. Sci. de l'Anjou*, N.S., 1982, t. XI, pp. 65-71.

Ph. Jauzein, « La résistance des mauvaises herbes aux herbicides », *Phytoma*, 1989, 405, 17-25 et 406, pp. 21-27.

La France agricole, 1989, 2317.

J. My, « Onze nouvelles molécules à Brighton », *Phytoma*, 1990, 414, pp. 24-25.

P. Ricci, « L'induction des réactions de défense chez les plantes », C.R. Ac. Agric. Fr., 1989, 75, 6, pp. 65-72.

F. Severin, « Cuticule végétale et pénétration cuticulaire des herbicides de post-levée », *Défense des végétaux*, 1987, 246, pp. 21-24.

J. Tempe et M. Sorin, « L'Apport du génie génétique dans le domaine phytosanitaire », *Phytoma*, 1989, 413, pp. 45-51.

J. Thomzik et R. Hain, *Introduction de la résistance à la métribuzine dans le colza double zéro*, C.R. Ac. Agric. Fr., 1989, 75, 6, pp. 57-61.

M. Tissut et coll., *les Pesticides, oui ou non ?* Presses universitaires de Grenoble, 1979, 234 p.

M. Tissut et F. Severin, *Plantes, herbicides et désherbage*. Association de coordination technique agricole (ACTA), 1984, 252 p.

Tableau I

Repères historiques

Début du XIX^e : première utilisation en France, Belgique et Angleterre de phosphates d'origine organique (os) et de cendres de végétaux pour améliorer la qualité des sols.

Vers 1830 : Lawes met en évidence sur sa propriété de Rothamsted, en Angleterre, l'action fertilisante des phosphates minéraux.

1840 : Liebig, chimiste allemand, imagine la fabrication des superphosphates.

1840 : les premières cargaisons de guano du Pérou et de nitrates du Chili arrivent en France.

1843 : première utilisation du soufre pour la protection du vignoble.

1852 : Boussingault crée à Nantes la première station de recherche agronomique.

1872 : utilisation de l'arsenic pour lutter contre le doryphore.

1875 : Deberain crée le champ d'expériences de la station agronomique de Paris-Grignon.

1885 : la « bouillie bordelaise ».

1940 : le Suisse Müller découvre les propriétés du DDT.

1946 : création de l'Institut national de la recherche agronomique.

Tableau II

Consommation d'engrais en 1985-1986 (en millions de tonnes d'éléments fertilisants)

	Monde	CEE	France
Azote	70	9,4	2,4
Anhydride phosphorique	33	4,5	1,5
Oxyde de potassium	26	4,6	1,8
Total	129	18,5	5,7

(source : FAO)

Tableau III

Évolution de la consommation mondiale de pesticides (en millions de dollars)

Années	Herbicides	Insecticides	Fongicides	TOTAL
1987	8 600	6 100	4 100	20 000
1986	7 600	5 450	3 250	17 400
1985	7 075	5 000	2 800	15 900
1980	4 891	3 916	2 199	11 565
1970	940	1 000	600	2 700
1960	170	310	340	850

(source : UIPP)

Tableau IV

Évolution de la structure des ventes phytosanitaires en France (%)

	1983	1984	1985	1986	1987
Fongicides	31,2	33,7	32,2	33,1	33,0
Insecticides	16,1	16,6	16,3	17,4	17,0
Herbicides	46,3	43,3	44,6	42,3	42,2
Divers	6,4	6,4	6,9	7,2	7,8
Total	100	100	100	100	100

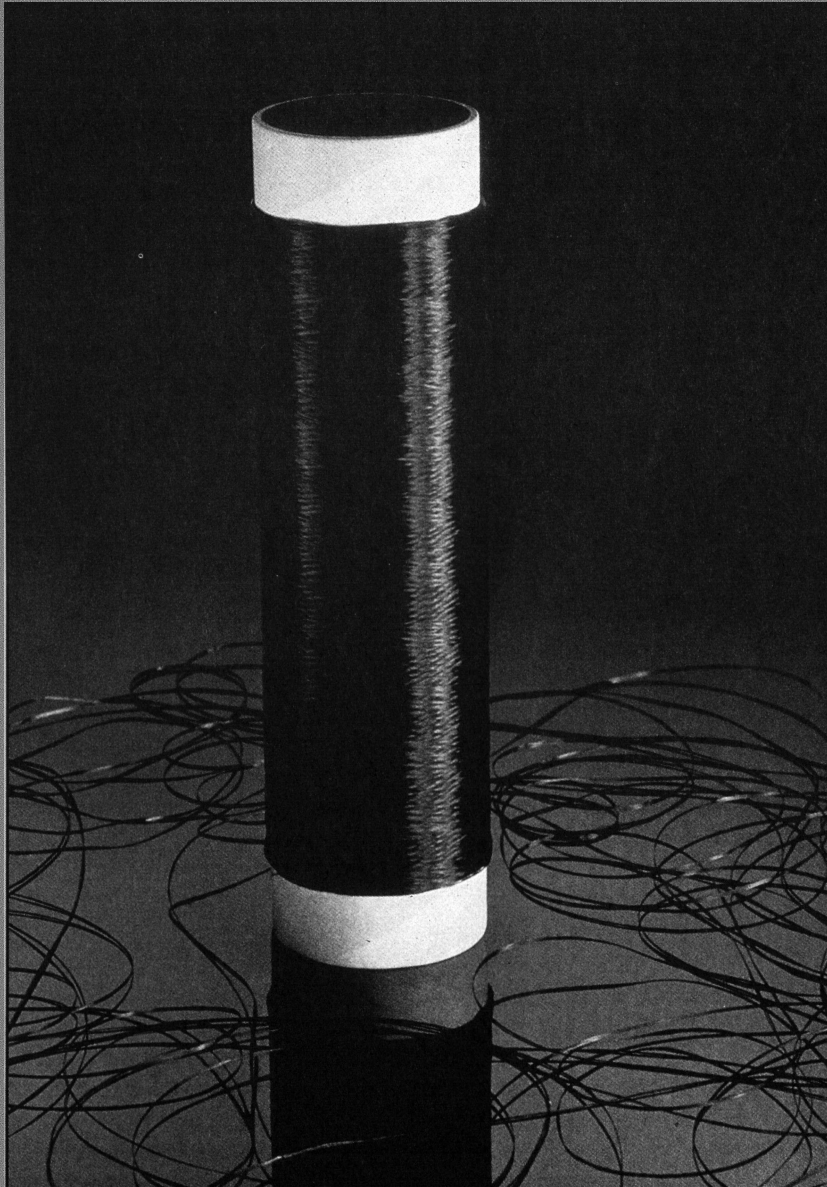
(source : UIPP)

Tableau IV bis

Évolution de la structure des ventes phytosanitaires en France, par type de produits (en millions de francs)

	1983	1984	1985	1986	1987
Fongicides	2 203,3	2 687,3	2 755,0	2 956,5	3 102,3
Insecticides	1 136,0	1 323,7	1 390,8	1 556,2	1 588,7
Herbicides	3 266,6	3 458,9	3 809,5	3 780,4	3 965,7
Divers	446,8	507,2	588,0	641,3	742,0
Total	7 052,7	7 977,1	8 543,3	8 934,4	9 398,7

(source : UIPP)



Les matériaux

Une histoire vieille comme celle de l'homme

Jacques Hui

Si, vers 2000 avant Jésus-Christ, les médias avaient existé, sans nul doute se seraient-ils faits les messagers d'un grand enthousiasme pour ce nouveau matériau de l'époque, le bronze, fruit de la créativité des hommes et de leur capacité à inventer de nouveaux produits à partir de matières plus élémentaires. Depuis que l'homme existe, il n'a cessé d'inventer de nouveaux matériaux à partir des ressources de la planète ou à partir de matériaux existants dont il maîtrisait l'élaboration. Le concept de matériaux nouveaux traduit donc à la fois un état permanent et une relativité temporelle. Un matériau n'est réellement nouveau que par rapport à ceux qui le précèdent. Il y a de moins en moins de discontinuité, comme ce fut peut-être le cas au passage de l'âge de la pierre à l'âge du bronze puis à l'âge du fer – encore les historiens n'étaient-ils pas là pour nous raconter comment les choses se sont passées – mais l'évolution continue vers des matériaux de plus en plus complexes, soit par leur mode d'élaboration, soit par leurs caractéristiques. Il faut donc attribuer à l'amplification médiatique cette large publicité faite au cours des vingt dernières années aux « nouveaux matériaux ». Que ce soit en chimie ou en métallurgie, les chercheurs mettent au point de nouveaux produits pour mieux répondre aux besoins existants ou pour satisfaire

Les fibres céramiques entrent dans la fabrication de composites permettant de résoudre des problèmes techniques dans des conditions extrêmes.

de nouveaux besoins. Mais il s'écoule en général une longue période entre la découverte de laboratoire et la véritable innovation technologique. Économie et exigence de fiabilité étirent dans le temps le processus de développement et font que les espoirs suscités à l'origine s'ameublissent parfois au fil des ans quand les résultats objectifs viennent se substituer à des anticipations parfois hasardeuses. Ainsi en est-il de l'histoire des nouveaux matériaux comme de celle de l'industrie en général. Elle n'en est pas moins une histoire passionnante, et, au commencement de cette dernière décennie du XX^e siècle, il est intéressant d'en faire le point, d'en mesurer les succès et les limites, de se livrer à quelques prédictions sur son avenir.

Après avoir ainsi tenté de démystifier le concept de nouveaux matériaux, il est temps néanmoins de revenir à son acception la plus courante, celle qui a été consacrée par un colloque organisé en juin 1983 par le Commissariat à l'énergie atomique et le ministère de l'Industrie et de la Recherche, avec pour thème « matériaux nouveaux pour un nouveau industriel ».

L'inventaire retenu par ce colloque et repris depuis en de multiples occasions classe les « nouveaux matériaux » en six rubriques principales :

- les polymères nouveaux ;
- les matériaux composites ;
- les céramiques techniques ;
- les matériaux pour l'électronique ;
- les nouveaux alliages métalliques ;
- les produits de la métallurgie des poudres.

Les deux dernières rubriques n'entreront pas dans le cadre de cet article qui s'intéressera exclusivement aux matériaux issus de l'industrie chimique, céramiques, plastiques et leurs composites. Il nous semble néanmoins nécessaire de souligner qu'il s'agit là d'un domaine très actif. Les métallurgistes ne cessent de mettre au point de nouveaux alliages qui sont un segment important de l'univers des nouveaux matériaux et entrent parfois en concurrence directe avec les matériaux élaborés par les chimistes. Nous pensons en revanche qu'une septième rubrique doit aujourd'hui venir s'ajouter à la liste ci-dessus. Il s'agit des matériaux supraconducteurs. L'importance qu'ils ont prise depuis 1986, en particulier au niveau des programmes de la recherche publique comme de la recherche industrielle, leur mérite une mention séparée des autres catégories.

Quel rôle la chimie joue-t-elle dans le développement de ces nouveaux matériaux ? Quelles sont leurs utilisations potentielles ? Telles sont les questions auxquelles nous essaierons d'apporter quelques éléments de réponse sans prétendre être exhaustifs, compte tenu de la complexité et de la richesse de ce domaine.

UNE RÉPONSE À DES BESOINS GRÂCE À DES PROPRIÉTÉS SPÉCIFIQUES

Les matériaux nouveaux ne résultent pas de la seule curiosité scientifique ou de la volonté de faire progresser les connaissances. Leur élaboration fait appel à ces deux démarches, mais ils sont avant tout réponse à des besoins

du marché. Ces besoins peuvent être classés en deux ensembles principaux :

- des besoins existants et aujourd'hui satisfaits par d'autres matériaux ; il s'agit par exemple des éléments de structure d'une automobile ou d'un avion, des céramiques diélectriques d'un condensateur multicouche, des câbles coaxiaux pour le téléphone ou la télématique, etc. Ces applications font largement appel aux matériaux traditionnels, mais les nouveaux matériaux peuvent conduire à des évolutions technologiques majeures qui se traduisent, pour ces applications, par des performances accrues (consommation d'essence pour une voiture, rayon d'action et/ou charge utile pour un avion, nombre de couches et taille pour un condensateur, capacité de transport pour un câble coaxial) ;

- des besoins nouveaux liés au développement de nouvelles industries ou à l'évolution profonde d'industries existantes ; ainsi en est-il du domaine spatial ou de l'avion supersonique qui imposent des contraintes nouvelles en matière de résistance mécanique à température élevée, des transports de surface à très grande vitesse qui demandent des performances mécaniques élevées et une grande fiabilité, de l'industrie des télécommunications qui a besoin de transmettre des volumes d'information de plus en plus importants, de l'industrie alimentaire tant au niveau de la conservation (congélation) qu'à celui de l'utilisation (cuisson par micro-ondes).

Dans les deux cas les nouveaux matériaux apportent des propriétés spécifiques directement liées aux propriétés d'usage des objets ou systèmes qu'ils serviront à fabriquer. Cinq domaines de propriétés sont particulièrement importants :

- *Le poids*

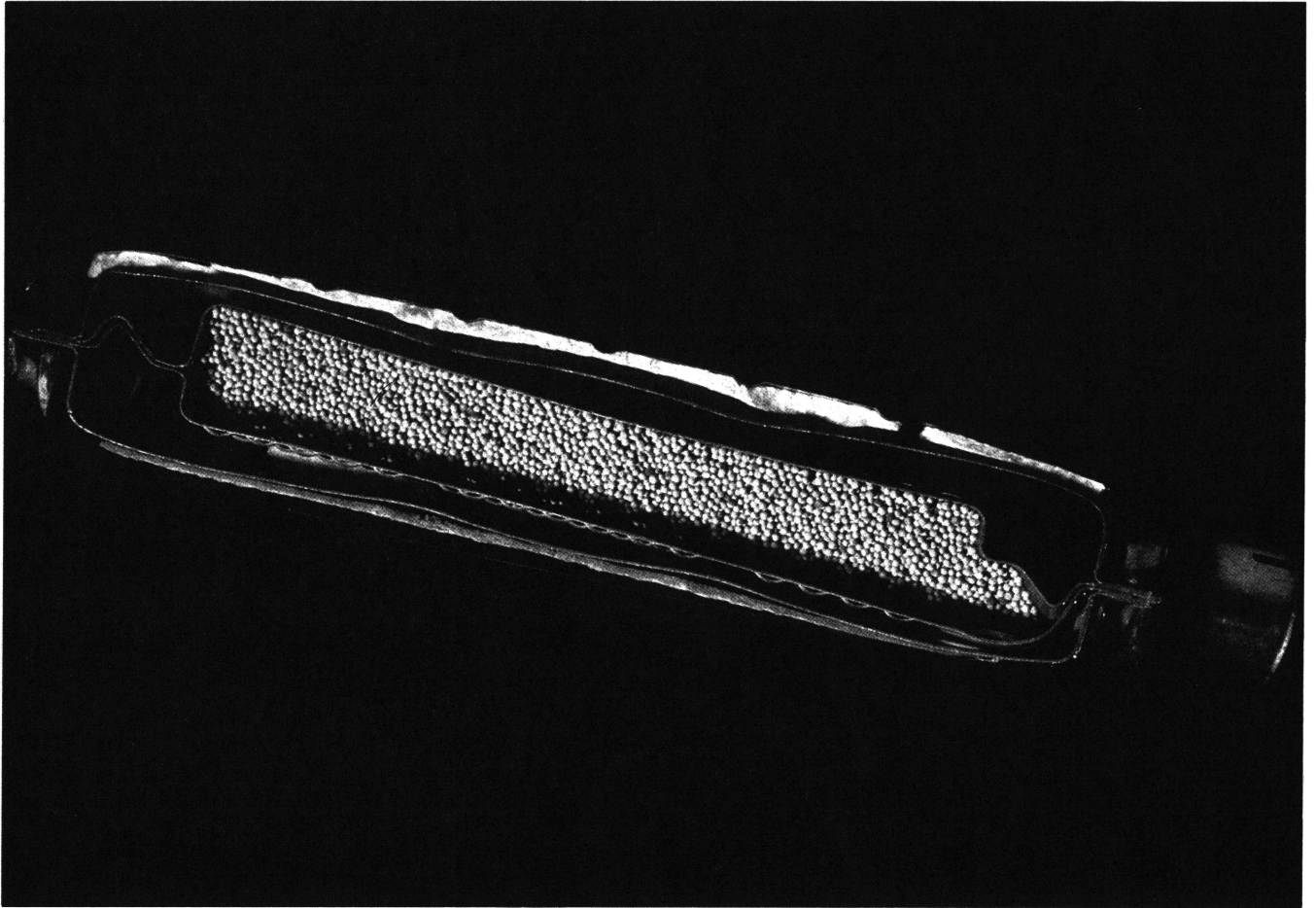
Il constitue un facteur essentiel dans l'évolution des transports de surface comme dans celle du transport aérien. En 1983, l'acier et la fonte représentaient environ les trois quarts du poids d'une automobile de tourisme, la part de l'aluminium et des plastiques étant inférieure à 10 %. En 1993, ces proportions devraient passer respectivement à 66 % pour l'acier et la fonte, et à 19 % pour l'aluminium et les plastiques.

