



Christian Amatore



Jacqueline Belloni



Bernadette Besnaude-Vincent

# Comment je suis devenu Chimiste

SOUS LA DIRECTION DE  
RICHARD-EMMANUEL EASTES  
ET EDOUARD KLEINPETER



Yves Chauvin



Olivier Homolle



Jacques Kheliff



Armand Lattes



Jean-Marie Lehn



Jacques Livage



Andrée Marquet



Didier Roux



Hervé This

Le Cavalier Bleu  
EDITIONS

**Richard-Emmanuel Eastes** est agrégé de chimie, enseignant-chercheur au Département d'études cognitives de l'École normale supérieure, en charge du programme « Éducation-Valorisation-Éthique ». Il y enseigne la communication scientifique, les processus d'apprentissage et l'analyse des relations nature-science-société au sein du groupe TRACES. Il est membre du bureau national de la Commission chimie et société et fondateur de plusieurs associations de vulgarisation scientifique, telles que « Les Atomes Crochus » dont il assure la présidence.

**Édouard Kleinpeter** est ingénieur de formation, journaliste scientifique et doctorant en philosophie des sciences à l'Institut d'histoire et philosophie des sciences et techniques (université Paris-I).

## Sommaire

<i>Préface de Bernard Bigot</i>	5
Introduction	9
1. Christian Amatore	17
2. Jacqueline Belloni	35
3. Bernadette Bensaude-Vincent	51
4. Yves Chauvin	65
5. Olivier Homolle	79
6. Jacques Kheliff	93
7. Armand Lattes	109
<b>8. Jean-Marie Lehn (cf. extrait)</b>	<b>125</b>
9. Jacques Livage	141
10. Andrée Marquet	155
11. Didier Roux	169
12. Hervé This	185
Annexes	
Glossaire	202
Cahier pratique	204
(les formations, les métiers, les secteurs, les adresses et les sites utiles, à lire ou à consulter)	

# Introduction

En tant qu'exploitation raisonnée des propriétés de la matière, on peut faire remonter à la nuit des temps l'activité que l'on nomme aujourd'hui « chimie ». Décrire la découverte du feu comme la « maîtrise de la combustion de matières organiques naturelles dans l'oxygène de l'air » pourrait en effet presque permettre de la considérer comme le premier acte chimique de la préhistoire. L'utilisation du terme « chimie » pour caractériser les âges du cuivre, du bronze puis du fer lors de la protohistoire, dès 2300 av. J.-C., est moins discutable encore. De même, les pratiques culinaires ou phytothérapeutiques, les procédés de récolte du sel marin ou de synthèse des alliages, ont de tout temps fait appel à des opérations que l'on qualifie aujourd'hui de « chimiques ». Pour autant, point encore de chimie en tant que telle, et encore moins de chimiste. Comment l'homme moderne est-il donc devenu chimiste ?

Avant d'être chimiste, l'artisan de la matière a commencé par être alchimiste. Tirée de l'arabe *al kemi*, l'alchimie s'est développée au cours des siècles par la poursuite d'objectifs plus ou moins ésotériques, liés à l'étude spirituelle de la matière et de ses transformations. Apparue dans l'Égypte hellénistique des Ptolémées entre -100 et 300, elle s'est ensuite développée dans le monde arabe puis européen durant le Moyen Âge et jusqu'à la Renaissance, avant de décliner vers la fin du xvii<sup>e</sup> siècle, mais sans toutefois disparaître totalement. Difficile à distinguer de la chimie jusqu'au xviii<sup>e</sup> siècle, l'alchimie est généralement considérée comme étant à l'origine de la chimie moderne. L'un de

ses objectifs était le « grand œuvre », c'est-à-dire la réalisation de la pierre philosophale permettant la transmutation des métaux, et notamment des métaux nobles : l'or et l'argent. Au-delà de la richesse matérielle, l'alchimiste recherchait également la santé à travers la panacée (médecine universelle) et la prolongation de la vie via l'« élixir de longue vie ». Des buts et des techniques qui préfiguraient donc bien ceux et celles de la chimie, mais une objectivité malheureusement dévoyée, à une période où science et religion ne s'étaient pas encore séparées, par une quête spirituelle et une fascination aveugle pour les phénomènes observés. Une fascination bien compréhensible d'ailleurs, que tout chimiste ressent encore de nos jours au contact du mercure liquide (le « vif-argent » des alchimistes) ou lors de l'observation de la cristallisation des solutions.

