Perspectives en physico-chimie *

par Bernard Valeur

(Chaire de chimie générale dans ses rapports avec l'industrie, Conservatoire National des Arts et Métiers, 292 rue Saint-Martin, 75141 Paris Cedex 03)

Monsieur le Président,
Monsieur le Directeur du Conservatoire National des Arts et Métiers,
Messieurs les Professeurs et chers Collègues,
Mesdames, Messieurs,

J'aimerais qu'à cette Leçon inaugurale soit associée la mémoire du Professeur Georges Champetier, emporté prématurément par la maladie. C'est en effet dans son laboratoire que j'ai commencé ma carrière d'enseignant et de chercheur ; il n'avait cessé depuis de me prodiguer ses conseils avec une grande bienveillance. Membre de l'Institut, Directeur honoraire de l'École Supérieure de Physique et Chimie, le Professeur Champetier fut le père de la chimie macromoléculaire en France et l'un des pionniers de cette discipline dans le monde. Sa carrière fut exceptionnelle et mon admiration pour ses qualités de savant et d'homme était sans limite. Il m'avait fait l'immense honneur de me considérer comme l'un de ses petits-enfants spirituels. Je suis heureux de lui rendre aujourd'hui ce solennel hommage.

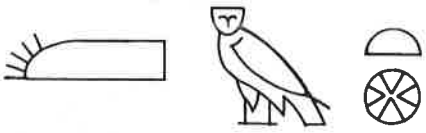
Enseigner la « Chimie générale dans ses rapports avec l'industrie » est une lourde tâche, car il s'agit d'un très vaste domaine, mais ce n'en est pas moins une tâche passionnante. Un tel cours doit mettre l'accent sur la physico-chimie qui est devenue une plaque tournante de domaines très variés.

Il y a quelques décennies, la physique et la chimie étaient considérées comme des sciences très distinctes. On reprochait au chimiste d'éprouver de la réticence à l'égard des mesures physiques et au physicien de ne pas se préoccuper suffisamment de l'aspect chimique de ses problèmes et notamment de la pureté de ses produits ; d'où la boutade selon laquelle le physico-chimiste du début du siècle était accusé de faire de mauvaises mesures sur des composés mal définis. Cette époque est heureusement révolue et il est désormais impossible de définir une frontière entre la physique et la chimie. Dès 1921, Georges Urbain avait annoncé la chimie physique comme « science de l'avenir ». Cette prédiction s'est réalisée.

Je préfère, pour ma part, le terme « physico-chimie » à celui de « chimie physique » dans lequel physique est l'adjectif de chimie. Le terme physique chimique n'est jamais employé : il présenterait de toutes façons le même inconvénient. Je saisis d'ailleurs mal la distinction faite par l'éditeur d'un grand périodique anglais entre deux sections, l'une intitulée « Physical Chemistry » et l'autre « Chemical Physics ». Si le terme physico-chimie est de plus en plus répandu, c'est parce qu'il évoque mieux le carrefour de la physique et de la chimie, considérées alors sur le même pied d'égalité. Je tiens de mon père le goût de la recherche de l'étymologie des mots. Vous connaissez certainement l'origine du mot physique qui vient du grec (φύσις: la nature), mais peut-être ne savez-vous pas que le mot chimie remonte à l'ancienne langue

** Leçon inaugurale prononcée, le 10 décembre 1980, sous la présidence du Professeur P. G. de Gennes, Membre de l'Institut, Professeur au Collège de France, Directeur de l'École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la Ville de Paris.*

égyptienne (figure 1). En hiéroglyphes, le pays d'Égypte s'écrit :



épelé Kemet, mot qui signifie la « noire ».

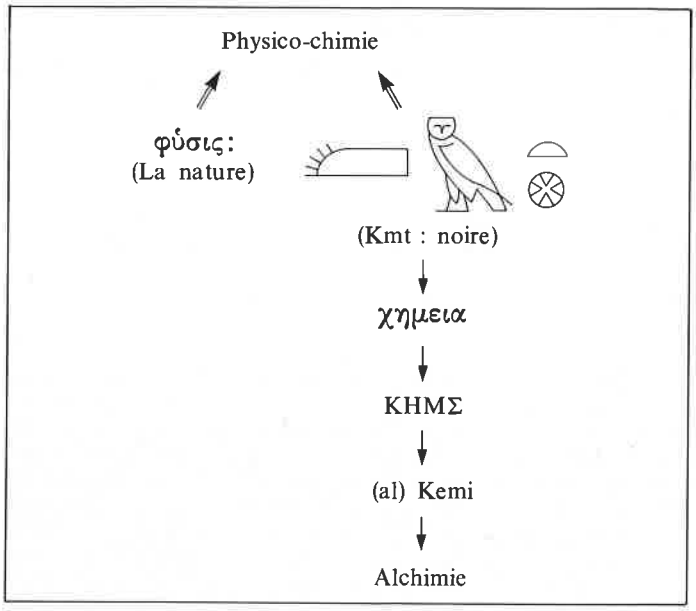


Figure 1.

Les anciens Égyptiens avaient conscience que dans la terre « noire » fertile, le limon du Nil, s'opéraient les transformations chimiques nécessaires à la vie. Les Grecs, très impressionnés par la science chimique des Égyptiens, ont désigné cette science par le mot χημεια, c'est-à-dire science de l'Égypte.
Les Coptes ont, par la suite, perpétué le terme KHMΣ. Enfin, les Arabes ont conservé la même acception avec le terme Kemi = chimie, qui, précédé de l'article « al », est devenu alchimie.

Objectifs et perspectives

Le principal objectif de la physico-chimie est de trouver des corrélations entre les édifices atomiques ou les structures moléculaires et les propriétés de la matière : propriétés physiques, mécaniques, thermiques... La physico-chimie a également pour but la compréhension des transformations chimiques de la matière. C'est pourquoi, elle occupe une place très importante dans le monde industriel d'aujourd'hui.

Les matériaux

Autrefois la chimie avait un rôle bien défini dans l'industrie, la préparation, d'une part, des produits de base (acides, bases, sels, solvants organiques,...) et, d'autre part, des produits plus spécialisés (peintures, vernis, colles, produits pharmaceutiques, colorants,...). Puis la technologie moderne a exigé des « matériaux » à usages spéciaux, aux performances sans cesse plus élevées : les matériaux à base de polymères qui ont depuis longtemps envahi notre vie courante et offrent constamment de nouvelles perspectives, les métaux et leurs alliages, les matériaux dans le domaine électrique et magnétique, les matériaux vitreux et céramiques, etc.