De même, une étude du Bipe (1985) mentionne que les composites intervenaient pour 6,5 % dans le poids des matériaux servant à construire le mirage 2000. En 1987, le prototype du Rafale utilisait 25 % de matériaux composites, et il est prévu qu'en 1995 le nouvel avion de combat français en compte 30 %.

Même évolution en ce qui concerne l'aviation civile où l'on est passé progressivement de 9 % de composites en 1982 pour l'Airbus A 310-200 à 18 % en 1988 pour l'Airbus A 320-100, ce qui a conduit à un gain de poids global de 4 % ; la tendance pour les nouveaux avions commerciaux des années 1995-2000 viserait à atteindre 25 %, voire davantage, et permettrait des gains de poids de 7 à 10 %.

- *Les propriétés mécaniques à température élevée*

Dans la zone immédiatement supérieure à 200°, le problème du maintien des propriétés mécaniques se pose dans tous les systèmes où se développent des échauffements importants (pièces d'automobile sous capot, machi-



nes tournantes, circuits électriques à haute densité de courant) ; c'est un domaine d'application privilégié pour les plastiques hautes performances.

Une seconde zone de température voit son intérêt grandir avec le développement de l'industrie de l'espace et avec l'augmentation de la température de fonctionnement des moteurs ; c'est celle des températures supérieures à 1000° C auxquelles sont exposés les corps de rentrée dans l'atmosphère, certains éléments frontaux des navettes spatiales, certaines parties chaudes des rotors de turbine à gaz ou des tuyères de fusées ou d'avions. Composites carbone-carbone et matériaux céramiques sont aujourd'hui les principaux candidats à la résolution des problèmes techniques posés par ces conditions extrêmes.

- La résistance chimique

La corrosion reste dans l'industrie un facteur de coût élevé, tant par le prix de remplacement des appareils endommagés que par le manque de fiabilité et les pannes qui en résultent. Céramiques et polymères apportent dans ce domaine des éléments de solution, pour les premières dans le domaine des températures élevées (échangeurs, bagues et garnitures mécaniques, buses de brûleurs), pour les seconds à plus basse température (cuves, tuyauteries, revêtements internes). L'élaboration de matériaux composites permet de combiner des propriétés de résistance mécanique satisfaisante avec la grande inertie chimique de certains polymères.

La résistance à l'oxydation des matériaux utilisés dans l'industrie spatiale relève de la même préoccupation. Elle

limite l'utilisation des composites carbone-carbone sauf traitement particulier de ceux-ci pour les isoler de l'atmosphère environnante.

Cette inertie chimique trouve aussi son application dans le domaine médical pour la réalisation de prothèses, d'implants ou de tous équipements destinés à rester en contact prolongé avec une partie du corps humain.

- Les propriétés électriques et électromagnétiques

Elles interviennent dans des applications très diversifiées des nouveaux matériaux, qu'il s'agisse des dispositifs de transport de l'information (passage de l'électronique à l'optronique et développement de l'optique non linéaire), des problèmes de « furtivité » des avions militaires (invisibilité aux radars), de la recherche de performances diélectriques améliorées (condensateurs multicouches, supports de circuits), de circuits intégrés à haute densité et à accès rapide, des phénomènes de supraconductivité.

Plastique de hautes performances, produits minéraux et organiques de très grande pureté, céramiques et composites sont utilisés dans ce domaine ; la durée de l'un ou l'autre de ces matériaux dépend de l'application envisagée et de la fonction recherchée.

- Les propriétés de surface

Les applications peuvent être là aussi très diverses ; nous en citerons quatre parmi les principales : l'abrasion, l'adhésion, le frittage, le supportage des catalyseurs.

Pot catalytique : une morphologie et des propriétés de surface très reproductibles sont les qualités requises pour les catalyseurs d'épuration des gaz d'échappement.

La résistance à l'abrasion est le domaine privilégié des céramiques grâce à la dureté de leur surface ; elles sont utilisées dans les pièces de moteur soumises à frottement, les bagues et garnitures, les revêtements de filières et les guide-fils de l'industrie textile.

Les propriétés d'adhésion et plus généralement de liaison entre deux matériaux différents sont obtenues avec des composés de type verrier pour certaines liaisons céramique-métal, avec des colles polymères pour les contacts plastiques-plastiques ou plastiques-métaux.

Les propriétés de frittage sont à la base de l'industrie des pièces céramiques ; les propriétés de surface des grains élémentaires de la poudre de départ, la qualité des espèces ou radicaux chimiques accrochés en surface jouent un rôle essentiel dans la cinétique de frittage, et déterminent la qualité de la densification obtenue et, par suite, les propriétés de l'objet final. Dans la mesure où elle peut modifier les conditions de surface des grains, l'atmosphère de frittage est également un facteur important. Il en est bien entendu de même des additifs et liants qui sont introduits dans la fabrication de la barbotine de départ.

Le supportage des catalyseurs doit combiner l'activité de la surface, pour permettre l'accrochage des matières actives, la morphologie du support, pour assurer une grande surface spécifique, une porosité contrôlée, une bonne circulation des fluides et la résistance thermomécanique nécessaire au moment des changements de régime de marche du réacteur catalytique. Dans le cas des supports de post-combustion automobile et tout particulièrement des monolithes, il faut également tenir compte des propriétés de dilatation thermique, celle-ci devant être aussi petite que possible. Ceci conduit à l'utilisation de produits et matériaux de plus en plus sophistiqués, tant par leur composition que par leurs caractéristiques (catalyseurs à base de zéolites, pots catalytiques bi et tri-fonctionnels).

- Les propriétés-barrières

Elles concernent essentiellement les applications d'emballage et de protection, qu'il s'agisse de la protection des aliments et/ou de leur maintien sous vide, de la substitution des plastiques au verre ou au métal pour le conditionnement des boissons gazeuses, de l'encapsulation des circuits intégrés et des produits phytosanitaires ou pharmaceutiques. Ces applications font de plus en plus appel à des matériaux composites permettant de tirer conjointement partie des propriétés spécifiques de leurs constituants.

Ces différentes propriétés déterminent les secteurs d'application des nouveaux matériaux. Les marchés concernés sont, pour certains, des marchés de grande consommation, et, pour d'autres, des marchés de haute technologie. Nous citerons, pour mémoire, l'automobile, l'électricité et l'électronique, les industries mécaniques, le bâtiment, l'emballage, les sports et loisirs, l'aéronautique et le spatial.

La figure 1 représente la répartition mondiale en valeur entre ces différents marchés pour 1988. La figure 2 montre l'évolution par secteur utilisateur en Europe de l'Ouest pour la période 1987-1995 (TCAM, taux de croissance annuel moyen).

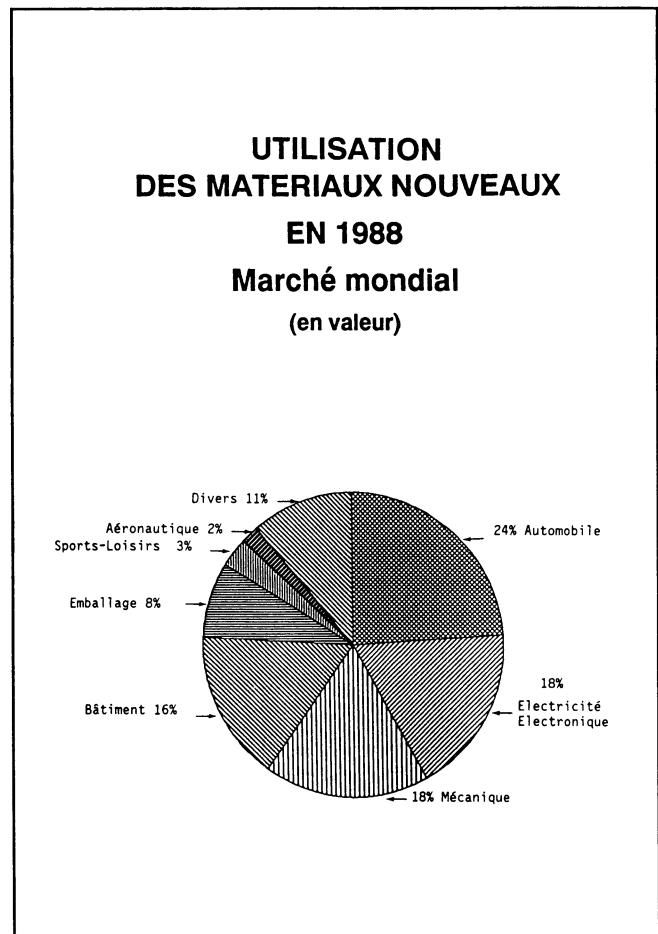


Fig. 1- Étude Bipe 1985.

Bien que pesant encore de façon limitée dans le marché global des matériaux, les nouveaux matériaux sont appelés à croître de façon significative au cours des années à venir. L'étude du Bipe déjà citée parle d'un taux de croissance annuel moyen supérieur à 6 % sur la période 1987-1995. États-Unis, Europe et Japon représentent à eux trois environ 80 % du marché mondial.

UNE GAMME DE PRODUITS TRÈS DIVERSIFIÉE

Destinés à répondre, comme nous venons de le voir, à des besoins très variés et de plus en plus spécifiques, les matériaux nouveaux ont vu leur gamme se diversifier rapidement au cours des dernières années. De façon très générale, il est habituel de les regrouper en deux grands sous-ensembles, selon les propriétés recherchées :

- des matériaux de structure caractérisés par leur contribution à la tenue mécanique d'un système dans ses conditions d'utilisation (température, pression, frottement, fatigue, contrainte, environnement chimique) ;

- des matériaux fonctionnels caractérisés par leur contribution à la réalisation d'une fonction spécifique (isolation, semi-conductivité ou conductivité électrique, magnétisme, optique non linéaire, luminescence, catalyse, résistance à la corrosion, imperméabilité aux gaz ou aux liquides, etc.).

EVOLUTION DE L'UTILISATION DES MATERIAUX NOUVEAUX PAR SECTEUR UTILISATEUR EN EUROPE

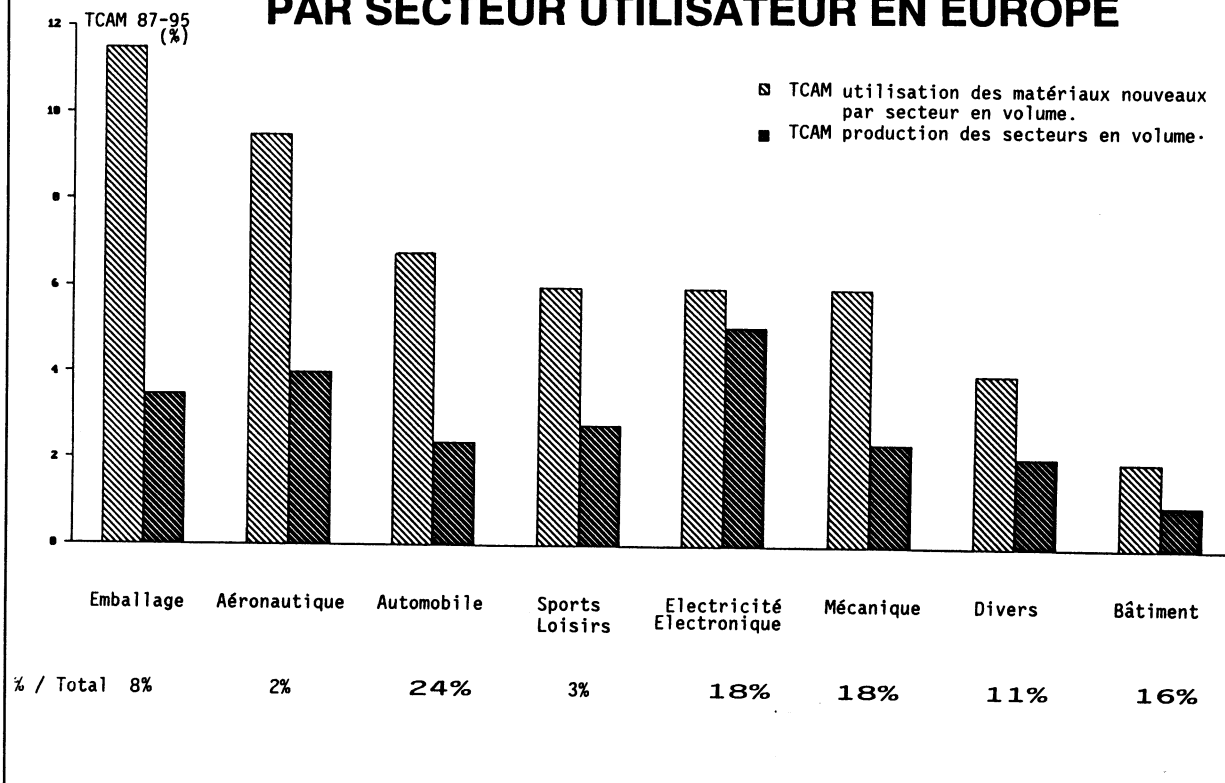


Fig. 2 - Étude Bipe 1985

La frontière entre ces deux sous-ensembles n'est pas toujours aussi nette, et certains matériaux cumulent des propriétés de structure et des propriétés fonctionnelles, soit de par leurs propres caractéristiques, soit par combinaison de plusieurs constituants conduisant à des matériaux hybrides. Le film métallisé pour condensateur est un exemple simple de matériau hybride : le film polyester apporte sa tenue mécanique (structure) et ses caractéristiques diélectriques (fonctionnel), le revêtement métallique constitue la couche conductrice (fonctionnel). Cette tendance à fabriquer des matériaux de plus en plus complexes et polyfonctionnels devrait aller croissant au cours des prochaines années.