Le métier de chimiste est donc apparu véritablement plus tard, avec le développement de la chimie en tant que discipline scientifique, avec ses règles, ses méthodes et son organisation, et notamment sous l'impulsion extraordinaire de l'industrie chimique au XIX<sup>e</sup> siècle. S'il faut en dater l'apparition, on considère généralement que c'est à Robert Boyle qu'il convient d'attribuer le titre de « premier chimiste moderne ». En 1661, il publie en effet *The Sceptical Chymist*, un traité faisant la distinction entre la chimie et l'alchimie, contenant les plus anciennes versions modernes des notions d'atome, de molécule et de réaction chimique et marquant ainsi le début de l'histoire de la chimie moderne, un siècle avant les apports d'Antoine Laurent de Lavoisier.

De nos jours, compte tenu de la diversité des pratiques, il est difficile de tracer une frontière stricte entre les chimistes et les non-chimistes. Certes le docteur en chimie, l'ingénieur de l'industrie chimique, le professeur de chimie organique sont chimistes. Mais beaucoup de chimistes sont également physiciens, biologistes ou informaticiens. Nombreux sont ceux en outre, pharmaciens ou adeptes des médecines parallèles, qui n'ont pas obtenu de titre universitaire en chimie, mais n'en exploitent pas moins les connaissances et les techniques. Même un prix Nobel de chimie, comme nous l'apprendra Yves Chauvin dans le cours

de l'ouvrage, aura pu toute sa vie se passer de soutenir une thèse de doctorat. Mis à part l'exemple du Québec, où l'utilisation du titre de chimiste est protégée par la loi sur les chimistes professionnels et où tous les utilisateurs de ce titre doivent obligatoirement faire partie de l'ordre des chimistes du Québec s'ils veulent avoir le droit d'en faire usage, cerner le métier de chimiste ne pourra se faire sans laisser quelques-uns d'entre eux à l'extérieur de la définition. Aussi et finalement, sans pour autant verser dans le relativisme, peut-être devra-t-on opter pour une définition sociologique du chimiste, dans le cadre de laquelle serait chimiste tout individu qui se déclarerait comme tel, et dont les « autres chimistes » accepteraient l'idée qu'il le soit, en validant par exemple une de ses publications dans une revue à comité de lecture.

Mais alors, qui est donc le chimiste d'aujourd'hui ? En tant que praticien de la chimie, il est tout d'abord celui qui étudie, modélise, prévoit et exploite la structure, les propriétés et les transformations de la matière, qu'elle soit inerte ou vivante, minérale ou organique, naturelle ou synthétique. Si les objets qu'il convoite n'existent pas dans la nature, il modifie ceux qu'il connaît ou en crée de toutes pièces. Technicien de laboratoire, chercheur fondamental, enseignant, ingénieur de la chimie fine ou ouvrier spécialisé de l'industrie des matières premières, il participe à une œuvre créatrice globale qui contribue à la majeure partie des progrès technologiques réalisés par l'humanité. « Une science centrale », aime-t-il dire pour qualifier sa discipline.

Cette chimie doit sa puissance à la robustesse de ses concepts et de ses théories, de ses méthodes et de ses démarches, de l'organisation de sa communauté et de la validation des connaissances qu'elle produit, bref, à tout ce qui fait d'une pratique, une science. À ce titre, le chimiste d'aujourd'hui est avant tout un scientifique (Christian Amatore) ; ses parcours de formation traversent donc inévitablement les mathématiques, la physique, la biologie, l'informatique, l'anglais... pour faire de lui, sans que cela ne dilue l'identité véritable de la discipline, un scientifique des plus interdisciplinaires.