Le plus souvent, un seul composé ne peut pas répondre à un objectif déterminé ; ainsi est-on passé de l'ère du composé unique à l'ère du « composite » au niveau moléculaire. Citons, par exemple, les matériaux composites constitués d'une âme fibreuse (fibre synthétique, fibre de carbone ou de bore) noyée dans un liant qui est, en général, une résine synthétique et parfois du carbone. L'objectif est un gain de poids par rapport à l'acier pour une même résistance mécanique. Ces matériaux sont déjà très utilisés dans les industries aéronautique et aérospatiale et sont sur le point de concurrencer l'acier dans l'industrie automobile. Il est remarquable que l'homme cherche ainsi, une fois encore, à imiter la nature : les os et les dents ne peuvent-ils pas en effet être assimilés à des matériaux composites fibreux ?

Le concept de matériaux composites est très général car de nombreuses combinaisons sont possibles. Ainsi, en particulier, des propriétés intéressantes sont attendues des composites de deux oxydes métalliques : ils pourraient être conducteurs de l'électricité dans un sens et isolants dans l'autre.
Parmi les matériaux de l'avenir, il faut également citer les « conducteurs organiques » tels que les polyacétylènes.

Dans l'élaboration d'un matériau, quel qu'il soit, on a pris conscience de la nécessité d'échapper à l'empirisme. Une meilleure compréhension des phénomènes physico-chimiques permet d'éviter en grande partie les tâtonnements, consommateurs de temps et d'énergie.

Le domaine des matériaux constitue un vaste champ d'investigation où « l'imagination physico-chimique » jouera un rôle clef, mais les succès dépendront de l'efficacité de la collaboration entre physiciens et chimistes.

L'étude des surfaces

Un problème classique faisant appel à la physico-chimie est l'étude des surfaces. De nombreuses propriétés sont conditionnées par l'état de surface des solides : la corrosion, l'adhésion, l'abrasion, l'usinage, ainsi que les propriétés catalytiques.

Un catalyseur est une substance capable d'accélérer une réaction chimique sans être consommé. La vitesse d'une réaction peut être ainsi jusqu'à 10 ou 100 milliards de fois plus rapide. Mais, le plus remarquable, c'est l'action sélective de certains catalyseurs. Par exemple, si l'on fait passer un mélange de propylène et d'oxygène sur de l'oxyde de bismuth, on obtient de l'hexadiène et du benzène, tandis que le même mélange passant sur un catalyseur à base de molybdate conduit à l'acroléine. De récentes études ont donné le jour à des catalyseurs en forme de cage : les zéolithes. Ce sont des alumino-silicates cristallins utilisés pour le craquage des pétroles (figure 2). Ils permettent également la conversion du méthanol en

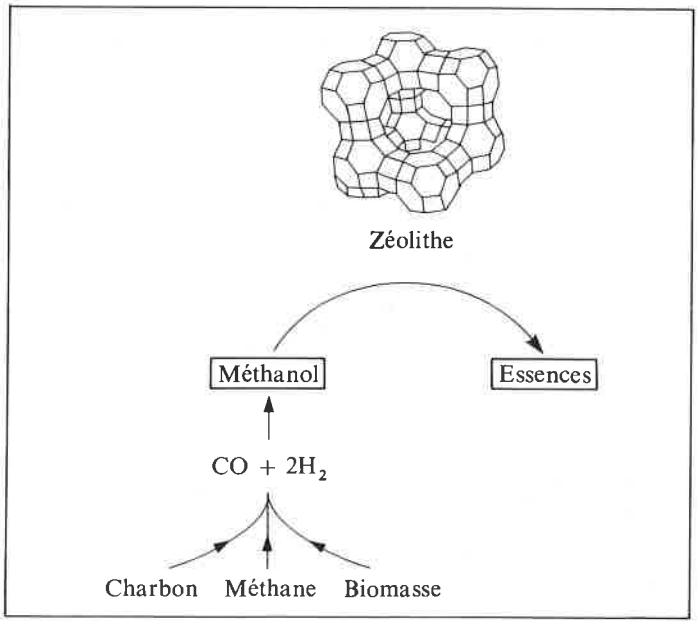


Figure 2.

essences ; la construction d'usines fondées sur ce principe est déjà en cours.

L'énorme effort de recherche consacré à la catalyse est un reflet de l'impact considérable de ce domaine dans l'industrie chimique et les problèmes énergétiques. Les prochaines années seront décisives. Le succès de notre lutte contre la pénurie d'énergie dépend, en partie, de notre faculté de concevoir et réaliser des catalyseurs nouveaux et meilleurs.

Dans la science des surfaces, mentionnons également les colloïdes. Le mot « colloïdes », terme un peu vieillot, ne reflète pas leur importance présente et future. Une attention particulière doit être portée aux « agents de surface » dont l'exemple le plus banal est le savon. Il s'agit de molécules, appelées également « tensio-actifs », dotées d'une tête polaire hydrophile (c'est-à-dire qui aime l'eau) et d'une longue queue hydrophobe (c'est-à-dire qui déteste l'eau). Lorsqu'on met de telles molécules dans l'eau, par exemple, elles ont tendance à se disposer à l'interface eau-air et à se regrouper en micelles, de telle sorte que les queues hydrophobes ne soient pas en contact avec l'eau (figure 3).

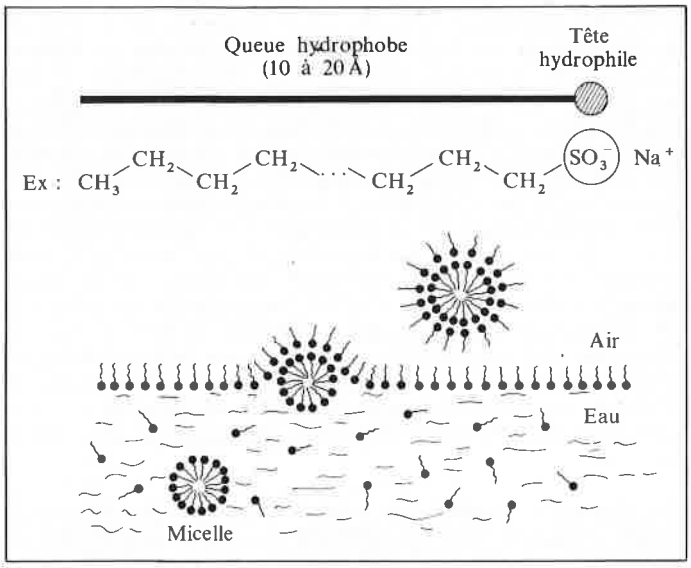


Figure 3.