Pour illustrer la façon dont la chimie intervient dans les nouveaux matériaux, nous allons passer successivement en revue le domaine des polymères, celui de la chimie minérale et celui de la chimie organique.

LE MONDE VIVANT DES POLYMÈRES

Il est désormais traditionnel de classer les polymères en trois catégories :

- les polymères dits de commodité ;
- les polymères techniques ;
- les polymères spéciaux.

Appartiennent à la catégorie des commodités toutes les grandes matières plastiques oléfiniques, et viny-

liques : polyéthylène, polypropylène, polystyrène, PVC, ABS et leurs copolymères et mélanges. Leur température d'utilisation est limitée à 80° C. Ils sont fabriqués en gros tonnages (leur ensemble représente mondialement près de 70 millions de tonnes) pour des marchés de grande masse qui ne demandent pas de performances élevées. Ils sont souvent produits par des sociétés intégrées sur les matières premières pétrochimiques en raison du poids important de ces matières premières dans leur économie.

Les polymères techniques dont la température d'utilisation est comprise entre 80 et 140° C correspondent à des tonnages plus faibles (environ 1,7 million de tonnes au niveau mondial). Ce sont les polycarbonates, les polyamides, les polyesters, les polyphénylène oxydes (PPO), les polyacétals, les polyamides semi-aromatiques, les polyétheramides et polyétheresters. De prix plus élevés que les précédents, ils exigent des procédés de fabrication plus complexes et doivent répondre à des caractéristiques techniques plus exigeantes. Ils sont l'objet de recherches importantes dans toutes les grandes sociétés chimiques engagées dans les matières plastiques en vue de leur faire couvrir une gamme plus large d'applications grâce à la diversification de leurs propriétés.

Ces deux catégories de polymères appartiennent maintenant au monde des matériaux traditionnels mais nous voudrions néanmoins souligner deux points particuliers :

- la transformation de ces polymères par filature ou filmature conduit à des matériaux plus élaborés qui, par

combinaison avec d'autres matériaux ou par traitement ultérieur, peuvent conduire à des matériaux nouveaux aux propriétés originales et spécifiques ;

- la mise au point à partir de ces polymères de polymères modifiés, de copolymères, de mélanges ou d'alliages permet d'atteindre dans certains cas de nouveaux produits, dont les propriétés sont voisines de celles des polymères spéciaux et leur mériteraient donc l'appellation « nouveaux matériaux ». Ainsi en est-il par exemple des polymères thermoplastiques élastiques à hautes performances qui donnent lieu à de nombreux travaux comme ceux de Upjohn sur les polyesteramides, de AJO et AK ZO sur les polyesters étheramides.

Mais les nouveaux matériaux s'identifient davantage à la troisième catégorie, celle des polymères dits « spéciaux » ou polymères hautes performances. Polyimides, polyarylates, polysulfones, polyphénylène sulfures (PPS), polyéthérimides, polyéthercétones, fluoropolymères, polymères à cristaux liquides sont les plus connus d'entre eux. Leur marché est aujourd'hui limité (30 à 40 000 tonnes mondialement). Les produits sont nombreux, fabriqués en petit tonnage ou se trouvent encore au stade du laboratoire ou en développement. Ils se vendent à prix élevé (plus de 50 \$ le kg) et permettent des températures d'utilisation supérieures à 140° C.

Bien que constituant une famille séparée de par la multitude de leurs applications, certains élastomères et certaines résines silicones peuvent être rapprochés de cette catégorie.

La chimie d'accès à ces polymères spéciaux est plus complexe et fait appel à des molécules organiques dont beaucoup contiennent des motifs aryliques. L'amélioration des connaissances en matière de structure des motifs moléculaires élémentaires et de relations entre ces structures et les propriétés du polymère permet de plus en plus au chimiste de modéliser de nouvelles molécules monomères et leur combinaison en fonction des propriétés recherchées. Les élastomères spéciaux sont l'objet de recherches actives, en particulier chez Du Pont qui tire profit dans ce domaine de ses compétences dans les polymères traditionnels et dans les polymères fluorés. Dans les thermoplastiques spéciaux, seuls les polysulfones et le PPS atteignent aujourd'hui des niveaux de production substantiels (plus de 10 000 t/an).

Beaucoup de nouveaux produits sont par contre en développement, et nous citerons brièvement quelques-uns d'entre eux :

- les polyarylates et copolyarylates conduisent à des polymères transparents aux propriétés supérieures à celles des polycarbonates ;
- les polyéthérimides et polyamides-imides concurrencent les polyimides en apportant une plus grande facilité de mise en œuvre et une meilleure résilience au prix d'une légère diminution des propriétés thermiques ;
- les polyéthéréther cétones (PEEK d'ICI) sont considérés parfois comme un substitut potentiel au polyester 2 GT (polyéthylène téréphthalate) pour l'élaboration de films minces aux propriétés améliorées ;
- les cyanates esters de Hitech Polymers, aujourd'hui filiale de Rhône-Poulenc, cherchent leur créneau entre les

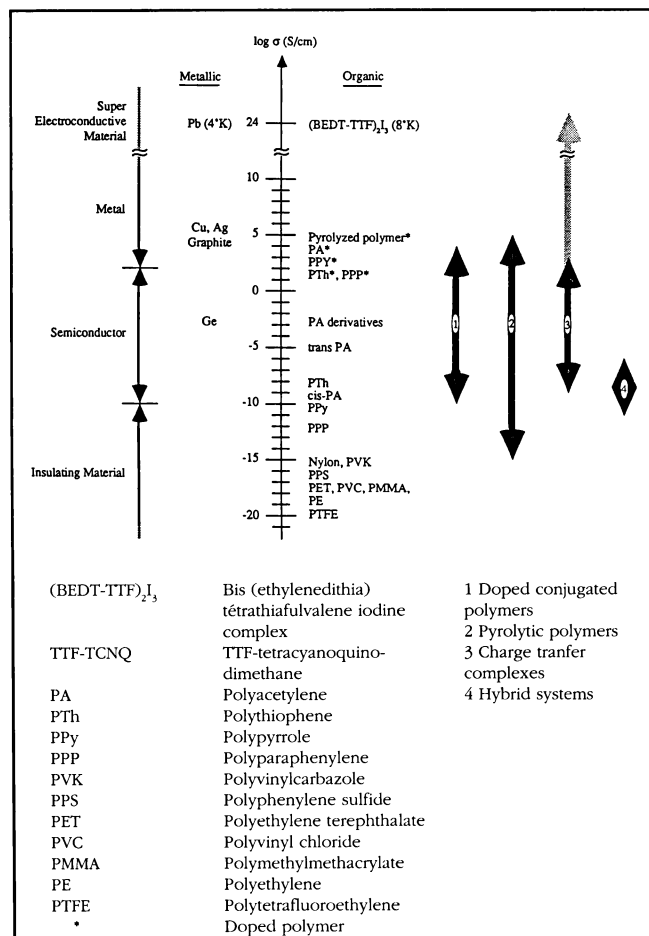


Fig. 3 - Electroconductivity of various materials ($S = \text{Siemens/centimeter}$) - Extrait du Japanese R & D Trend Analysis Electro conductor Polymers (octobre 1988).

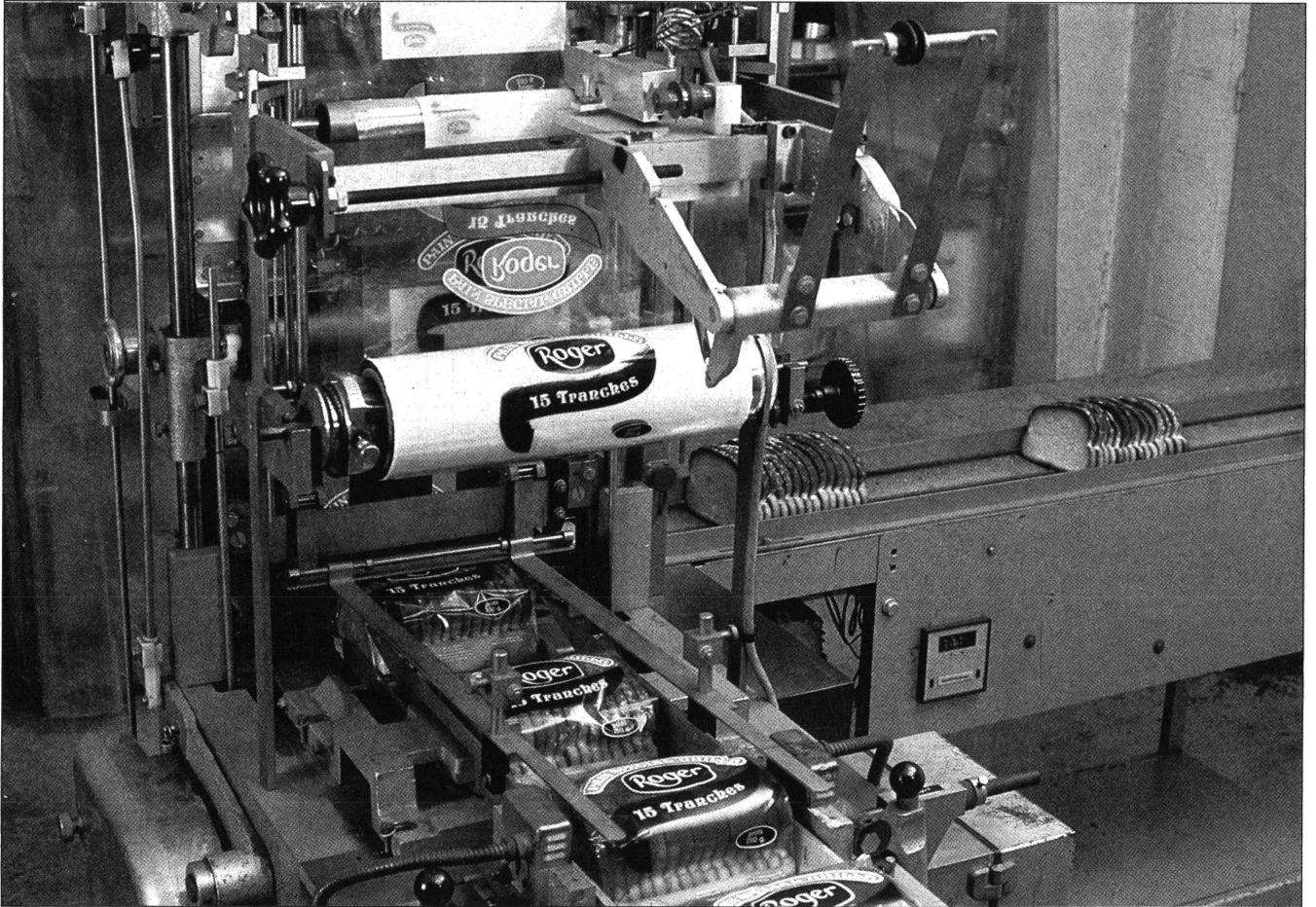
résines époxy et bismaleïmides en apportant une constante diélectrique exceptionnellement faible (< 3 vs. 3,6 au plus) et une reprise d'eau faible.

Parmi les thermodurcissables, les bismaleïmides (kérimid et kinel de Rhône-Poulenc) ont des propriétés remarquables de tenue en température qui leur ont fait trouver des applications exclusives dans certaines pièces mécaniques de l'industrie automobile et dans les supports de circuits électroniques multicouches.

Les polymères cristaux liquides (LCP) constituent une nouvelle famille caractérisée par la coexistence à l'état fondu (polymères thermotropes) ou en solution (polymères lyotropes) de propriétés de viscosité typiques des liquides (d'où une grande facilité de mise en œuvre) et de propriétés d'anisotropie typiques des solides cristallins (d'où l'existence de propriétés mécaniques particulières). Cet état est conservé au moment du refroidissement (thermotropes) ou de la mise en forme (lyotropes) et confère au polymère obtenu une orientation de tout ou partie des chaînes qui le constituent conduisant soit à des fibres haut module, soit à une sorte de renforcement

Les procédés de filmature permettent d'obtenir des matériaux dont les propriétés physiques sont adaptées à l'usage recherché. Ici, un emballage automatique de pâtisseries.

Les polymères nouveaux, ici du polypropylène utilisé dans la fabrication de cordages, ont apporté des performances inégalées dans les articles de sports et loisirs.



interne, d'où le nom de polymères autoreforçés qui leur est parfois donné. Les recherches sur les polymères lyotropes ont en particulier conduit à la mise au point et au développement du Kevlar, fibre aramide à hautes performances mécaniques et thermiques (Du Pont). Enka/Akzo a récemment débuté la commercialisation d'une fibre voisine.

Parmi les nombreux polymères thermotropes, seuls sont aujourd'hui commercialisés le Vectra de Hoechst/Celanese et le Xydar d'Amoco (matière première pour les produits Tupperware résistant au four). Sumitomo, Bayer, ICI, Du Pont et Rhône-Poulenc ont des produits de ce type en cours de développement. Ils sont susceptibles d'applications intéressantes dans les marchés des échangeurs thermiques, des pièces moulées pour l'électronique, des carcasses de moteurs électriques.

Avant de clore ce chapitre des polymères, nous évoquerons rapidement quelques orientations plus futuristes en relation directe avec le domaine des nouveaux matériaux.

Ce sont les polymères intrinsèquement conducteurs ; les polymères photosensibles ; les polymères supports (catalyseurs, enzymes, médicaments) ; les polymères codés.

Les polymères intrinsèquement conducteurs sont des structures macromoléculaires dont les propriétés de conductibilité électrique sont liées à leur structure physique. Des valeurs de 10^3 Siemens/cm ont été atteintes vs. 10^6 pour le cuivre, mais 10^{-3} pour les plastiques conducteurs élaborés à partir d'une matrice polymère traditionnelle dans laquelle sont dispersées des charges conductrices (fig. 3).

Les meilleures performances ont été aujourd'hui obtenues avec du polyacétylène « dopé » (traité chimiquement). Bien que l'interprétation en soit encore incertaine, l'existence de ces propriétés conductrices semble associée à la présence de doubles liaisons conjuguées ; contrairement à ce qui se passe dans les milieux métalliques, la conductibilité électrique de ces polymères est unidirectionnelle et leur caractère isolant demeure dans les deux autres dimensions.

D'autres polymères font l'objet de recherches dans ce domaine : polypyrroles, polythiophènes, polyanilines, polyparaphénylènes, etc.). La première application commerciale semble être l'utilisation de polyaniline pour la fabrication au Japon de microbatteries de secours pour circuits intégrés (Bridgestone Corp., 1987) ; la polyaniline constitue l'électrode positive, l'électrode négative étant en alliage Al-Li. Des recherches sont en cours dans tous les pays industriels avec la perspective d'applications diverses dans les domaines des batteries, des peintures et revêtements électroconducteurs, des protections antistatiques, des condensateurs, des capteurs, de la protection contre les champs électromagnétiques.

Les polymères photosensibles sont des structures macromoléculaires qui subissent des transformations irréversibles par absorption d'un rayonnement électromagnétique (lumière visible, UV, rayons X, électrons). Ils se sont initialement développés dans la microlithographie pour les applications électroniques. Une couche de polymère

photosensible est déposée sur l'élément de silicium. Le film ainsi obtenu est ensuite irradié à travers un masque délimitant les zones atteintes par le rayonnement et les zones protégées. On élimine ensuite la couche de polymère irradiée (photoresist positif) ou non irradiée (photoresist négatif) selon que l'action photochimique conduit à une dégradation ou à une réticulation du polymère.