Mais la science d'aujourd'hui n'est plus seulement affaire de connaissances académiques et de pratiques. Car après avoir contribué à éradiquer les plus grands fléaux et à accomplir les prouesses technologiques les plus folles, elle a pu également se trouver impliquée dans l'émergence de nouvelles formes de catastrophes, ou plus simplement dans la génération de nouvelles peurs. Armes de guerre, interrogations éthiques, impacts environnementaux, pollutions et santé publique, création de connaissances et de techniques sensibles au regard des valeurs des citoyens, diffusion d'objets technologiques affectant de manière forte et durable les modes de vie... autant d'enjeux que la science en général, et la chimie en particulier, ne peut plus éluder.

Ainsi, au-delà de la maîtrise des fondements théoriques de la chimie, de ses représentations, de ses grandes réactions, de ses techniques, de ses procédés industriels, de ses applications majeures et de ses perspectives de développement, le chimiste doit désormais également se préoccuper de ses fondements philosophiques et de son histoire (Bernadette Bensaude-Vincent), de ses paradigmes et de ses révolutions conceptuelles, de ses écueils pédagogiques (Hervé This), de ses intrications sociales et économiques (Jacques Khelif, Olivier Homolle), ou encore de son rôle en tant qu'acteur du développement durable (Armand Lattes, Didier Roux)...

De ce point de vue, le chimiste est logé à la même enseigne que le physicien des particules, le généticien ou le cognitiviste. Mieux, ces exigences le stimulent. Certain de représenter une science positive, créatrice de produits, omniprésente, utile et réparatrice, passionné par sa discipline qu'il juge incomprise, conscient du caractère démiurgique de la synthèse chimique (Jacques Livage), fier de la dimension artistique de l'expression de sa créativité (Jean-Marie Lehn), il n'a de cesse de communiquer autour des bienfaits et des qualités de la chimie (Hervé This). Il en invente même de nouvelles formes, destinées à apporter des solutions aux questions que lui envoie la société, telles la « chimie verte » ou la « chimie pour un développement durable » (Armand Lattes). Et pourtant. Nul ne peut ignorer la prégnance, chez le chimiste, d'une certaine mélancolie accompagnant ce bouillant enthousiasme.

Le chimiste se sent mal aimé. Il déplore en premier lieu que l'aridité des enseignements fondamentaux de la chimie fasse de lui un personnage austère et inaccessible. Il récusé alors avec d'autant plus de force les images que les fictions donnent parfois de son métier lorsqu'elles le cantonnent malicieusement, seul et hystérique, dans un laboratoire poussiéreux, encombré et fumant. La représentation littéraire du chimiste dans de nombreuses œuvres est en effet très différente de la réalité : considéré comme un savant venu d'ailleurs et qui vit hors du temps, entre sorcier et alchimiste, rivalisant avec la nature, il joue avec des forces obscures qu'il ne maîtrise pas toujours. C'est pourquoi, conscient des potentialités destructrices des résultats de ses recherches, entre armes chimiques et dopage, pesticides et éthers de glycol, le vrai chimiste ne peut s'empêcher de s'interroger sur ses responsabilités propres, même s'il défend sa probité en déclinant sa responsabilité quant aux usages qui sont faits de ses découvertes.

Mais le chimiste doit également lutter sur d'autres fronts, liés aux circonstances du développement historique récent de sa discipline. Science appliquée par excellence, la chimie a le malheur de porter un nom partagé à la fois par son champ disciplinaire et par l'ensemble des industries qui en dérivent. En devenant appliquées, l'électronique et l'informatique deviennent nouvelles technologies, la physique quantique et les mathématiques deviennent cryptographie, la physiologie et les sciences cognitives deviennent médecine, la physique des matériaux et la mécanique des fluides deviennent Ponts et Chaussées... Mais la chimie reste chimie. Difficile alors, en tant que chimiste, de ne pas endosser la responsabilité de Bhopal ou d'AZF, de se défausser de l'ypérite de Fritz Haber et surtout, de se dire que l'usage à tout va de l'expression « pollution chimique » ne va pas décrédibiliser l'objet de sa passion, la chimie.