L'utilisation de ces tensio-actifs est extrêmement variée : on les trouve dans les produits de lavage (détergents), les produits de soudage, les bains de galvanisation, les agents antirouille, etc. ; ils servent à obtenir des émulsions stables pour la pharmacie, l'agroalimentaire, les cosmétiques, les peintures... Sous forme de microémulsions, ils interviennent dans la récupération assistée du pétrole. Il est même question de les utiliser pour encapsuler des médicaments qui seraient ainsi véhiculés dans le sang comme des micropilules devant atteindre un site d'action déterminé. D'une manière générale, les tensio-actifs sont employés, comme leur nom l'indique, pour modifier la tension superficielle et les forces de cohésion ; les effets hydrophobes et hydrophiles peuvent ainsi être modulés selon les objectifs. Sous tous ces aspects, c'est en élucidant les processus physico-chimiques que l'on peut aboutir à une plus grande efficacité pour une application donnée.

Les problèmes énergétiques

La physico-chimie tient également une place de choix dans le domaine de l'énergie et, en particulier, dans les problèmes de combustion. Si le feu n'a plus, comme chez nos ancêtres, un aspect maléfique ou mystérieux, nous sommes loin d'avoir percé tous ses secrets. Nous ignorons encore le détail des réactions chimiques intervenant lorsque de l'essence brûle dans un moteur ou lorsque du bois se consume dans une cheminée. Les physico-chimistes devront s'efforcer, encore pendant de nombreuses années, de rendre la combustion plus économique et moins polluante.

On parle beaucoup actuellement de « l'énergie solaire » considérée comme l'énergie de demain car elle est abondante, inépuisable, gratuite et non polluante. Cependant le problème de la conversion de cette énergie dans des conditions économiques acceptables est loin d'être simple, du fait, surtout, que le rayonnement solaire est diffus d'où la nécessité de le concentrer, et, en outre, que son spectre est très étendu, de l'ultraviolet jusqu'à l'infrarouge ; or, aucun convertisseur n'est opérationnel dans tout ce domaine de longueur d'onde. Il existe plusieurs voies de recherche où la physico-chimie joue un rôle prépondérant : la photoélectrochimie, le stockage photochimique et thermochimique, la production d'hydrogène (combustible de demain) à partir de l'eau, l'utilisation de composés fluorescents en cascade pour effectuer une concentration à la fois en flux et en fréquence...

Les sciences de la vie

Les sciences de la vie ont également tiré profit de l'approche des problèmes par la physico-chimie. Les progrès de la « biologie moléculaire » en sont le témoignage. De même, en « pharmacologie moléculaire », on commence à mieux comprendre les relations entre activité biologique et conformation des molécules, ainsi que les relations entre modification génétique et insertion de molécules dans les acides nucléiques.

Par ailleurs, si la médecine a largement acquis ses lettres de noblesse au royaume des sciences, c'est, sans aucun doute, parce qu'elle s'est appuyée sur la physico-chimie.

La physico-chimie intervient dans bien d'autres domaines : les gels, les poudres, la mise au point de membranes pour le dessalement et l'ultrafiltration, l'utilisation de lasers pour agir de façon sélective sur la formation d'un produit au cours d'une réaction chimique...

Il serait vain d'essayer de passer en revue tous les domaines où la physique et la chimie s'interpénètrent au point de devenir une seule science. Qui pourrait se vanter de définir une frontière entre la chimie du solide et la physique du solide, entre la chimie quantique et la physique quantique, entre la photochimie et la photophysique,... *Il n'est pas de vrai problème qui soit exclusivement chimique ou exclusivement physique.*

Je ne parlerai pas de l'arsenal impressionnant des techniques physico-chimiques, outils indispensables à toutes les investigations que je viens de mentionner. Le futur titulaire de la chaire des Méthodes physico-chimiques d'analyse sera plus qualifié que moi pour en parler.

Après ce rapide panorama, je voudrais illustrer mes propos de quelques aspects particuliers des cristaux liquides, des polymères et des réactions chimiques oscillantes.

Quelques exemples de problèmes physico-chimiques

Les cristaux liquides

Les cristaux liquides offrent un des plus beaux exemples de corrélation entre structure chimique et propriétés physiques. Au premier abord, ce terme de cristaux liquides est un peu surprenant. Comment un cristal, symbole de l'ordre parfait, peut-il être liquide, c'est-à-dire désordonné ? On désigne sous ce vocable, des substances possédant à la fois la fluidité des liquides et les propriétés optiques anisotropes des cristaux. Par conséquent, dans la classification si familière des 3 états de la matière, liquide, solide et gaz, les cristaux liquides sont à insérer entre l'état solide et l'état liquide.

Ces états intermédiaires, appelés pour cette raison, « phases mésomorphes », s'obtiennent à partir de molécules organiques allongées, ni trop rigides, car elles s'ordonneraient en un cristal, ni trop flexibles, sinon elles se comporteraient comme un liquide isotrope. En conséquence, leur structure chimique est en général celle qui est indiquée sur la figure 4.

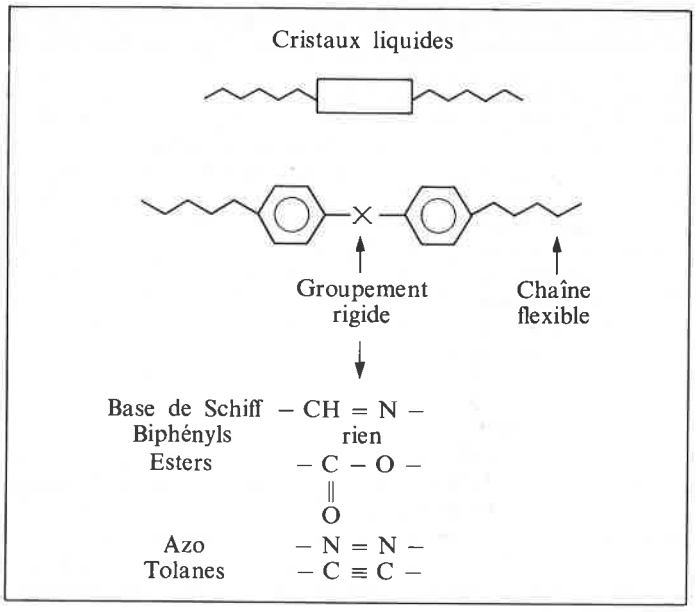


Figure 4.

La partie rigide centrale est souvent constituée de deux noyaux benzéniques encadrant un groupement rigide. Les molécules étudiées les premières ont été les bases de Schiff, mais elles étaient très sensibles à l'humidité. Les composés du type biphényls et esters sont plus stables à la lumière et au champ électrique.

Selon leur structure chimique et selon, la température, ces molécules ont tendance à s'ordonner les unes par rapport aux autres de façon différente. La classification de Friedel distingue les phases « nématiques », « smectiques » et « cholestériques » ; je ne parlerai que des deux premières.