Le champ d'application des polymères photosensibles s'est largement étendu et vise aujourd'hui les marchés de l'imprimerie (plaques d'impression, encres photoréticulables), des traitements de surface (adhésion, peinture et vernis en particulier dans l'industrie chimique), de l'enregistrement digital. La propriété mise en œuvre est, comme indiqué ci-dessus, la réticulation ou la dégradation du polymère sous l'action du rayonnement. Les produits comportent donc en général des fonctions absorbantes vis-à-vis des rayonnements, ces fonctions étant fixées sur des squelettes appartenant aux familles acryliques, méthacryliques, phénoliques, styréniques, époxy, polysulfones. La miniaturisation des circuits électroniques impose des polymères qui permettent la maîtrise de tracés de plus en plus fins ($0,1 \mu$). Cette résolution exige l'utilisation de rayonnements UV lointains, X ou électroniques.

Les polymères supports de catalyseurs visent à combiner la reproductibilité et la fonctionnalité des catalyseurs homogènes avec les avantages des catalyseurs hétérogènes (stabilité du support, facilité de récupération). Ils devraient également permettre l'élaboration de catalyseurs polyfonctionnels par accrochage sélectif selon les sites du support de matières actives différentes. L'obstacle à l'utilisation des polymères traditionnels réside dans les conditions réactionnelles (température, agressivité chimique) qui feront vraisemblablement privilégier pour cet usage les polymères inorganiques ; ceux-ci connaissent des développements importants en recherche et forment une sorte de pont entre la chimie minérale et la chimie des polymères.

Intéressantes également pour l'avenir sont les recherches relatives aux polymères supports pour l'immobilisation des enzymes. Les applications potentielles de la catalyse enzymatique à la synthèse organique créent un champ de développement attractif pour ce type de polymères. Le défi est alors de préparer des macromolécules qui n'inhibent ni les enzymes, ni les réactifs qui les accompagnent. Les polymères réticulés utilisés comme supports d'immobilisation dans les automates synthétiseurs de protéines constituent un exemple de ce type d'application.

Les polymères sont également utilisables pour contrôler l'activité thérapeutique de certains médicaments. La plupart des molécules actives en pharmacie sont relativement petites et diffusent facilement dans tout l'organisme humain, ce qui peut conduire à des effets secondaires chez le patient. Les macromolécules hydrosolubles traversent difficilement les membranes vivantes, elles peuvent permettre de restreindre ce phénomène de diffusion et de concentrer l'application d'un médicament qui leur serait lié à la zone précise d'introduction de ce médicament ; si, de plus, le polymère peut s'hydrolyser en fragments plus petits et non toxiques, il ne laissera pas de trace dans l'organisme.

Plus futuriste encore, l'utilisation des polymères pour copier les macromolécules biologiques en construisant des structures porteuses de fonctions successives et susceptibles d'obéir à un codage défini. L'on peut ainsi fabriquer au niveau moléculaire des éléments de stockage d'informations qui se rapprochent dans leur mode de fonctionnement de la manière dont procède la matière vivante pour stocker et transmettre ses messages. Le monde des nouveaux matériaux pour « bio-ordinateurs » est en émergence, aliment pour les amateurs de science-fiction ou germe d'une technologie du troisième millénaire.

Les quelques exemples ci-dessus montrent à quel point le monde des polymères constitue l'un des secteurs les plus actifs dans la recherche de nouveaux matériaux. Ils mettent également en évidence comment la chimie, de plus en plus fine dans ses capacités d'analyse, de plus en plus sélective dans ses procédés de synthèse, efface progressivement les frontières traditionnelles entre chimie macromoléculaire, chimie organique et chimie inorganique. La poursuite de notre exploration au sein de cette dernière ne pourra que confirmer cette tendance.

LA SURPRENANTE MOBILITÉ DU MONDE DES PRODUITS MINÉRAUX

Il y a une trentaine d'années, l'industrie chimique minérale semblait comme figée en comparaison avec la croissance explosive et apparemment sans limites de la chimie organique de synthèse. Quelques grandes familles de produits suffisaient à la décrire : grands acides minéraux, ammoniac, chlore/soude, carbonates, phosphates, silicates, engrais, oxyde de titane. La plupart des charges minérales utilisées dans les industries aval étaient d'origine naturelle. Les matériaux céramiques traditionnels faisaient appel à des produits à faible valeur ajoutée, compte tenu des usages auxquels ils s'adressaient (sanitaires, équipements domestiques, isolation électrique).

Deux phénomènes majeurs se sont produits au cours des dernières décennies et ont relancé la recherche minérale : l'extraordinaire développement de l'industrie électronique et, depuis le début des années 80, la recherche de nouveaux matériaux de structure. Cette évolution a été rendue possible grâce aux progrès considérables accomplis dans le domaine de la physico-chimie des solides et dans la maîtrise des procédés d'élaboration :

- affinement des méthodes analytiques et possibilité de doser des traces et de mesurer les paramètres principaux des microstructures par des méthodes spectro-métriques de plus en plus sophistiquées ;

- apport de l'informatique tant pour le dépouillement analytique que pour la modélisation des solides discrets ;

- amélioration de la connaissance des relations entre structures et propriétés ;

- analyse et mesure des cinétiques de passage des solutions aux solides et meilleure appréciation des transformations macroscopiques et microscopiques des solides au cours des opérations de séparation et de mise en forme

intervenant dans les processus de fabrication (filtration, séchage, calcination, broyage, etc.).

La très grande richesse des outils ainsi mis à la disposition du chimiste a entraîné un formidable regain d'intérêt pour l'industrie chimique minérale. Les nouveaux matériaux pour l'électronique et les céramiques techniques en ont été les éléments moteurs principaux. Beaucoup plus récemment, les supraconducteurs ont été à l'origine d'une troisième vague d'enthousiasme qui a fait se multiplier les études fondamentales dans ce domaine très particulier de la chimie du solide, et nous verrons que d'aucuns parlent maintenant de « matériaux intelligents » ouvrant ainsi un nouveau champ de développement à la chimie minérale.

Les matériaux pour électronique

Ils représentent un marché global de plus de cent milliards de francs que l'on peut répartir en six sous-ensembles : les matériaux pour la fabrication des semi-conducteurs ; les matériaux céramiques pour électronique ; les réactifs et matériaux pour circuits imprimés ; les matériaux de conditionnement (hors céramiques) ; les matériaux pour médias magnétiques ; les matériaux pour tubes cathodiques (hors le marché des tubes et écrans qui, à lui seul, pèse pour près de 60 milliards de francs).

Nous passerons en revue cinq familles de matériaux minéraux qui sont les plus importantes pour les applications électroniques ou apparentées : le silicium et les produits pour semi-conducteurs, les aimants permanents, les céramiques pour capteurs et les céramiques pour condensateurs, les luminophores, les pigments magnétiques.

Le silicium reste le produit le plus important avec un marché mondial de 10 à 12 milliards de francs. Il est toujours le principal constituant actif des mémoires d'ordinateur. La technologie de préparation des « wafers » a fait d'immenses progrès au cours des dernières années, et l'on sait aujourd'hui fabriquer commercialement des tranches de 20 à 25 centimètres de diamètre pouvant recevoir chacune plus d'un million de transistors.

Il y a quelques années, l'apparition des composés III-V semblait devoir faire naître un concurrent sérieux du silicium. Les nouveaux produits permettaient de fabriquer des composants plus rapides, dont le temps de commutation serait de 3 à 5 fois plus court que la nanoseconde considérée comme la limite inférieure pour le silicium. L'arséniure de gallium tient la vedette parmi ces composés III-V ; il offre en outre l'avantage par rapport au silicium de permettre la réalisation de composants optiques ; en revanche, sa conductibilité thermique est plus faible, ce qui constitue un inconvénient. Les difficultés techniques rencontrées dans la mise au point des mémoires AsGa et les progrès poursuivis dans les technologies relatives au silicium semblent avoir ralenti le développement des composés III-V, alors que l'on prévoyait pour ces nouveaux matériaux la conquête d'environ 10 % des marchés du silicium.

Les recherches continuent en vue, d'une part, de diminuer le nombre de défauts par tranches qui reste un

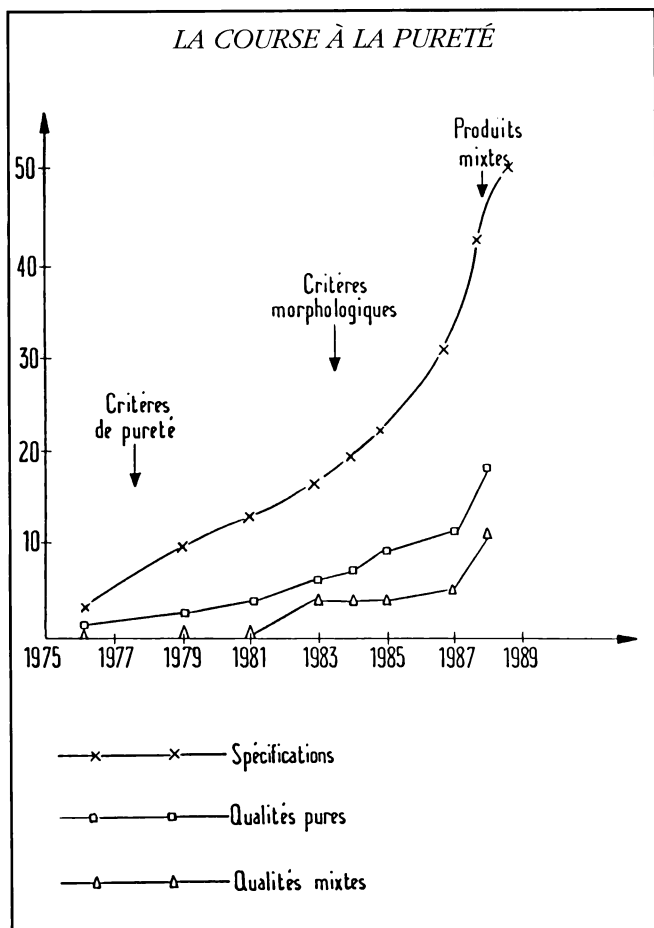


Fig. 4

point faible de ces nouveaux produits et, d'autre part, d'explorer des structures hétérogènes combinant plusieurs matériaux afin de profiter de leurs avantages respectifs. Des résultats encourageants ont déjà été obtenus. Nous en citerons quelques uns :

- la société française Picogiga, leader mondial sur le marché libre pour les tranches d'arseniure de gallium fabriquées par épitaxie moléculaire est passée de 3 000 défauts par cm^2 en 1986 à 3 défauts par cm^2 en 1989 ;

- IBM a annoncé en 1989 la réalisation de circuits intégrés dont le motif de base ne mesurait plus que 0,25 micron vs. 1 micron dans les circuits intégrés les plus denses aujourd'hui commercialisés ;

- en Angleterre, l'université de Warwick travaille sur des hétérostructures germanium-silicium qui seraient cent fois plus rapides que les structures conventionnelles au silicium, et qui seraient utilisables comme composants optiques ou optoélectroniques ;

- Thomson, enfin, effectue des recherches sur des structures mixte silicium-AsGa qui présenteraient un bon compromis coût-rapidité ; toutefois, la différence des distances dans les réseaux des deux composants d'une telle structure se traduit par l'apparition de dislocations qu'il faut ensuite réduire par des traitements de recristallisation appropriés.

Les aimants permanents sont généralement classés dans les matériaux pour électronique bien que leurs ap-

plications s'étendent au-delà des limites de cette industrie. Ils constituent un second domaine important avec un marché compris entre 20 et 25 milliards de francs. Les ferrites constituent toujours le segment le plus important de ce marché, mais de nouveaux matériaux sont apparus au cours des dernières décennies, donnant naissance à ce que l'on appelle traditionnellement les « superaimants ». Ces produits, samarium-cobalt, apparus vers la fin des années 60, néodyme-fer-bore se développant depuis 1983, ont permis de multiplier par 10 l'énergie magnétique emmagasinée par unité de masse. On est ainsi passé de 4,5 MGOe (mégagaussostered) pour les ferrites à 40 pour les aimants néodyme-fer-bore. Cette augmentation permet soit une miniaturisation encore plus grande dans l'industrie électronique (tête de lecture, casque d'écoute), soit une diminution de taille sensible - ou une augmentation de puissance par unité de volume - dans l'industrie électrique. Le magnétisme sera au cours des prochaines années l'un des marchés porteurs les plus importants pour les terres rares.

Les céramiques pour capteurs et les céramiques pour condensateurs forment un troisième segment lourd des matériaux pour électronique ; elles représentent ensemble un marché évalué à 20 milliards de francs. Les céramiques pour capteurs se sont développées en raison de leur fiabilité dans des conditions sévères de température ou de corrosion. Par ailleurs, il est possible de faire varier leurs propriétés électriques, mécaniques ou optiques en jouant sur leur composition chimique ou sur leur microstructure. Elles sont utilisées dans les domaines suivants :

- capteurs de température (thermistances à coefficient positif ou négatif) ;
- capteurs d'humidité (conduction ionique ou électronique) ;
- capteurs d'analyse des gaz (conduction ionique ou électronique) ;
- capteurs ioniques (conduction ionique, électrodes sélectives) ;
- capteurs de positionnement (céramiques piézo-électriques) ;
- capteurs de rayonnement lumineux (céramiques pyroélectriques, céramiques thermofluorescentes).

Oxyde de zirconium, oxyde de titane, oxyde d'yttrium, PZT (oxydes de plomb, zirconium et titane) et quantité d'oxydes métalliques divers interviennent dans la composition de ces matériaux selon la fonction recherchée.

Dans les condensateurs, la recherche de performances de plus en plus élevées (condensateurs multicouches aussi compacts que possible) offre un champ d'application au titanate de baryum obtenu par voie chimique en substitution du produit préparé par chamottage de poudres d'oxyde de titane et de carbonate de baryum. La voie chimique donne accès à une reproductibilité microstructurale et à une meilleure maîtrise du rapport stoechiométrique entre les constituants que ne permet pas d'atteindre la voie par simple mélange et cuisson.

Représentant un marché plus restreint (de l'ordre du milliard de francs), les luminophores font appel à des matières premières chimiques de haute pureté. Ils consti-

tuent le second segment porteur de l'industrie des terres rares et utilisent toute une série d'entre elles : yttrium, europium, gadolinium, terbium, lanthane, cerium, thulium. Ils sont utilisés pour la télévision, pour les lampes trichromatiques qui améliorent l'éclairage de nos intérieurs, pour les écrans renforçateurs de rayons X. Aux exigences initiales de grande pureté (produits 4 N à 6 N) sont venues aujourd'hui s'ajouter des spécifications très précises relatives à la morphologie des poudres d'oxydes qui servent de base à ces applications. De plus en plus, les industries aval se retournent vers le chimiste pour lui demander de préparer des oxydes mixtes à la composition bien définie avec une granulométrie aussi resserrée que possible. En quelques années, le nombre de spécifications d'une catégorie de produits est passé de 3 à près de 50 en même temps que se multipliait le nombre des qualités vendues (cf. figure 4).

Les pigments magnétiques constituent un segment de marché également de l'ordre du milliard de francs. Les nouveaux matériaux utilisés dans ce domaine visent à combiner une haute coercivité et une définition aussi précise que possible du domaine magnétique unitaire. Ces propriétés sont obtenues par la physico-chimie en agissant sur la nature des constituants, leur dopage éventuel, leur forme cristalline et sur les techniques d'enduction qui conduisent aux bandes magnétiques audio et vidéo et aux disquettes de nos ordinateurs.

Dans toutes les applications ci-dessus évoquées, la première exigence concerne en général la pureté, et il n'est plus rare que certaines spécifications portent sur des ppb (partie par billion) de telle ou telle impureté. Mais l'état physico-chimique du matériau ne se définit pas que par sa pureté. Physiciens et chimistes ont donc dû développer des procédés d'élaboration permettant d'agir de façon contrôlée sur la morphologie, la texture et la structure des produits qu'ils préparaient. L'obtention de très fines particules, l'épitaxie, le dépôt chimique par vaporisation (CVD) sont parmi d'autres des technologies aujourd'hui couramment utilisées dans l'industrie des matériaux pour électronique. La compétition qui se déroule entre les systèmes d'information d'une part, entre leurs supports d'autres part, constitue pour ces applications de la chimie la plus sûre garantie qu'il y a place pour la recherche et pour l'innovation dans les nouveaux matériaux devant servir à ces usages.

Les céramiques techniques structurales

Si les céramiques pour électronique représentent aujourd'hui le plus gros marché parmi les céramiques techniques (70 % en Europe, 80 % au Japon), les céramiques structurales en constituent néanmoins un créneau d'avenir, susceptible de connaître une croissance sensible.

Le développement des recherches sur ces nouveaux matériaux s'est accéléré il y a une quinzaine d'années. Le premier choc pétrolier a conduit à la mise en place par les pays industrialisés de programmes importants visant à économiser l'énergie. Les céramiques semblaient pouvoir apporter une contribution notable à ces économies, en particulier dans le domaine de l'automobile. La céramisation

des moteurs présentait les avantages théoriques suivants :

- une augmentation sensible du rendement des moteurs par élévation de leur température de fonctionnement ;
- un régime thermique se rapprochant de l'adiabaticité et conduisant à l'élimination du système de refroidissement ;
- un gain de poids d'au moins 30 % en raison de la simplification du bloc moteur et de la densité moindre des céramiques par rapport aux alliages métalliques.

Les céramiques apportaient en outre l'avantage de faire appel à des matières premières communes et de diminuer les besoins en métaux souvent dits stratégiques, cobalt, nickel, chrome, qui constituent la base des alliages métalliques réfractaires. Le levier constitué par le potentiel du marché de l'automobile et l'enjeu économique d'une baisse de la consommation spécifique des automobiles (évaluée par les experts japonais à 10 % de la facture pétrolière de leur pays) expliquent la floraison des programmes de recherche au cours de ces dernières années, tout particulièrement au Japon et, à un moindre degré, en Europe et aux États-Unis.

Les ambitions sont aujourd'hui devenues plus modestes et la perspective du moteur « tout céramique » que certains avaient prédit pour le début des années 90 se déplace vers des horizons plus lointains. La réalisation technique se heurte en effet au principal défaut des céramiques : l'intensité des liaisons covalentes qui unissent leurs atomes constitutifs est à l'origine de leurs caractéristiques d'inertie chimique, de résistance à la température et de dureté, mais elle se traduit *a contrario* par une grande fragilité liée à leur manque de ductilité et à leur faible ténacité.

Les recherches restent néanmoins actives, et de plus en plus de pièces céramiques font leur apparition dans les moteurs commercialisés : turbines de turbochargeurs, pipes d'échappement, chambre de combustion des moteurs Diesel, patins de culbuteurs, etc. La plupart des grands constructeurs automobiles et des grands chimistes sont engagés dans ces recherches, soit dans leurs propres programmes de R & D, soit dans le cadre de programmes nationaux (programmes du MITI au Japon) ou internationaux (programmes Eurêka).

La chimie constitue le passage obligé pour la mise au point des nouveaux matériaux céramiques à usage structural. Il s'agit en effet de préparer des poudres minérales susceptibles, par frittage, de conduire à des objets massifs, aux formes parfois complexes et présentant des propriétés mécaniques aussi proches que possible de celles des métaux ; ces objets doivent en plus être caractérisés par une résistance thermique, une résistance à l'usure et une inertie chimique, propriétés typiques des matériaux céramiques.

Le travail du chimiste porte tout d'abord sur l'élaboration de la poudre de base dont les caractéristiques de pureté, de granulométrie et d'état de surface doivent être soigneusement contrôlées. Il porte ensuite sur l'opération de frittage car les conditions dans lesquelles elle s'effectue sont déterminantes pour la qualité du matériau final : pression de frittage, atmosphère gazeuse, présence

d'additifs. L'étude physico-chimique des poudres, leur transformation en cours de frittage et l'analyse des matériaux frittés constituent les domaines les plus importants de la recherche sur les céramiques. Elle s'inspire largement de technologies bien connues des métallurgistes : analyse dilatométrique, micrographie et étude des structures de fissuration et de fracturation, analyse des joints de grains et des transformations cristallines, contrôles thermomécaniques.

Le développement des céramiques dans l'industrie automobile (et dans l'industrie astronautique dans une étape ultérieure) pour des pièces de structure exige aussi la mise au point de méthodes de contrôle non destructif qui garantissent la fiabilité des pièces fabriquées en série. Cette garantie est d'autant plus nécessaire que la nature même de ces matériaux et leur faible ténacité conduisent à une plus large dispersion des propriétés thermomécaniques que celles observées avec les métaux et alliages.

Le prix des matériaux céramiques demeure par ailleurs un obstacle à une pénétration massive de l'industrie automobile. Il s'agit tant du coût des poudres intermédiaires que de celui de leur transformation en pièces prêtes à l'emploi. Les technologies de frittage qui aujourd'hui donnent les meilleurs résultats en densité relative et en propriétés mécaniques (frittage sous pression, pressage isostatique à chaud souvent désigné par le sigle HIP) sont des procédés coûteux et peu adaptés à la production de grande série. Tout progrès technologique permettant d'aller vers des conditions de frittage moins sévères favorisera donc le développement de ces nouveaux matériaux.

Trois produits paraissent aujourd'hui les plus prometteurs dans le domaine des céramiques structurales : la zircone stabilisée, le carbure de silicium, le nitrure de silicium. Nous les passerons rapidement en revue car ils permettent de bien mettre en évidence le rôle fondamental du chimiste dans l'élaboration de ces nouveaux produits.

Préparée par voie humide à partir de sels ou d'alcoxydes de zirconium, la zircone pure présente une transformation allotropique qui, vers 1170° C, la fait passer du système monoclinique au système tétragonal. La variation de densité qui accompagne cette transformation fragilise la zircone et en interdit donc tout usage en l'état dans le domaine des céramiques pour hautes températures. L'addition à la zircone d'oxydes divers (CaO, MgO, Y₂O₃) permet de corriger ce phénomène par modification des phases cristallines en présence. La possibilité de précipiter à haute température et au sein du solide des nodules tétragonaux qui, au refroidissement, deviennent monocliniques, conduit même par la dilatation qui accompagne ce passage à une compression des microfractures et à un renforcement général du matériau obtenu. Ce phénomène ne se produit que pour des teneurs bien définies en oxyde étranger (d'où la notion de stabilisation partielle) et pour des oxydes présentant vis-à-vis de la zircone des caractéristiques adéquates de rayon ionique. Parmi les stabilisants utilisés, l'oxyde d'yttrium est le plus intéressant car sa présence conduit en outre à une diminution importante de la température de transformation allotropique (600° C au lieu de 1170° C).

Les zircons partiellement stabilisées (PSZ) permettent de fabriquer des pièces céramiques dotées de très bonnes performances mécaniques, mais elles restent coûteuses et leur marché est encore limité à quelques centaines de tonnes par an. Elles ont en particulier trouvé des applications dans les outils de coupe, les guide-fils des machines textiles, les prothèses médicales. Leur coefficient de dilatation thermique, proche de celui des métaux, et leur faible conductivité thermique en faisaient des candidats privilégiés pour la construction de moteurs adiabatiques. Il semble toutefois que leur manque de ductilité et de ténacité ait modéré cet enthousiasme initial et que l'industrie japonaise se tourne plutôt pour ce type d'application vers les carbures et nitrures, voire vers les composites.

Le carbure de silicium existe sous deux formes cristallines α et β , toutes deux susceptibles d'être frittées pour donner naissance à des pièces céramiques. La méthode de préparation la plus courante est la réduction de la silice par le carbone au four électrique (procédé Acheson), mais elle conduit à un produit impur, fabriqué en gros tonnage pour l'industrie des réfractaires et pour celle des abrasifs. Les poudres devant servir à la fabrication des céramiques hautes performances sont obtenues par reprise du produit sortant du four Acheson, séparation du cœur des lingots obtenus (plus pur que la périphérie) et broyage fin. Le frittage s'opère ensuite en présence d'additifs dont le bore. Seule, la forme α peut être obtenue par cette voie.

La recherche de poudre très fine et de granulométrie bien définie a conduit au développement d'autres procédés qui, en général, conduisent à la forme β :

- carbonisation directe de silicium très pur ;
- réduction d'une silice pulvérulente par du carbone en poudre en four vertical ;
- décomposition thermique de carbosilanes ou de carbochlorosilanes.

Ces procédés permettent d'obtenir directement des poudres de granulométrie moyenne égale ou inférieure à 0,5 μ et ayant une surface spécifique relativement élevée (15 m²/g). Par frittage elles conduisent à des pièces de porosité résiduelle très faible.

Des méthodes de dépôt chimique en phase vapeur (CVD) et de décomposition thermique de carbosilanes dans un plasma sont également en développement.

Le carbure de silicium a de nombreuses applications dans les bagues d'étanchéité et dans les garnitures de machines tournantes, dans les échangeurs thermiques, dans certaines pièces pour équipements chimiques (becs de brûleurs, buses d'injection à haute température, filtres électrostatiques pour gaz très chauds) ; il entre également dans la fabrication de certains accessoires de sport.

Par pyrogénéation de polycarbosilane, Nippon Carbon a développé la seule fibre céramique aujourd'hui commercialisée, le Nikalon, qui possède de bonnes propriétés thermomécaniques jusque vers 1200° C, et qui intéresse les industries spatiales.

Le nitrure de silicium Si₃N₄ est sans doute le produit le plus prometteur pour les applications des céramiques

dans l'industrie des moteurs (automobiles, turbines). Il combine en effet une bonne tenue mécanique à haute température, un faible coefficient de dilatation thermique, une grande dureté et une très bonne résistance au choc. Son coefficient de conductibilité thermique est par ailleurs très inférieur à celui du carbure de silicium. Le nitrure de silicium existe sous deux formes cristallines, α et β , l'une stable en dessous de 1400° C, l'autre au-dessus. C'est la phase α qui est la plus utilisée dans l'industrie des céramiques (phase stable en dessous de 1400° C).

Il peut être préparé par nitruration directe du silicium suivie d'un broyage et, généralement, d'un lessivage acide pour éliminer les impuretés métalliques.

La réduction de la silice par le carbone en présence d'azote constitue une autre voie de préparation, mais les produits les plus purs sont obtenus par pyrolyse de chlorosilanes (Si Cl₄ par exemple) en présence d'agents nitrurants (ammoniac) ; ce procédé en phase gazeuse conduit à des poudres très fines et de grande pureté. Les chlorosilanes peuvent aussi être transformés en amides par ammonolyse en phase liquide ; le silicium diamide obtenu est ensuite calciné pour obtenir la poudre de nitrure.

Le marché du nitrure de silicium est encore limité à quelques dizaines de tonnes par an en raison de son prix élevé et des difficultés rencontrées pour le fritter. L'addition d'oxyde d'yttrium et d'alumine permet d'augmenter son aptitude au frittage tout en améliorant la tenue mécanique des joints de grains. Cet exemple met de nouveau en évidence l'importance de la chimie aux joints de grains pour le développement des céramiques hautes performances.

Le nitrure de silicium a d'ores et déjà trouvé des applications commerciales dans l'automobile : préchambres de combustion dans les moteurs Diesel de Isuzu, Toyota et Mazda/Ford, rotor de turbocompresseur chez Nissan, patins de culbuteurs chez Mitsubishi.

Une étude récente de SRI International indique que les trois produits ci-dessus devraient voir leur marché multiplié par 10 à 15 entre les années 1985 et 1995 :

T/an	1985	1995
SiC	400	3 600
Si ₃ N ₄	60	3 565
Zr O ₂ stab.	225	2 500

(SRI International, 1989)

De nombreux autres produits sont en développement et viendront enrichir, au cours des prochaines années, la liste des poudres commerciales pour les céramiques à hautes performances. Nous en citerons rapidement quelques uns :

- Les carbures de bore (B₄C) et titane (TiC) sont intéressants pour leur très grande dureté ; ils trouvent donc leurs premières applications dans les pièces d'usure et dans l'outillage.

- Le nitrure de bore (BN) qui existe sous deux formes allotropiques, cubique et hexagonale, présente des propriétés de conductibilité électrique et de stabilité à haute

température qui lui ouvrent des applications dans l'industrie électronique et dans l'industrie chimique. Sa perméabilité aux micro-ondes le fait utiliser dans des applications spéciales. La consommation mondiale est aujourd'hui limitée à quelques tonnes.

Le nitrure d'aluminium (AlN) est un matériau synthétique de structure hexagonale préparé par nitruration d'une alumine très pure. Utilisé comme additif de frittage dans diverses céramiques, il trouve aujourd'hui des applications propres grâce à ses propriétés spécifiques de résistance au choc thermique, de bonne conductibilité thermique et de faible conductibilité électrique : creusets, substrats pour les circuits intégrés utilisent le nitrure d'aluminium qui est un bon candidat pour le remplacement de l'oxyde de beryllium, menacé en raison de sa toxicité. La consommation mondiale de nitrure d'aluminium reste aujourd'hui limitée à quelques tonnes par an.

Le diborure de titane (TiB₂), fabriqué par réduction de l'oxyde de titane par le carbure de bore, se caractérise par sa très grande dureté, sa densité relativement faible et sa conductibilité électrique limitée ; il pourrait trouver des applications dans les outils de coupe, les électrodes réfractaires, les paliers de machines tournantes.

Le « sialon », nitrure de silicium, partiellement substitué par de l'aluminium et de l'oxygène, est un concurrent potentiel du nitrure de silicium car il apporte une plus grande facilité de mise en forme. Ses applications sont encore limitées. On le trouve en particulier dans certains outils de coupe et d'usinage fonctionnant à grande vitesse et dans les paliers de machines tournantes, mais il intéresse aussi les fabricants de pièces céramiques pour moteurs et turbines (meilleure inertie chimique que le nitrure de silicium pur).

Pour terminer sur ces céramiques du futur, il faut mentionner la fibre céramique de carbonitrure de silicium développée par Rhône-Poulenc à partir de polysilazanes ; ses propriétés de résistance thermomécanique sont supérieures à celles du Nikalon et devraient permettre une utilisation au-delà de 1200° C.