Dans une phase nématique, les molécules sont, aux fluctuations près, parallèles les unes aux autres, leurs centres étant disposés de façon aléatoire comme dans un liquide ordinaire. Dans une phase smectique, les molécules sont également parallèles, mais elles sont en outre réparties en couches successives. Une couche représente, en quelque sorte, un liquide à deux dimensions.

Les applications des cristaux liquides sont très nombreuses. Il est hors de mon propos de les passer en revue. Je me bornerai à rappeler leur utilisation dans le domaine de la visualisation, c'est-à-dire l'affichage numérique (montres, calculatrices, appareils de mesure,...), les projections sur grand écran et, dans un proche avenir, les écrans de télévision plats.

De telles utilisations s'expliquent de la façon suivante. Les propriétés optiques d'une couche de cristaux liquides entre deux électrodes transparentes (distantes de quelques dizaines de microns) ne sont pas les mêmes selon la présence ou l'absence de champ électrique. La transparence, c'est-à-dire l'aspect noir ou clair d'un dispositif, peut ainsi être commandée par une différence de potentiel de quelques volts.

Il est évident que la réponse des molécules à l'action d'un champ électrique qui tend à les orienter dépend de leur structure chimique. Il en est de même pour bien d'autres phénomènes : par exemple, le domaine d'existence de ces phases mésomorphes en fonction de la température, la stabilité de ces molécules à la lumière et à la chaleur, leur couleur, la viscosité,... etc. Examinons quelques-uns de ces aspects physico-chimiques.

Les phases mésomorphes n'existent que dans un intervalle de température bien défini. En dessous de la température de fusion, la substance est sous la forme d'un cristal habituel, et au dessus d'une certaine température, appelée température de clarification, l'agitation thermique l'emporte et la substance est à l'état de liquide isotrope. En vue des applications pratiques, on cherche naturellement à disposer d'un domaine de température le plus étendu possible. Ce domaine dépend étroitement de la structure chimique de la molécule et, en particulier, de sa longueur pour une série homologue. Considérons par exemple un ester dicarboxylique possédant un pont constitué d'un nombre variable n de groupes méthylène CH_2 (figure 5). La température de clarification passe alternativement par un maximum et un minimum selon que n est pair ou impair, les écarts s'atténuant lorsque le pont s'allonge. Le plus grand intervalle d'existence de la phase nématique est obtenu pour $n = 4$. L'interprétation des variations de température de clarification continue à faire l'objet de discussions. La solution de ce problème est à rechercher dans « l'analyse conformationnelle » de ces molécules, comme le montrent ces deux représentations schématiques pour $n = 2$ et $n = 3$. En outre, les interactions entre molécules jouent un grand rôle.

Par ailleurs, la stabilité à la lumière et à la température est un critère important pour les systèmes de projection d'images sur grand écran (image d'un tube cathodique par exemple). Or, la stabilité à la lumière dépend notamment de la façon dont les molécules absorbent cette lumière. La figure 6 montre l'absorption de trois types de molécules : les composés de type stilbène et biphényle absorbent les rayons ultra-violets ; en éliminant ceux-ci grâce à un filtre optique, il est en principe possible d'éviter une dégradation photochimique. Une dégradation peut également

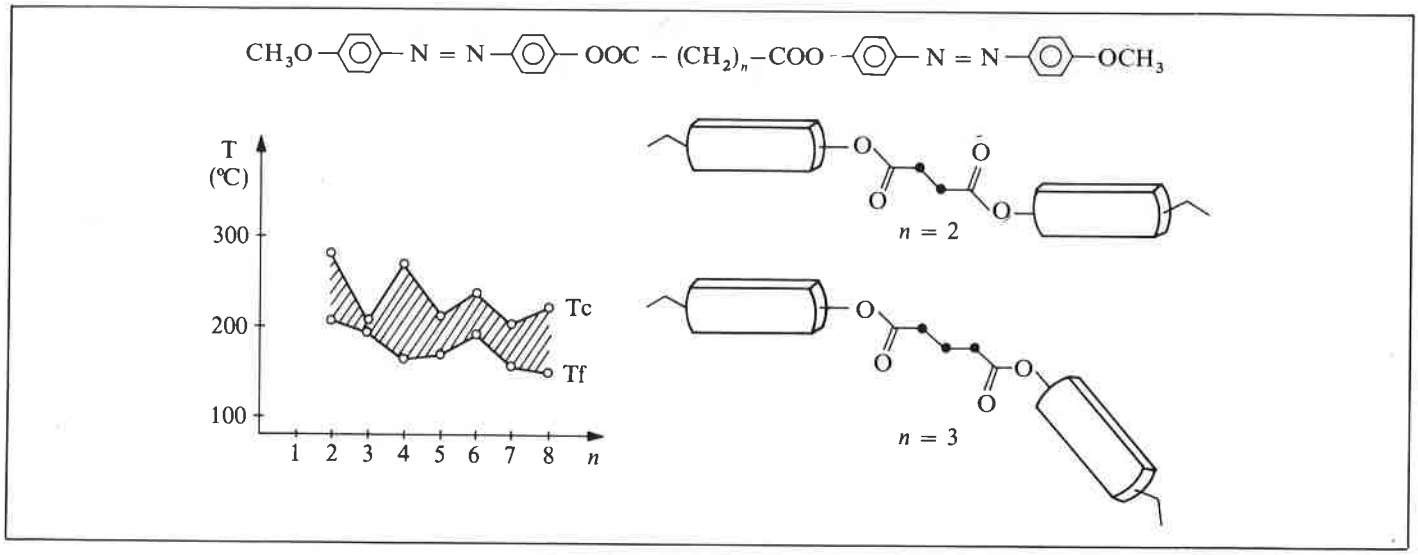


Figure 5.

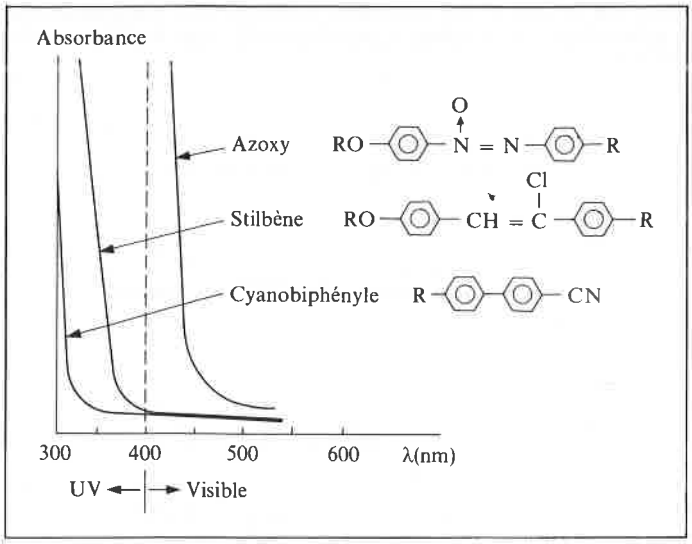


Figure 6.

provenir de la présence d'impuretés ou même d'oxygène susceptible de provoquer une photoxydation dans certains cas. C'est en approfondissant ces mécanismes de dégradation que l'on peut espérer mettre au point des systèmes de durée de vie très longue.