Tous ces produits qui rentrent dans la catégorie des céramiques à hautes performances – et nous ne prétendons pas avoir été exhaustifs – montrent comment la richesse de la chimie contribue à l'essor de cette nouvelle industrie. Ils ne représentent encore sur le marché que des volumes faibles mais sont susceptibles de développements importants si certains obstacles technologiques sont vaincus. Il s'agit parfois de composés connus depuis longtemps comme le carbure de silicium, mais les progrès en analyse et en génie des procédés ont permis d'élaborer des qualités nouvelles et d'engendrer des propriétés améliorées, voire originales.

Nous n'avons pas parlé des céramiques utilisées dans les pots catalytiques de postcombustion automobile. Les conditions de fonctionnement de ces équipements exigent, des céramiques qui en constituent l'ossature (cordiérite ou mullite), de hautes performances thermomécaniques et des caractéristiques de morphologie et de surface spécifiques adaptées à leur fonction de support de catalyseurs. Ces supports peuvent donc être également classés parmi les matériaux nouveaux ; il font encore l'objet de nom-



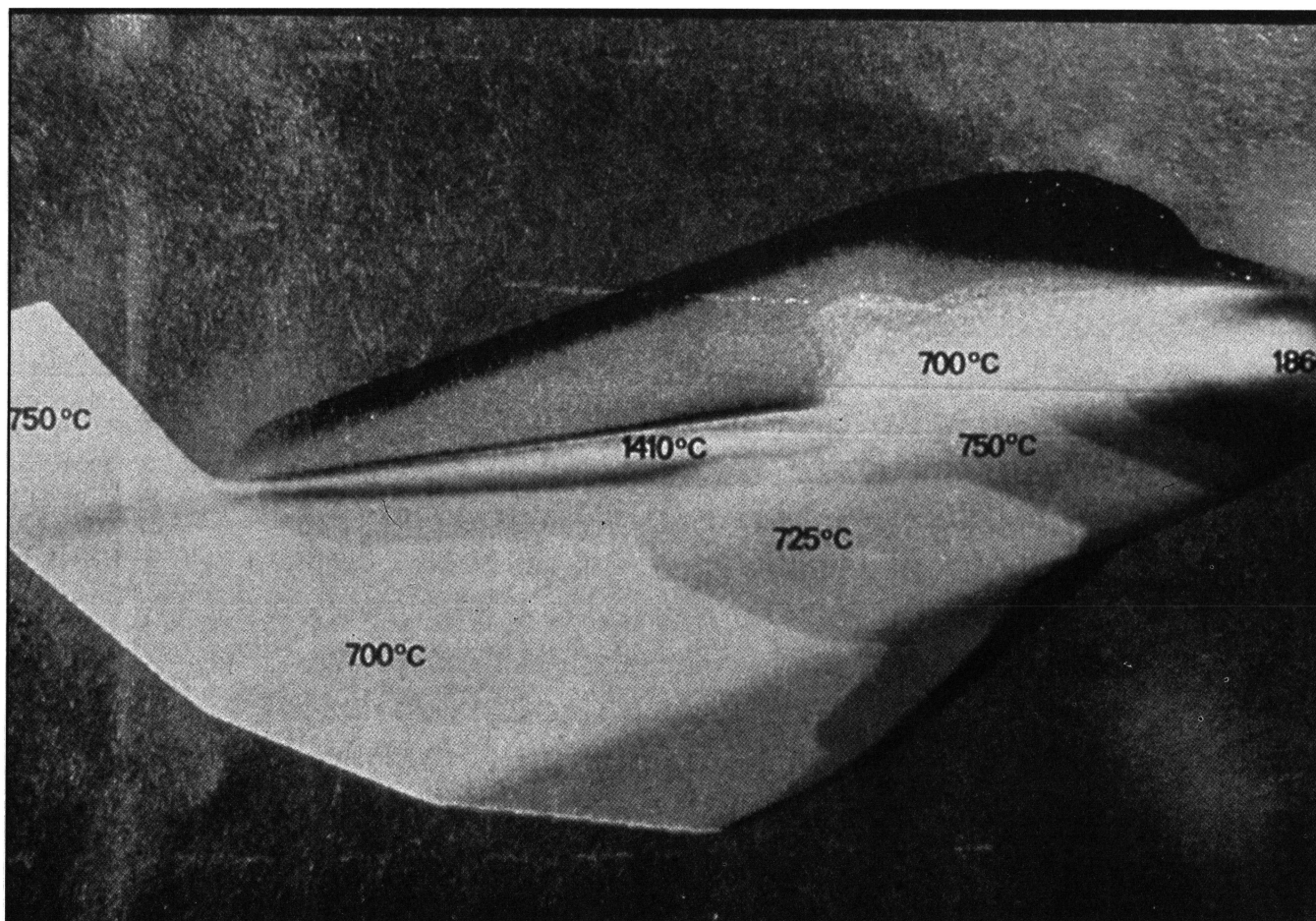
breuses recherches, soit pour en améliorer les propriétés, soit pour trouver des substituts plus performants aux produits actuellement utilisés.

UN NOUVEAU DÉFI : LES SUPRACONDUCTEURS À HAUTE TEMPÉRATURE

La supraconductivité a été découverte au début de ce siècle par le chercheur hollandais H. Kamerlingh Onnes. En refroidissant un filament de mercure solide à la température de l'hélium liquide, il avait constaté que ce corps perdait toute résistivité. La propriété fut ensuite observée pour le plomb et l'étain. Il a fallu attendre 1961 pour mettre en évidence cette propriété dans des alliages niobium-étain puis niobium-titane dont la température critique (c'est-à-dire celle en dessous de laquelle apparaît la supraconductivité) était de l'ordre de 18°K ; ces alliages pouvaient par ailleurs supporter des densités de courant allant jusqu'à $100\,000\text{ A/cm}^2$ sans perdre cette propriété supraconductive et des champs magnétiques de l'ordre de 20 teslas. Ces différentes caractéristiques devenaient intéressantes pour les applications industrielles avec toutefois deux contraintes majeures : la nécessité de travailler à la température de l'hélium liquide ; le risque de disparition de la supraconductivité conduisant au retour à l'état résistif et à un fort dégagement thermique par effet Joule.

Ces deux contraintes ont fait qu'il a fallu attendre une vingtaine d'années pour que l'industrie des supraconducteurs émerge réellement avec principalement le développement des alliages niobium-titane. Les principales applications sont les bobines électromagnétiques des accélérateurs de particules et des tokomaks (fusion nucléaire contrôlée), les appareillages de résonance magnétique nucléaire et l'imagerie médicale qui fait appel à eux. Ce marché représente aujourd'hui environ 300 millions de dollars. Des recherches ont été effectuées et des prototypes ont été construits pour appliquer la supraconductivité aux alternateurs en vue de réduire les pertes thermiques et d'augmenter leur rendement. Westinghouse aurait en chantier un cryoalternateur de 270 Mwatts mais le développement dans les applications électrotechniques se heurte aux contraintes technologiques d'une part, aux contraintes économiques d'autre part (l'hélium liquide coûte 11 \$ par litre).

En 1986, Bednorz et Müller, deux chercheurs suisses du centre IBM de Zürich, annoncèrent la découverte et la mise au point d'un oxyde ternaire de baryum, lanthane et cuivre de structure type perovskite, et qui présentait des caractéristiques supraconductrices jusque vers 30°K et devenait diamagnétique en dessous de cette température (effet Meissner). Le chemin vers la supraconductivité haute température s'entrouvrait, et, en quelques mois, les découvertes se succédèrent jusqu'à l'annonce par des chercheurs de l'université de Houston, C.N. Chu et son équipe, d'un oxyde ternaire d'yttrium, de baryum et de cuivre dont la



température critique atteignait 93°K soit 16° au-dessus de la température de l'azote liquide. Un pas important était franchi avec la perspective de pouvoir utiliser un milieu azote liquide (22 cents/litre) au lieu de l'hélium cinquante fois plus cher. Cette importante étape valut le prix Nobel aux deux chercheurs suisses et déclencha un effort de recherche sans précédent, financé tant par les gouvernements que par les entreprises privées, pour explorer ce nouveau champ ouvert à la recherche et à ses applications.

Il fallait tout d'abord essayer de comprendre le phénomène. Plusieurs théories sont aujourd'hui en compétition mais aucune n'explique la totalité des phénomènes observés. Toutes néanmoins mettent l'accent sur les caractéristiques des réseaux cristallins des différents oxydes mentionnés ci-dessus (une couche d'oxyde de cuivre prise en sandwich entre l'oxyde de lanthane ou d'yttrium et l'oxyde de baryum), sur l'existence simultanée de cuivre bivalent et de cuivre trivalent dans ces structures, sur la présence de lacunes d'oxygène. Il s'agit donc bien de compositions chimiques très particulières que le chimiste sait élaborer par des procédés de coprécipitation, de séchage flash ou de dépôt en phase vapeur. Les physiciens sont impatients de voir fabriquer des monocristaux de taille suffisante afin de percer les mystères de ces structures cristallines nouvelles et d'en tirer des explications du phénomène observé.

Les progrès effectués en quelques années pour passer d'une température critique de 4°K à 93°K laissent planer l'espoir que l'on ira vers des températures beaucoup plus élevées¹. Parallèlement, il faut que ces struc-

tures conservent leurs propriétés en présence de densités de courant élevées (10^6 à 10^7 A/cm²) et de champs magnétiques puissants (20 à 30 teslas). Certains pensent que les phases de Chevrel, découvertes à l'université de Rennes par MM. Chevrel et Sergent, permettront d'atteindre ces caractéristiques, voire iront au-delà ($H_c > 50$ teslas ?)

Au-delà de l'obtention de phases stables et reproductibles, les supraconducteurs haute température devront encore franchir de nombreux obstacles avant de devenir de vrais matériaux industriels. Leur mise en forme et leur frittage sous forme de matériaux céramiques à usage de fils ou de conducteurs massifs posent encore des problèmes difficiles et, comme pour les céramiques techniques, il faudra vaincre leur fragilité.

Les utilisations potentielles restent nombreuses :

- les cryoalternateurs qui permettraient de réduire de 50 % les pertes de ces machines ;
- le transport de courant pour lequel la rentabilité reste aujourd'hui incertaine ;
- le transport à grande vitesse utilisant le phénomène de lévitation magnétique engendré par les supraconducteurs (effet Meissner mentionné ci-dessus) ;
- le stockage d'énergie ;

Les procédés textiles permettent d'obtenir des fils de polymères (ci-contre, du Nylon) qui entrent dans la fabrication de nombreux produits finis tels les pneumatiques. Grâce aux matériaux céramiques les propriétés mécaniques sont conservées à des températures élevées, supérieures à $1\ 000^{\circ}$ (la navette Hermès).

- la séparation magnétique industrielle ;
- les SQUID (*superconductive quantum interference device*), susceptibles de détecter des champs magnétiques de 10^9 gauss (champ terrestre : 0,4 gauss) et très utiles pour la détection à usage militaire et pour l'imagerie médicale.

Dans une étude récente, Strategic Analysis Inc. évaluait le marché potentiel des supraconducteurs à 1800 millions de dollars en 2005. Une prédiction à faire rêver les promoteurs de matériaux nouveaux. Les progrès restent suspendus aux réponses qu'il faudra apporter aux questions suivantes :

- Saura-t-on élaborer, stabiliser et mettre en forme ces nouvelles structures en respectant le compromis température critique/champ magnétique critique/densité de courant critique indispensable pour que les supraconducteurs deviennent industriels ?

- Saura-t-on expliquer les phénomènes observés et, à partir de ces explications, construire de nouvelles structures susceptible de travailler à température encore plus élevée ?

- Saura-t-on maîtriser les technologies assurant la sécurité des équipements en cas de disparition de la propriété de supraconductivité ?

Chimistes, physiciens, électriciens et électroniciens travaillent ensemble pour trouver les réponses adéquates. Nul doute que le chemin sera encore long.

De nouveaux matériaux organiques : utopie ou voie d'avenir ?

La découverte, dans les années 70, de cristaux moléculaires organiques complexes présentant une forte conductivité métallique marque le point de départ de toute une série de recherches sur les propriétés électriques et magnétiques de certaines molécules organiques.

Le domaine d'application privilégié de ces nouveaux produits est celui de l'optique non linéaire. Les chercheurs mettent au point dans leurs laboratoires des molécules qui constituent de véritables diodes en présence d'un rayonnement électromagnétique de type optique.

Pour obtenir ces caractéristiques, on a tenté de recopier sur des architectures organiques les spécificités des semi-conducteurs minéraux. Les squelettes moléculaires ainsi conçus présentent en général un groupement donneur d'électrons et un groupement accepteur d'électrons reliés entre eux par une chaîne conjuguée qui assure le transfert électronique. Les diméthylanilines sont un bon exemple de ce type de molécules. Il est également possible de réaliser des molécules présentant une variation importante de leur moment dipolaire à l'état excité mais ne possédant pas de chaîne conjuguée intermédiaire. Les sucres et certains acides appartiennent à cette catégorie ; leurs propriétés en optique non linéaire sont en général nettement moins favorables que celles des molécules à chaîne conjuguée.

L'un des inconvénients des molécules organiques ci-dessus citées est leur cristallisation naturelle dans un arrangement centro-symétrique, c'est-à-dire un arrangement

où groupements donneurs et groupements accepteurs se neutralisent les uns les autres faisant ainsi disparaître la propriété de non-linéarité. Les chimistes cherchent donc à jouer sur l'architecture de ces molécules pour bloquer cette tendance. Pour cela, ils procèdent à des modifications de la molécule par greffage de fonctions, par insertion d'un carbone asymétrique, etc.

Au-delà de la fabrication des cristaux organiques solides dont les difficultés viennent d'être mentionnées, d'autres recherches visent à former soit des couches très minces, de type Langmuir - Blodgett, utilisant les propriétés amphiphiles de molécules sur lesquelles auront été greffées des groupement lipophiles ou hydrophiles selon les cas, soit des films polymères où les molécules organiques actives sont dissoutes dans une matrice polymère amorphe, orientées au sein de cette matrice par action d'un champ électrique et maintenues dans cet état par refroidissement sous champ. L'utilisation de polymères cristaux liquides « porteurs » de molécules actives constitue une autre voie pour obtenir l'orientation.

Le développement de l'optique non linéaire est en particulier lié à celui de l'optronique qui, par rapport à l'électronique, présente plusieurs avantages : des fréquences de bandes porteuses très élevées (10^{15} Hz) ; des possibilités de commutation très rapide ; l'insensibilité au parasitage.

Les diodes moléculaires organiques semblent capable de fournir des temps de réponse de l'ordre de 10^{-15} seconde alors que les semi-conducteurs classiques restent limités à un domaine compris entre la nano (10^{-9}) et la picoseconde (10^{-12}). Ces molécules organiques pourraient donc trouver des applications dans les ordinateurs optiques dont on attend des performances très supérieures à celles des ordinateurs électroniques.

Le CNET en France (Centre national d'étude des télécommunications) travaille dans ce domaine et utilise des molécules complexes dont les noms abrégés, POM, MAP, NPP, NPAN, deviennent plus familiers que les appellations organiques conventionnelles. Le développement de ces nouveaux matériaux reste toutefois suspendu à la résolution de nombreux problèmes, en particulier en matière de préparation, de stabilité et de conservation. La toxicologie de ces molécules organiques complexes devra également être regardée de très près avant qu'elles ne puissent faire l'objet d'applications commerciales réelles.