Cette relation omniprésente entre structure chimique et propriétés physiques stimule l'imagination. Peut-on inventer des molécules de formes tout-à-fait différentes qui donneraient également naissance à des phases mésomorphes ? Une idée très intéressante, qui est du Professeur de Gennes, est de préparer des molécules en forme de disques plats en respectant le compromis entre rigidité et flexibilité. Effectivement, de telles molécules s'ordonnent pour

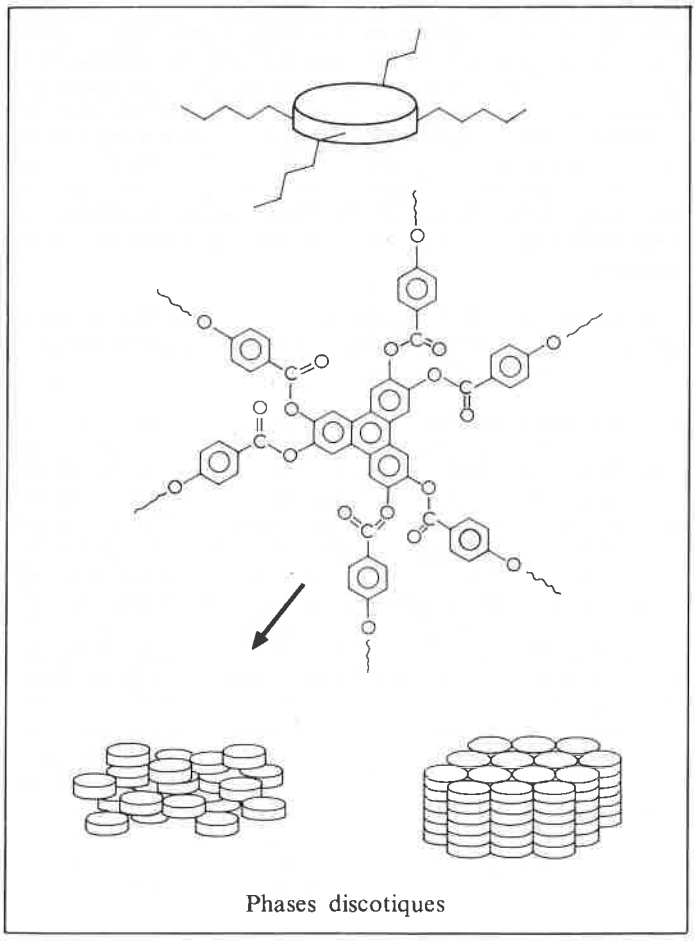


Figure 7.

constituer un nouveau type de phases : « les phases disquotiques » (figure 7). De nouvelles applications en sont attendues ; elles naîtront d'une magnifique collaboration entre physiciens et chimistes.

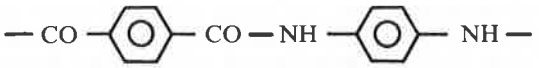
Je voudrais vous montrer maintenant deux réalisations concernant « les écrans à cristaux liquides ». Je remercie vivement la Société Thomson-CSF, en la personne de M. Michel Hareng, grand spécialiste de ces questions, de m'avoir prêté le film que vous allez voir.

Pour réaliser un écran, il suffit (mais ce n'est pas simple) de disposer côte à côte un grand nombre de cellules élémentaires à la façon d'une immense grille de mots croisés, la commande étant effectuée ligne par ligne. Il est ainsi possible de restituer une image télévisée : il s'agit ici d'un écran matriciel à cristal liquide smectique de 100 points par 100 points, dont la dimension est de 4 mm × 5 mm. L'image est projetée comme on le fait habituellement pour une diapositive, mais il s'agit ici d'une diapositive électronique. La résolution de 100 points par 100 points apparaît évidemment insuffisante mais les progrès actuels permettent d'envisager à court terme une résolution de 500 points par 500 points, ce qui correspond à la définition des images télévisées actuelles.

Vous voyez maintenant un écran du même type, de 240 points par 240 points, destiné à des applications informatiques. Une variante de ce système équipera sans doute les miniordinateurs domestiques de demain. L'image est en vert et blanc car un filtre vert spécial a été placé dans le dispositif de projection. L'association de trois écrans monochromes indépendants (rouge, bleu, vert) avec recombinaison des images au niveau de la projection est une des possibilités de restituer une image couleur.
Dans les deux réalisations qui viennent d'être présentées, l'application visée est le vidéoprojecteur, de la dimension d'un projecteur de diapositives. Il serait associé à un tuner, un magnétoscope ou un vidéodisque ; l'avantage réside dans la possibilité de projeter une image de grande dimension et très lumineuse. Une autre application est la télévision de poche.

Des cristaux liquides aux polymères

Examinons maintenant un aspect particulier des polymères, en relation directe avec les considérations précédentes sur les cristaux liquides.
Lorsqu'un très grand nombre de motifs du type :



sont mis bout à bout, on obtient un polymère et, plus précisément, un polyamide aromatique [poly (*p*-phénylène téréphtalamide)] dont le nom commercial est KEVLAR. Un tel polymère en solution, à concentration suffisamment élevée, donne naissance à des structures du type cristal liquide. En effet, la chaîne macromoléculaire est suffisamment rigide et sa conformation locale ressemble à des bâtonnets. Ainsi, de nombreuses chaînes se trouvent ordonnées parallèlement les unes aux autres. Lors d'un filage, une orientation peut être développée sur l'ensemble de la fibre (figure 8).

L'idée d'orienter les chaînes macromoléculaires, en vue d'améliorer la résistance mécanique, remonte à l'époque où l'on a commencé à étirer les fibres textiles lors du filage. Ce qu'il y a de remarquable, dans le cas présent, c'est cette orientation obtenue sans étirage.

Les propriétés des fibres KEVLAR sont tout-à-fait exceptionnelles du point de vue résistance mécanique. Le module de traction est très élevé et la charge à la rupture est de l'ordre de 20 tonnes/cm^2.

Ces propriétés s'expliquent de la façon suivante : le matériau est fortement cristallin et les domaines cristallins sont orientés selon l'axe de la fibre ; ainsi, lors d'une contrainte, les chaînes macromoléculaires sont sollicitées selon leur axe. Or, comme le montre la figure, il n'y a aucune possibilité de rotation et seules les

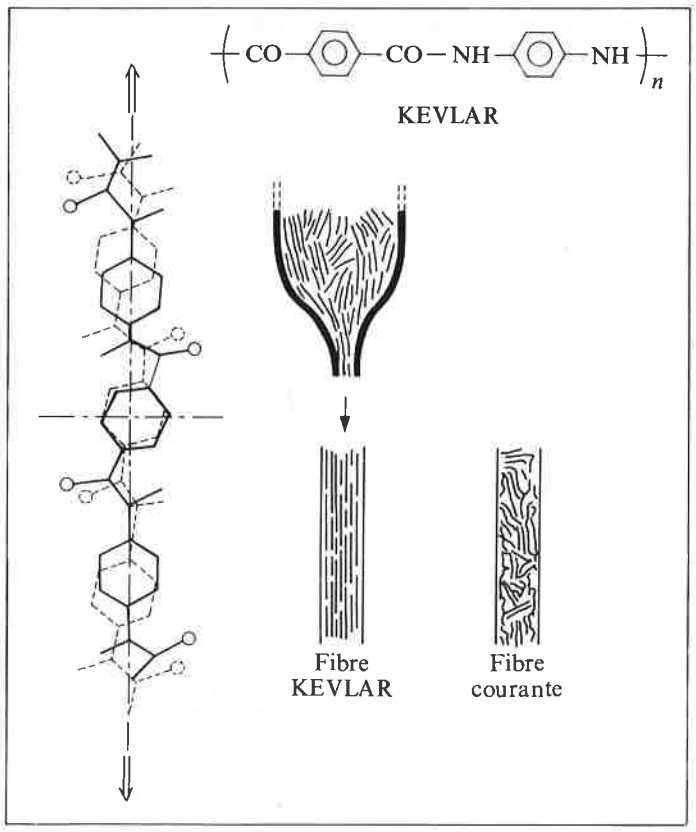


Figure 8.

très faibles variations de longueur des liaisons et des angles de valence pourront absorber la déformation imposée.

Ces fibres concurrencent les fibres de carbone et sont très employées en aéronautique. Elles sont utilisées dans les matériaux composites fibreux dont j'ai déjà parlé. C'est ainsi que, noyées dans une résine époxy, elles servent à la fabrication de câbles aussi résistants que l'acier, mais d'un poids cinq fois plus faible ; d'où leur utilisation pour l'ancrage de plates-formes pétrolières en mer, la confection de gilets pare-balles ; l'application du renforcement de pneumatiques a également été envisagée.

L'étude des polymères cristaux liquides fait actuellement l'objet de recherches intenses. Un comportement du type cristal liquide a été observé récemment sur des polyesters aromatiques à l'état fondu, ce qui montre que d'autres possibilités restent à découvrir.

Les réactions chimiques oscillantes

Pour être fidèle à la mission d'un professeur au Conservatoire National des Arts et Métiers, qui, je vous le rappelle, était à l'origine, un démonstrateur, j'ai décidé de vous montrer une expérience. Je remercie M. Chessé pour sa collaboration.

Il s'agit d'une réaction chimique tout-à-fait remarquable, qui m'a toujours fasciné et pas seulement en raison de son caractère esthétique. Cette réaction est véritablement pour moi un symbole parce qu'elle est extraordinairement riche du point de vue de ses implications dans tous les domaines de la science : physique, chimie, biologie, et même les mathématiques ont leur mot à dire.

Habituellement, lorsque l'on mélange des composés chimiques susceptibles de réagir entre eux, on s'attend à ce que la réaction s'effectue de façon monotone en transformant progressivement les réactifs en produits. Il existe cependant des exceptions : certaines réactions sont « périodiques », ce qui peut être visualisé par une oscillation de couleurs. La plus célèbre, celle que vous allez voir, est la réaction de Belousov-Zhabotinski, découverte par hasard en 1958 par le chimiste soviétique Belousov et étudiée ensuite par Zhabotinski et bien d'autres chercheurs.

Essayons de décrire tout d'abord cette réaction compliquée en termes simples et, j'espère, compréhensibles pour tout le monde (figure 9).

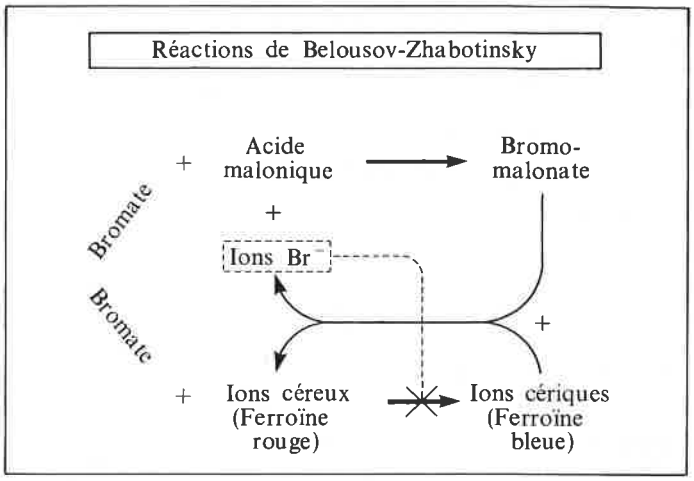


Figure 9.

Il s'agit de l'oxydation de l'acide malonique par le bromate de potassium qui conduit à la formation de bromomalonate. Cette réaction est catalysée par le cérium introduit sous forme d'ions céreux. Leur présence est visualisée par un indicateur coloré, la ferroïne, dont la couleur est, dans ces conditions, rouge. Par action sur le bromate, ces ions céreux se transforment en ions cériques d'où un changement de couleur de la ferroïne qui devient bleue. La solution étant agitée en permanence, pourquoi revire-t-elle au rouge ? Le bromomalonate produit, et qui continue à se former, réagit avec les ions cériques pour redonner des ions céreux provoquant ainsi un retour à une coloration rouge. Les ions céreux ne sont pas immédiatement oxydés en ions cériques parce qu'il se forme également des ions bromure, lesquels inhibent cette réaction d'oxydation. Mais les ions bromure sont consommés par réaction avec l'acide malonique et, lorsque leur concentration est devenue très faible, l'inhibition est levée et les ions céreux peuvent être de nouveau oxydés en ions cériques : la solution vire de nouveau au bleu et le cycle recommence tant qu'il reste du bromate et de l'acide malonique. Cette périodicité permet de parler « d'horloge chimique », après les horloges astronomiques et atomiques.

Le schéma que je viens de montrer est très simplifié ; le mécanisme intime de ces « réactions couplées autocatalytiques » continue à faire l'objet de nombreuses études.