Nous sommes donc là de nouveau dans l'antichambre du futur, mais certaines propriétés observées (le NPP est apparu cent fois supérieur en efficacité non linéaire au niobate de lithium) sont de nature à stimuler la persévérance des chercheurs, des industriels et des gouvernements qui participent largement au financement de ces programmes.

L'univers infini des matériaux composites

Il est impossible de parler des nouveaux matériaux sans évoquer les matériaux composites qui en constituent aujourd'hui un segment essentiel, sont appelés à se développer de plus en plus, et mériteraient à eux seuls un long article.

Le principe des matériaux composites repose sur la recherche de synergies ou de conjugaisons entre les propriétés de différents matériaux simples en vue d'obtenir des propriétés améliorées ou nouvelles. Le béton armé, les résines renforcées aux fibres de verre constituent des matériaux composites traditionnels dont les caractéristiques sont bien connues.

La recherche de composites à hautes performances constitue aujourd'hui l'un des domaines les plus actifs de l'univers des nouveaux matériaux. Elle mobilise dans un effort commun les chimistes, les transformateurs et les fabricants de systèmes. Ses horizons semblent s'étendre à l'infini tant sont nombreux les constituants auxquels il peut être fait appel :

Fibres	verre aramides carbone céramiques métaux
Matrices	thermoplastiques thermodurcissables vitreuses métalliques
Poudres	céramiques métaux

Le marché mondial des composites hautes performances a représenté en 1989 plus de 15 000 t/an pour les seuls composites à matrice organique, selon une étude récente du Bipe. Les principaux segments utilisateurs sont : l'industrie aéronautique civile et militaire ; l'industrie spatiale ; les sports et loisirs et l'industrie du transport terrestre.

Les composites à matrice céramique restent encore réservés aux domaines aérospace et militaire, car leur coût élevé actuel leur ferme les portes de l'industrie automobile. En France, la SEP d'une part, Céramiques et Composites (filiale de Rhône-Poulenc) d'autre part, sont des acteurs mondiaux reconnus dans ce domaine.

Les matériaux composites constituent pour les chimistes un champ d'exploration très riche. Les caractéristiques physico-chimiques des matériaux élémentaires, la structure et la composition des interfaces qui se forment entre la matrice et le matériau de renforcement sont autant de paramètres avec lesquels il est possible de jouer pour modifier les propriétés du matériau final.

La maîtrise technique des procédés de mise en forme et la diminution des coûts de fabrication restent des objectifs majeurs dans le développement de ces produits. Une meilleure compréhension du processus d'élaboration et du comportement dans les pièces finies et en cours d'utilisation demande également un apport de recherche soutenu où chimistes, physiciens et mécaniciens doivent unir leurs compétences respectives.

Parvenu au terme de ce bref voyage à travers le monde des matériaux nouveaux, on ne peut que se sentir frustré. Frustration de celui qui a tenté de s'en faire le guide pour quelques instants quand il mesure l'étendue de tout ce qu'il

n'a pas dit et qu'il aurait fallu dire ; frustration du lecteur qui ne manquera pas d'identifier les innombrables lacunes et restera donc sur sa faim. Peut-être est-ce là la caractéristique d'un domaine en pleine évolution ?

Appuyés initialement sur la demande de la construction aérospace et des matériels de défense d'une part, sur le développement de l'électronique d'autre part, les matériaux nouveaux voient se multiplier leurs applications dans des domaines de plus en plus nombreux. Qu'il s'agisse de la vaisselle domestique pour four à micro-ondes, des médicaments dites « intelligentes » qui permettent de délivrer les principes actifs à l'endroit précis du corps humain où ils doivent agir, et ceci avec la dose prescrite et répétée dans le temps, des moyens de transport dont il faut augmenter la vitesse, la sécurité et la frugalité énergétique (automobile, TGV, avion supersonique), des fibres optiques destinées à accroître la puissance des réseaux de télécommunications et à en augmenter la fiabilité, des ordinateurs neuronaux qui cherchent à mimer le fonctionnement du cerveau humain, des appareillages de l'industrie chimique construits pour résister à la corrosion ou à l'érosion, il n'est guère de secteur industriel qui ne s'intéresse à ces nouveaux produits. Il s'agit encore plus souvent de petites « niches » de développement que de marchés de gros tonnages, mais les matériaux nouveaux portent en germe des processus qui ne peuvent laisser indifférente notre civilisation de fin du XX^e siècle :

- économie d'énergie ;
- accroissement de la sécurité ;
- réduction des nuisances ;
- développement des communications ;
- plus grande sélectivité des formulations phytosanitaires

et pharmaceutiques permettant d'en diminuer les dosages et les effets secondaires.

C'est toutefois un domaine d'investissement à long terme et à haut risque. Le développement des nouveaux matériaux exige de la part des industriels et des pouvoirs publics qui le soutiennent persévérance dans l'effort et patience vis-à-vis de l'obtention de résultats commerciaux.

C'est aussi pour l'industrie chimique l'occasion d'une nouvelle démarche : recherche et développement doivent être conduits en étroite relation avec les futurs utilisateurs. Une sorte de partenariat doit s'établir, réunissant le fabricant de précurseurs – le chimiste –, le transformateur qui fera de ces précurseurs des matériaux semis-finis ou finis, et le fabricant de systèmes qui les insérera sous forme de pièces dans un objet complexe auquel ils apporteront leurs propriétés d'usage spécifiques.

C'est enfin pour les fabricants de systèmes (industrie automobile, aérospace, électronique, etc.) une opportunité mais aussi une nécessité de concevoir de nouveaux objets en fonction des possibilités offertes par ces nouveaux matériaux. La croissance de leur marché suppose en effet que les utilisateurs adoptent cette démarche innovante et ne se limitent pas à chercher une simple substitution aux matériaux classiques sans changer la conception des systèmes qu'ils construisent.

Et puisqu'il s'agissait dans cet article d'illustrer comment la chimie irriguait ce monde des nouveaux matériaux, comment ne pas conclure en soulignant les infinies possibi-

lités offertes par cette science pour inventer de nouveaux produits. Le monde des nouveaux matériaux est un lieu de rencontre pour toutes les branches de la chimie : nouveaux monomères, enchaînements polymérisés de plus en plus diversifiés et de mieux en mieux définis, molécules organiques présentant des propriétés qui les rapprochent des métaux, création de structures minérales de composition et de morphologie contrôlées à l'échelle du nanomètre, molécules hybrides combinant espèces minérales et espèces organiques, il ne semble pas y avoir de limite à jouer de toutes ces variables pour créer de nouveaux précurseurs qui seront les matériaux de demain.

Que continuent à se joindre à la capacité innovatrice de la chimie la précision de l'analyse et le pouvoir d'introspection de la physique du solide, et l'on peut alors s'attendre à voir l'univers des nouveaux matériaux se peupler de plus en plus, et apporter ainsi sa contribution à l'innovation technologique et à la satisfaction des besoins des hommes.

Notes

1. Hitachi annonçait récemment avoir préparé un nouveau matériau supraconducteur à base de vanadium dont la température critique atteignait 130° K.

La civilisation des plastiques

Daniel Hatat

L'histoire de l'*homo sapiens* se confond avec celle des matériaux destinés à assurer sa subsistance, sa protection et son bien-être : pierre, bois, argile, peaux et poils, fibres végétales, métaux. L'homme a approfondi la fabrication et l'usage de tous ces produits, afin de les adapter à ses besoins de plus en plus multiples et raffinés. Sa dernière conquête dans ce domaine concerne les plastiques dont l'ancêtre, le Celluloïd, a 120 ans, et dont les derniers rejets apparaissent tous les jours. Ces matériaux nouveaux ont pris une telle importance dans notre vie et dans toutes nos techniques – leur consommation mondiale dépasse en volume tous les métaux réunis – que nous pouvons parler de l'âge ou de la civilisation des plastiques. Une telle mutation ne va pas sans poser de nombreux problèmes de société.

Dans le domaine scientifique et technique, il a fallu inventer la polymérisation et les moyens physico-chimiques pour la contrôler ; il a fallu concevoir de nouveaux enchaînements atomiques, différents de ceux des métaux, des sels et des molécules organiques connues antérieurement, si bien que les polyméristes constituent une classe à part de chimistes. Il a fallu créer des techniques de mise en œuvre, des outils et par là même des métiers nouveaux, pour lesquels il n'existait



pas de formation spécifique. Et l'existence des plastiques, permettant l'obtention facile de formes complexes, oblige les ingénieurs de tous les domaines d'activité industrielle à remettre en cause la conception de leur produits.

Dans le domaine économique, les plastiques se trouvent peu ou prou en concurrence avec les autres matériaux (verre, métaux, papier, carton) auxquels ils opposent plus de liberté de conception, pour un prix souvent inférieur de l'objet fini. Cela a entraîné parfois chez les seconds quelques réactions brutales ou sournoises, mais aussi, de façon plus constructive, la mise au point de produits nouveaux plus performants.

Cependant c'est dans le domaine de la vie courante que l'adaptation est la plus difficile, car le public connaît très mal les plastiques et, de ce fait, porte sur eux nombre de ses craintes et de ses fantasmes quant à la santé et à l'environnement.

PLASTIQUES ET TECHNIQUE

Les plastiques ont connu un démarrage lent en l'absence de bases essentielles en chimie macromoléculaire et d'outils de transformation. Mais ils se sont développés rapidement dès que les polyméristes ont disposé de connaissances suffisantes en catalyse, en analyse structurale, en microscopie électronique, et que les plasticiens ont eu les machines adaptées, telles les extrudeuses dérivées de la fabrication des pâtes alimentaires et les presses à injecter issues de la coulée sous pression des métaux.

Genèse

La genèse des plastiques a été très progressive : il se passe plus de quarante ans entre l'apparition en 1868 du Celluloïd – polymère artificiel, c'est-à-dire naturel modifié – et celle en 1909 de la bakélite, premier polymère synthétique. On voit ensuite apparaître quelques produits fort intéressants comme les alkydes (base des peintures modernes) et le polyméthacrylate de méthyle (Plexiglas, Altuglas), qui ne demandent pas de matériel de mise en œuvre spécifique. Mais il faudra attendre 1930 pour que les travaux théoriques de Staudinger, sur le polystyrène en particulier, permettent enfin de comprendre la structure moléculaire des polymères, qu'ils soient naturels ou de synthèse.

Dès lors les éclosions vont se multiplier : en 1940 on connaît le PVC, les polyamides, le polyéthylène, les premiers polyuréthanes ; en 1950 s'y seront ajoutés les silicones, les polyesters insaturés, les résines fluorées, les ABS. En 1960 on aura réussi la polymérisation de la majeure partie des monomères simples pouvant exister.

Simultanément les grandes techniques de mise en œuvre ont été progressivement maîtrisées (extrusion, injection, calandrage, thermoformage, coulée des polyuréthanes, allègement du polystyrène), tout au moins à une échelle qui paraîtrait maintenant modeste.

Poste de radio américain (1938) en Bakélite, premier polymère de synthèse, dont Baekeland déposa le brevet en 1907.

Progrès de la chimie

Depuis 1960, et encore de nos jours, on distingue plusieurs voies de progrès d'origine chimique, portant sur la nature des polymères et sur leur structure. Ces progrès ont pour but de répondre aux demandes les plus variées et les plus sévères du marché, au moindre coût.

- Catalyse et conditions de polymérisation

Les catalyseurs de polymérisation favorisent la réaction désirée, au détriment des réactions parasites, et donc l'accès à des masses moléculaires élevées ; certains permettent d'obtenir des structures parfaitement régulières (catalyse stéréospécifique de Ziegler et Natta, prix Nobel 1963). Leur maîtrise, en perpétuelle évolution, assure la fabrication économique de polymères toujours mieux définis ; elle constitue un élément essentiel de chaque procédé de fabrication et en garantit la rentabilité.

- Nouveaux monomères

Les recherches visent à l'obtention de polymères de plus en plus résistants, tant sur le plan mécanique (rigidité surtout) que sur le plan thermique (service continu à 200° C avec pointes à 250° C et plus) et chimique (résistance à toutes les agressions), tout en conservant une mise en œuvre assez facile. C'est ainsi que sont apparus des polymères aromatiques (polyphényléther PPE, polyphénylsulfone PPS, polyétheréthercétone PEEK, etc.) et même tout récemment des polymères à base inorganique (polyphosphazènes), qui prennent une place de plus en plus importante en construction mécanique (tringlerie, engrenages), en automobile « sous le capot », là où les contraintes thermiques sont les plus prononcées, en matériel de sécurité. C'est toutefois dans la famille des thermodurcissables que l'on rencontre les polymères résistant le mieux à la chaleur (350° C pour les polyimides, 500° C pour des polymères expérimentaux).

- Copolymères

Alors que les monomères sont en nombre limité, la fabrication de copolymères, c'est-à-dire de polymères associant dans une même molécule géante des monomères différents, permet d'obtenir des produits variés souvent peu onéreux, adaptés à des applications spécifiques. Les premiers ont été les copolymères styréniques (caoutchouc SBR, résines ABS). On fabrique en particulier des copolymères de plus en plus nombreux de l'éthylène avec le propylène et d'autres hydrocarbures simples permettant de répondre à des problèmes variés posés par les industries de l'emballage, de l'automobile, de l'électroménager, etc. On développe aussi des copolymères-blocs à structure plus sophistiquée, comme les PEBA qui sont à la fois thermoplastiques et élastomériques.

- Alliages

Les alliages, dont le développement est plus récent, sont des mélanges de polymères distincts plus ou moins miscibles ou rendus tels grâce à des adjuvants. On arrive ainsi à conférer à un plastique une partie des propriétés d'un autre plastique (tenue aux solvants ou au froid par exemple) ou à faciliter sa mise en œuvre (polyphényléther/polystyrène). Comme les copolymères, les alliages qui se développent rapidement permettent de diversifier à l'infini les propriétés des produits.

Progrès de la technologie

La création de nouveaux procédés de transformation, le perfectionnement des procédés classiques sont source de progrès aussi décisifs que ceux dus aux nouveaux polymères.

- Plastiques renforcés

Dès les années 40 on a vu naître les composites comprenant une matrice en polyester renforcée par des fibres de verre. Depuis sont apparues d'autres résines (époxydes, cyanates-esters, etc.) et d'autres fibres (carbone, aramide, etc.). A l'origine, ces composites demandaient des temps de mise en œuvre longs (plusieurs minutes sinon plusieurs heures), excluant toute idée de grandes séries. Avec les procédés modernes d'injection appliqués à la BX de Citroën, on a enfin fabriqué de grands éléments plastiques (capot, hayon) d'une seule pièce aux cadences de la construction automobile. Les thermoplastiques renforcés ont été longtemps limités à la fabrication de petites pièces, mais maintenant on voit apparaître les TRE (thermoplastiques renforcés estampables), plaques préfabriquées mises en œuvre par emboutissage à chaud à haute cadence, qui devraient concurrencer les thermodurcissables.

- Plastiques allégés

On assiste depuis vingt ans à une floraison de modes d'allègement et d'expansion des thermoplastiques, tant en injection de pièces qu'en extrusion de tubes et profilés. Ceci conduit non seulement à un gain de matière, mais aussi à une meilleure tenue mécanique (augmentation du module d'élasticité et de la résistance aux chocs).