Cette réaction de Belousov-Zhabotinski peut donner lieu à un phénomène plus extraordinaire encore, au sens étymologique du terme. Lorsque la solution, homogène au départ, n'est pas agitée, on voit apparaître des structures ordonnées sous forme de couches horizontales de coloration alternativement bleues et rouges. Comment peut-on expliquer la formation de structures ordonnées à partir d'un milieu homogène ? En absence d'agitation, les oscillations ne se produisent plus au même moment en tous les points de la solution ; elles commencent en un point et se propagent dans toutes les directions à des vitesses différentes. Après un certain nombre d'oscillations, apparaît une petite région où la concentration n'est pas homogène, à partir de laquelle des couches successives peuvent se développer, matérialisant des surconcentrations alternées d'ions céreux et cériques. Nous avons donc affaire à une propagation « d'ondes chimiques » et non pas d'ondes hydrodynamiques.

Prigogine et son École de Bruxelles ont donné à ces structures le nom de « structures dissipatives », dissipatives parce qu'elles sont créées et maintenues au prix d'une dissipation d'énergie. Il s'agit ici, évidemment, d'énergie chimique ou, en toute rigueur, d'enthalpie libre.

Il n'y a pas de contradiction avec le deuxième principe de la thermodynamique, car la thermodynamique classique ne s'applique qu'aux systèmes en équilibre. Or, ces oscillations dans le temps et dans l'espace n'apparaissent que loin de l'équilibre. C'est « la thermodynamique non linéaire des processus irréversibles » qui permet d'expliquer ces phénomènes.

Un exemple de structure dissipative est également connu depuis longtemps en physique et, plus précisément, en hydrodynamique : c'est « l'instabilité de Bénard ». Lorsqu'une couche de liquide est chauffée par en dessous, le transport de chaleur s'effectue par conduction et par convection et, dans certaines conditions, il est possible d'observer un arrangement régulier de cellules de convection.

Mais c'est surtout en biologie que les structures dissipatives spatiales et temporelles semblent jouer un rôle important, comme l'a montré Prigogine. En effet, quelle définition un physico-chimiste donne-t-il d'un « système vivant » : c'est une région d'ordre local qui se maintient elle-même en s'alimentant des réserves d'énergie (enthalie libre) de son environnement.

Il est prouvé que des « réactions métaboliques », telles que la glycolyse, s'accompagnent d'oscillations de concentrations entretenues. Notre organisme présente des rythmes bien connus (battements cardiaques, rythmes respiratoires, etc.). On sait depuis longtemps que le système nerveux est le siège de phénomènes rythmiques. Les ondes cérébrales peuvent être analysées en termes de structures dissipatives temporelles.

Les problèmes de l'apparition de la vie, les problèmes de la croissance et du développement peuvent être abordés sous un jour nouveau grâce à ces structures dissipatives spatiales. Mais, de l'avis même de Prigogine, *« il faut se garder d'idées trop simples. Nous commençons seulement à dégager certaines étapes »*. Je partage tout-à-fait cette prudence.

Revenons à la réaction de Belousov-Zhabotinski. Elle continue et continuera longtemps à faire parler d'elle. Récemment, elle a permis de prouver l'existence de la turbulence chimique ». Le terme turbulence évoque familièrement le mouvement tourbillonnaire de l'eau dans le sillage d'un bateau ou de fumée s'élevant d'une cigarette. La turbulence est un phénomène encore mal compris et, si elle suscite actuellement tant d'intérêt, c'est qu'elle intervient dans de nombreux domaines : depuis l'astrophysique jusqu'à la chimie, en passant par la météorologie et la construction des avions.

Les physiciens, les chimistes, les biologistes ainsi que les mathématiciens cherchent à comprendre les phénomènes de turbulence. Dans ce but, ils utilisent le concept « d'attracteur étrange », objet mathématique abstrait qui n'avait été visualisé que par les ordinateurs. Or le premier attracteur étrange d'origine expérimentale vient d'être très récemment mis en évidence dans la réaction de Belousov-Zhabotinski par une équipe du Centre de Recherche Paul Pascal à Bordeaux.

Ainsi, l'avancement de la connaissance réclame-t-il, de plus en plus, l'union et la collaboration des scientifiques de toutes disciplines. Musicien amateur, je me plais souvent à faire l'analogie entre un orchestre et la collaboration d'équipes de recherche de diverses disciplines. Chaque type d'instrument représente une équipe plus spécialisée dans un domaine particulier ; le langage de tous les instruments est la musique, mais chaque instrument conserve sa spécificité de timbre, de même que chaque équipe de recherche joue de ses compétences particulières. Les chefs de ces équipes sont les homologues du violon solo, de la flûte solo,... qui tour à tour tiennent le devant de la scène. Pour être un grand chef d'orchestre, il faut bien connaître les possibilités de chaque instrument sans qu'il soit nécessaire de savoir jouer de tous. De même, les chefs d'orchestre de la science doivent posséder toujours davantage une large culture scientifique. Je n'ai pas cette prétention et je me contenterai, pour ma part, de la taille d'un octuor.

Comment enseigner la physico-chimie

Selon la coutume, je dois vous exposer maintenant quelle est ma conception d'un enseignement de la physico-chimie devant le rôle primordial qu'elle joue et devant la pluralité de ses implications.

Un tel enseignement doit prendre pour objectif de faire comprendre et assimiler les phénomènes et non pas tendre vers une mémorisation de faits expérimentaux. Le cours ne doit pas se présenter comme un catalogue de propriétés physiques des composés minéraux et organiques, et des réactions possibles entre eux. Un tel enseignement de type encyclopédique, nécessairement superficiel, impose un effort de mémoire sclérosant au détriment de la capacité à interpréter ou prévoir des situations nouvelles. Au contraire, l'accent doit être mis sur les connaissances de base, c'est-à-dire l'atomistique, la thermodynamique chimique et la cinétique chimique. Le Professeur Henri Wahl, à qui j'ai l'honneur de succéder, avait parfaitement compris cette nécessité : il désignait ces trois branches « les trois volets du tryptique fondamental ».

D'abord **l'atomistique,** science de la structure des atomes et des molécules, est la base conceptuelle de la chimie, base devenue complète à l'avènement de la mécanique quantique. Il ne faut pas, pour autant, alourdir la présentation par des développements compliqués, mais faire « sentir » les concepts. Il est évidemment nécessaire d'insister sur la nature des liaisons entre atomes, sans oublier les liaisons intermoléculaires qui interviennent de façon prépondérante dans de nombreux phénomènes ; ces liaisons permettent notamment d'expliquer la viscosité des fluides, le comportement exceptionnel de l'eau, la structure en hélice des protéines,...

La **thermodynamique chimique** joue un rôle essentiel en cette époque de crise de l'énergie : j'ai évoqué tout-à-l'heure les problèmes de combustion. Mais la thermodynamique est sous-jacente dans presque tous les autres exemples que j'ai mentionnés. Elle est plus qu'une discipline, elle est un « mode de pensée », comme le dit le professeur Uebersfeld. Bien que la thermodynamique se contente d'établir des relations entre grandeurs macroscopiques, il est bon de sensibiliser l'auditeur aux aspects microscopiques : cela implique des raisonnements statistiques qui sont à la base de la thermodynamique statistique. Par ailleurs, la thermodynamique permet de prévoir le sens de l'évolution des phénomènes et, en particulier, le sens des réactions chimiques ; mais le terme « dynamique » conserve ici le sens originel du mot grec « δυναμις » qui veut dire force, puissance mais non mouvement. La thermodynamique n'apporte en effet aucune information sur la vitesse d'évolution des phénomènes.

C'est **la cinétique chimique** qui fait intervenir l'aspect temporel. Il convient de mettre à part la cinétique formelle qui se contente de modéliser les évolutions et pourra ainsi s'appliquer également aux réactions enzymatiques et même à l'évolution de la concentration de drogues ou d'alcool dans le sang. Mais la vitesse des réactions n'est bien comprise qu'à travers la cinétique moléculaire qui tient compte du caractère individuel des molécules.

La thermodynamique et la cinétique ne doivent pas être présentées comme des disciplines totalement distinctes. En effet la cinétique s'inspire largement des concepts de la thermodynamique : enthalpie et entropie d'activation, équilibre entre réactifs et complexes activés sont autant de notions issues de la thermodynamique. Thermodynamique chimique et cinétique chimique constituent ensemble les bases de ce que l'on entend par « réactivité chimique ». Les conditions optimales des synthèses industrielles s'en déduisent directement. Enfin, sans vouloir être trop ambitieux, il me paraît possible d'évoquer quelques notions très élémentaires de la « thermodynamique des processus irréversibles » qui constitue le trait d'union entre la thermodynamique et la cinétique. La relation entre affinité chimique et vitesse de réaction en est la meilleure illustration.

D'une manière générale, le cours ne doit pas rester au niveau de l'enseignement d'une science abstraite. Contrairement à une attitude trop souvent rencontrée, surtout en France, il est

souhaitable de partir de cas concrets et de remonter aux phénomènes généraux. Ces cas concrets sont à prendre dans les applications industrielles et dans la vie quotidienne. Prenons quelques exemples en thermodynamique chimique.
Le phénomène d'osmose doit être illustré par son application au dessalement de l'eau de mer par osmose inverse, à la concentration des vaccins. A propos de la solubilité des gaz, il faut non seulement mentionner la simple application aux bouteilles de boisson gazeuse, mais aussi ouvrir l'esprit des auditeurs en disant quelques mots sur le mécanisme de l'anesthésie et l'ivresse des grandes profondeurs qui est due, vous le savez, à l'effet narcotique de l'azote qui se dissout dans les membranes des nerfs.

En résumé, l'enseignement doit avoir un triple objectif : la compréhension des phénomènes, l'assimilation des notions essentielles à travers des cas concrets et l'acquisition du sens des ordres de grandeur.

Cet enseignement de chimie générale constitue la préparation à ceux de chimie plus spécialisés : électrochimie, chimie organique, chimie industrielle, sans oublier la biochimie et la biologie industrielles et agroalimentaires. Après mon exposé, vous ne serez pas surpris que cet enseignement intervienne également, mais insuffisamment à mon avis, dans celui de la physique et dans celui des matériaux industriels. Enfin, un lien étroit doit, à l'évidence, se nouer avec l'enseignement des méthodes physico-chimiques d'analyse.

*

C'est pour moi un grand honneur d'être le huitième titulaire de cette Chaire de chimie générale au passé prestigieux, comptant, avec celles de mécanique et d'économie industrielle, parmi les trois premières chaires créées par l'ordonnance royale de 1819. C'est un honneur redoutable de succéder à tant de professeurs et savants illustres :
1819, Nicolas Clément-Desormes, dont le nom est associé à la fabrication de l'acide sulfurique.
1842, Eugène Melchior Peligot, le premier à avoir obtenu l'uranium à l'état métallique. Nommé à 31 ans, il occupa la chaire pendant 48 ans.
1890, Émile Jungfleisch.
1908, André Job, dont les travaux concernant les mécanismes réactionnels sont d'une originalité exceptionnelle.
1929, René Dubrisay.
1940, Paul Mondain-Monval.
1961, Henri Wahl,
à qui je voudrais rendre hommage plus particulièrement. Ses travaux dans le domaine des matières colorantes lui ont valu une grande notoriété dans les milieux scientifiques et industriels. Parmi les nombreuses fonctions qu'il a occupées, je me bornerai à rappeler qu'il fut Directeur de l'École Nationale Supérieure des Industries Chimiques, Président de la Fédération Internationale des Associations de Chimistes du Textile et de la Couleur, Président de l'Union des Professeurs et Vice-Président du Conseil d'Administration de cette Grande Maison.

Ma joie d'entrer au Conservatoire des Arts et Métiers est très profonde. J'y ai trouvé, auprès de mes collègues, un accueil chaleureux dont je tiens à les remercier.

Je suis particulièrement sensible au caractère pluridisciplinaire tout-à-fait exceptionnel de cet Établissement. Par les méthodes de pensée, les modes de raisonnement scientifiques, économiques, juridiques, le Conservatoire des Arts et Métiers constitue un lieu d'excellence pour aborder les problèmes du mode industriel, problèmes non seulement techniques, mais aussi économiques et humains. La grande diversité des disciplines est un atout majeur pour le développement d'un enseignement qui harmonise connaissance, culture et ouverture d'esprit.

Je terminerai en reprenant l'expression du philosophe Robert Escarpit : *je suis « habité par cette soif de la recherche qui est à la fois curiosité, impatience et amour. Mais cette immodestie intellectuelle n'a de sens humain que si elle est doublée de l'humble passion d'enseigner, et d'enseigner au plus grand nombre ».*

Règles de nomenclature pour la chimie organique

(Sections A, B et C)

Adaptation française des règles élaborées par la Commission de nomenclature en chimie organique de l'Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée.

Section A : Hydrocarbures.

Section B : Systèmes hétérocycliques.

Section C : Groupes caractéristiques contenant des atomes de carbone, d'hydrogène, d'oxygène, d'azote, d'halogènes, de soufre, de sélénium et de tellure.

Un livre de 320 pages édité par la Société Chimique de France.

Membres de la S.C.F. : 60 F.
Non membres de la S.C.F. : 120 F.

Une commande, pour être agréée, devra être accompagnée du règlement correspondant, sous forme de chèque bancaire ou de chèque postal (280-28 Paris W), à l'ordre de la Société Chimique de France.

Pour faciliter la tâche de la Trésorerie, éviter, si possible, la demande d'une facture.