- Plastiques biorientés

Apparue au début des années 80, la biorientation des parois minces consiste à orienter les macromolécules selon deux directions choisies au voisinage du point de transition vitreuse et de « geler » cette structure. Elle permet de renforcer très notablement les bouteilles et les films d'emballage, et aussi de diminuer leur perméabilité aux gaz.

- Multicouches

Plus récemment on a commencé à développer les procédés d'extrusion « multicouche ». Ceux-ci consistent à superposer dans l'épaisseur d'un film ou de la paroi d'un récipient plusieurs polymères aux propriétés différentes ; on réalise par exemple des complexes comprenant à cœur une couche de polyalcool vinylique (imperméable aux gaz, mais sensible à l'humidité) et en surface des polymères de protection mécanique (PVC, polyéthylène, etc.). Comme les polymères ne se soudent souvent pas entre eux, il faut intercaler des films d'adhésif ; on arrive ainsi à produire industriellement des films de 0,2 mm d'épaisseur comprenant sept couches différentes régulières !

- Croissance et informatisation des machines

Depuis leur naissance, les machines voient d'année en année leur taille et leur capacité s'accroître : les calendres sortent des plaques de quatre mètres et plus de large, les machines d'extrusion-soufflage produisent des réservoirs de 2 000 litres d'une seule pièce, ou bien 10 000 bouteilles à l'heure, etc.

Les derniers progrès les plus significatifs portent sur les gains de productivité grâce à l'informatisation du matériel. Naguère il fallait plusieurs heures de réglages à chaque changement de matière ou d'outillage (moule, filière). Désormais on peut mettre en mémoire les réglages d'une fabrication précédente, ou mieux, même, introduire les données rhéologiques et thermiques du nouveau matériau à mettre en œuvre; la machine est alors prête en quelques minutes, quelques dizaines au maximum. Ceci exige bien évidemment une très grande constance des fabrications des fournisseurs de plastiques.

Conception des pièces en plastique

A l'origine on s'est contenté le plus souvent de remplacer des pièces en matériaux traditionnels (métaux, bois, verre) par des pièces identiques en plastique. Puis on s'est aperçu que cette paresse d'esprit pouvait conduire à des résultats médiocres et même parfois décevants, tant en coût qu'en comportement à l'usage. En effet, les plastiques sont très légers, et ils permettent d'obtenir les formes les plus complexes en une seule opération et avec une grande facilité. En revanche, leur comportement mécanique instantané et au cours du vieillissement est différent de celui des autres matériaux, notamment des métaux. Pour en obtenir les meilleurs résultats, il convient donc de reconcevoir les pièces, de prévoir des renforcements et des allègements, de se livrer à une analyse de la valeur des objets fabriqués. Ceci conduit souvent à en changer complètement la forme, sachant qu'une pièce plastique complexe peut souvent remplacer de nombreuses autres pièces qu'on n'aura pas à assembler ou à réusinier. Ce changement de conception suppose que les ingénieurs de toutes disciplines acceptent de remettre en cause les acquis des générations précédentes qui leur ont été transmis à l'école.

Interaction des disciplines

On assiste à un va-et-vient constant entre producteurs de polymères, transformateurs et clients. Tout nouveau produit crée de nouvelles applications, après mise au point, si nécessaire, du mode de transformation adéquat; toute nouvelle mise en œuvre, créée pour un produit et une application spécifique, s'étend à d'autres domaines, et les demandes nouvelles des clients excitent l'imagination des fournisseurs. Ces derniers sont du reste convaincus qu'il y a toujours une solution « plastique » à trouver, quel que soit le problème posé.

PLASTIQUES ET ÉCONOMIE

Les plastiques occupent une place à part dans l'économie. En effet, bien plus qu'aucune autre famille de matériaux, ils sont le fruit de disciplines multiples et ils s'appliquent à tous les domaines de l'activité humaine. Ils amènent à repenser les fabrications et les marchés traditionnels, ils en créent de nouveaux, et ils s'opposent ou s'associent aux matériaux traditionnels.

Les industries des plastiques

La fabrication des objets en plastique relève d'industries complémentaires mais séparées par la nature des activités et la taille des entreprises : celles qui fabriquent les matières, celles qui fabriquent les machines, celles qui transforment les plastiques en objets.

- Pétroliers et chimistes

Les groupes pétroliers produisent la majeure partie des matières de base pour les chimistes, notamment le naphta et les produits de vapocraquage (éthylène, propylène, etc.) Ils fabriquent aussi une part importante des plastiques de grande diffusion (polyéthylène, polypropylène) dont ils détiennent les monomères.

Les entreprises chimiques fournissent les grands intermédiaires minéraux (chlore, ammoniac, etc.) et organiques (phénol, acétone, amines) à la base de la fabrication de nombreux monomères ; elles produisent ces monomères ainsi que les adjuvants de toute nature (tensio-actifs, stabilisants, colorants, solvants, plastifiants, etc.) nécessaires à la fabrication des plastiques ; enfin, elles produisent des polymères. Ces entreprises sont de toutes tailles : si on trouve parmi elles les grands noms de la chimie internationale, on y compte aussi des PME qui fournissent soit des adjuvants, soit des polymères spéciaux.

Il n'y a pas de marché national pour les plastiques, car ils se transportent facilement et les grades sont si nombreux qu'aucun pays ne peut les fabriquer tous (on consomme en France plus de 100 grades différents de PVC !) De multiples polymères techniques à faible diffusion n'ont que quelques producteurs dans un continent ou même dans le monde, car il existe pour chacun une taille critique au-dessous de laquelle la rentabilité n'est plus assurée, et donc où le nombre de compétiteurs possible est limité.

On rattache aux chimistes les fabricants de mélanges (formulateurs ou compoundeurs). Ils ajoutent aux polymères vierges les adjuvants et livrent des pâtes, des solutions, des granulés, prêts à l'emploi par l'industrie de la transformation. Cette activité est en partie assurée par les transformateurs eux-mêmes.

- Mécaniciens

La mise en œuvre des plastiques demande des machines (extrudeuses, presses à injecter, calandres, machines à thermoformer, etc.) qui deviennent de plus en plus complexes. Ces machines sont conçues et fabriquées par des mécaniciens de précision, même pour les plus lourdes d'entre elles. A ces mécaniciens s'associent des électroniciens et des spécialistes de l'automatisation et de la régulation. En effet, pour accroître la productivité, il convient de trouver ou de retrouver rapidement, grâce aux données des producteurs ou à l'expérience antérieure, les réglages très fins des machines. Quand il s'agit de mettre au point un procédé de transformation très nouveau, les chimistes et les transformateurs collaborent avec les mécaniciens (exemple : démarrage du moulage de polyesters armés BMC à haute cadence pour la Citroën BX).



Aux constructeurs de machines on rattache les moulistes qui conçoivent les moules, filières et autres outillages en tenant compte des propriétés physiques des plastiques (rhéologie, retrait après mise en forme). Pour la plupart artisans ou petites entreprises, les moulistes ont un grand savoir-faire mis au service des méthodes d'usinage les plus fines et les plus modernes.

- *Transformateurs*

Les transformateurs constituent une profession à part de physiciens plus ou moins chimistes, mécaniciens et informaticiens selon les matières mises en œuvre. Ils sont répartis en familles très différenciées : extrudeurs, injecteurs, enducteurs, etc. A partir des plastiques fournis par la chimie, ils fabriquent des demi-produits (profilés, plaques, films, blocs de mousse, etc.), des composants pour les industries les plus diverses (boîtiers de transistors, engrenages pour la construction mécanique, etc.) et des objets finis (du bouton au chalutier). Les demi-produits sont repris par la transformation secondaire pour en faire des objets finis (emballages thermoformés à partir de plaques, chaudronnerie en PVC soudé, etc.).

Les transformateurs représentent les quatre cinquièmes des personnels employés dans les industries des plastiques. Les entreprises sont de tailles variées, depuis l'artisan jusqu'au groupe de plusieurs milliers de personnes ; mais ce cas est exceptionnel, et le gros des troupes est constitué de PMI.

A noter que 15 à 20 % de la transformation est dite « intégrée ». Il s'agit de productions captives assurées par

des industries fortes consommatrices de plastique : automobile, électroménager, embouteillage d'eaux minérales, etc.

Les marchés des plastiques

La place des plastiques dans l'économie est devenue considérable.

Depuis plusieurs années ils dépassent en volume tous les métaux réunis. Entre 1981 et 1989, la consommation est passée de 2,5 à 3,6 millions de tonnes, soit une croissance moyenne annuelle de 4,7 %, très supérieure à celle des autres secteurs industriels (1% de plus que la chimie en général) et du PNB. La croissance de la production française est encore plus importante : de 2,9 à 4,3 millions de tonnes dans la même période, soit une hausse de 5 % par an.

- *Facteurs d'expansion*

Le faible poids est un argument majeur dans l'emballage et les transports, et il joue aussi en mécanique (moindre inertie des pièces en mouvement). L'absence de corrosion chimique et atmosphérique est appréciée en mécanique à nouveau, en génie chimique et dans le bâtiment. L'inaltérabilité par les micro-organismes est une des clés du succès en emballage alimentaire. Les proprié-

Le polychlorure de vinyle est utilisé dans la fabrication de poches stériles pour la conservation de produits biologiques (Doc. Solvay).

tés diélectriques ont permis le développement de tous les matériels électriques et électroniques.

La facilité de la mise en œuvre des plastiques, la possibilité d'obtenir en une seule opération des objets simples ou complexes, teintés dans la masse, transparents ou opaques est un très grand atout économique, car elle est peu coûteuse et évite les stockages et la reprise de produits intermédiaires. A cause de toutes ces propriétés, même les plastiques très techniques et de prix élevé (supérieur à 50 F/kg) se trouvent économiques dans certains emplois.

- Débouchés

Les plastiques alimentent toutes les activités humaines sans exception. Leur premier client est l'emballage qui en consomme le tiers sous les formes les plus variées : sacs de toutes tailles, bouteilles et flacons, fûts, réservoirs, citernes. Sont surtout concernés les polyéthylènes, le PVC, le polyester linéaire (PET pour les boissons très gazeuses) et maintenant divers plastiques techniques (polyalcool vinylique, polychlorure de vinylidène) composants de multicouches imperméables à tous les gaz et à tous les arômes.

En deuxième position (20 % du total) on trouve le bâtiment qui consomme des films de polyéthylène pour l'étanchéité, plus de 40 % du PVC sous forme de tuyaux, de profilés (fenêtres et huisseries), de revêtements de sol, les deux tiers du polystyrène expansé (isolation thermique), la majeure partie des aminoplastes et phénoplastes sous forme de liants pour contreplaqué et panneaux de particules, et d'autres plastiques de plus haut de gamme (polycarbonate et polyméthacrylate de méthyle transparents, polyesters stratifiés pour panneaux et toitures, etc.)

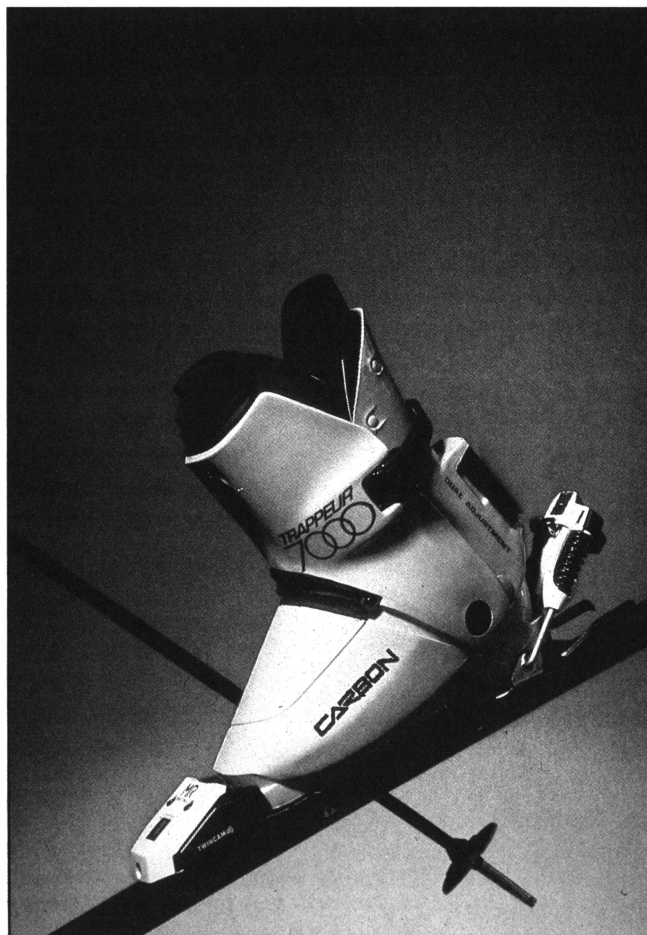
Les applications électriques (production, distribution et consommation de l'électricité, électronique, électroménager) consomment 12 % des plastiques les plus divers comme isolants, capots et boîtiers, engrenages et accessoires ; les plastiques techniques (silicones, polysulfones, etc.) à tenue élevée à la chaleur et à la flamme servent dans les équipements de sécurité.

Les transports (8 %) consomment des polyuréthanes, du polyester insaturé (carrosserie automobile et coques de bateaux), du PVC, du polypropylène et des ABS (équipement intérieur) et tous les plastiques techniques pour les pièces mécaniques ; la construction aéronautique fait en outre appel à des composites de très haut de gamme pour ses structures.

L'agriculture et les industries agro-alimentaires ont depuis longtemps compris l'intérêt des plastiques étanches (retenues d'eau, ensilage), insensibles à la corrosion par les liquides organiques et imputrescibles (matériel de ferme, de laiterie, de conserverie, etc.).

Les industries mécaniques se familiarisent progressivement avec les plastiques, surtout techniques, qui, lorsqu'on les domine bien, simplifient la construction, demandent moins de protection et d'entretien, et sont plus silencieux.

L'équipement domestique, l'ameublement, la décoration et même l'expression artistique (peinture, sculpture) trouvent dans les divers plastiques les matériaux fonctionnels qui permettent aux créateurs de matérialiser leurs concepts les plus simples ou les plus fous.



La santé enfin ne consomme que des quantités limitées de plastiques, mais fait appel à toutes leurs espèces pour réaliser des emballages, du matériel de perfusion, des prothèses et des orthèses, etc.

Les plastiques face à leurs concurrents

Les plastiques, qui ont aidé à la création de nombreux marchés (électricité, emballage moderne), ont limité l'expansion de matériaux traditionnels (verre, métaux, bois, papier-carton), quand ils ne prenaient pas une partie de leur place. Les premières réactions de « défense du territoire » apparurent dans les années 70 quand les plastiques commencèrent à prendre une réelle importance. Elles se traduisirent d'abord chez certains par des campagnes de dénigrement, la publication de résultats d'enquêtes fortement orientées, des actions de lobbying auprès de l'Administration afin de tenter d'obtenir des réglementations discriminatoires. Ces combats d'arrière-garde étaient voués à l'échec. La concurrence au contraire stimula l'imagination des chercheurs dans certaines branches selon deux voies différentes. Pour répondre au besoin d'allègement initié par les polymères, les métallurgistes ont créé d'une part des aciers à haute ténacité qui, à solidité égale, demandent des épaisseurs moindres, et, d'autre part, de nouveaux alliages légers, à base de lithium par exemple, dont la densité est voisine de 2, donc peu éloignée de celle de certains plastiques techniques renforcés. Les cartons ont eux joué très tôt la carte de