Car même le terme chimique souffre de cette ambiguïté. Est qualifié de chimique, bien sûr, ce qui est produit par la chimie. La molécule est un concept chimique, les antitumoraux sont obtenus par synthèse chimique et l'industrie, comme nous l'avons vu, porte le même qualificatif. Mais le chimiste n'est pas que producteur de nouvelles substances et de nouveaux concepts.

Une large branche de son activité consiste à analyser, à mesurer, à identifier. Et lorsqu'il analyse le panache d'un volcan, la troposphère au-dessus des rizières ou l'air des villes, il y trouve dioxyde de soufre, méthane et ozone. Autant de « pollutions chimiques » qu'il n'est pourtant pas allé placer lui-même... Bien plus, en transgressant régulièrement la frontière entre les catégories rassurantes du naturel et du synthétique, en reproduisant artificiellement des substances naturelles ou en injectant des molécules de synthèse dans l'environnement, le chimiste se heurte malgré lui à des valeurs solidement ancrées dans la société, et de plus en plus naturalistes.

Il semblerait en outre que le chimiste doive également et continuellement défendre sa place au sein des autres sciences. Discipline de services par excellence, fournisseur de concepts, de matériaux et d'analyses pour toutes les autres sciences, la chimie croit devoir lutter à la fois contre le rétrécissement de son champ de compétences et contre l'appropriation de ses sous-domaines par les autres (Didier Roux). Mais les pratiques expérimentales spécifiques du chimiste, son champ d'expertise irréductible qu'est la molécule, ses concepts et son langage, sa manière d'approcher le monde, entre rigueur mathématique et intuition phénoménologique (Christian Amatore), fondent sa résistance à ces pressions et devraient lui faire oublier ses craintes : il est bien le représentant d'une discipline scientifique spécifique.

Le portrait que nous dressons de la profession doit-il être considéré comme négatif ? Le chimiste est-il dépressif et son avenir aussi sombre ? Assurément non, à voir l'enthousiasme, la vivacité et la passion des douze personnalités que nous avons interviewées, leur impatience face aux développements futurs de la chimie, sinon leur regret de ne pouvoir y participer (Jacqueline Belloni). Tous considèrent les défis lancés à la chimie comme de formidables moteurs d'innovation, comme des incitations à faire toujours mieux, autant sur les plans de la science que de la communication, voire de la communion, avec la société (Olivier Homolle). À ce titre, le métier de chimiste demeure noble et séduisant.

Certes les perspectives d'emploi ne sont plus celles que ces chimistes accomplis décrivent, et ni l'industrie française, ni le CNRS n'embauchent plus de la même manière qu'il y a trente ans. Certes le métier de chimiste contemporain n'a plus guère à voir avec l'activité aventureuse de la chimie artisanale du *Système périodique* de Primo Levi. Certes le chimiste se sent parfois mal aimé, mais cette impression, surtout confortée par des impressions partagées entre collègues, dépasse probablement largement la réalité. Sans doute vit-il encore un peu dans la nostalgie d'un âge d'or où rien ne venait contester ou même discuter les progrès de la chimie. Mais le monde a changé et, pour être plus complexes, les relations entre chimie et société n'en sont pas moins passionnantes à décrypter, si ce n'est à inventer (Andrée Marquet).

La condition du chimiste moderne l'oblige donc à une perpétuelle remise en question, source d'inquiétudes qui le poussent parfois dans des retranchements par trop défensifs et corporatistes, voire prosélytes. Mais ces affres sont dans le même temps extraordinairement stimulantes, obligeant toute une communauté à justifier, pour elle-même et pour le reste de la société, une activité en mutation perpétuelle ; à comprendre et à faire comprendre l'essence et la nature de ses pratiques ; à réévaluer continuellement la place du chimiste dans la société et dans l'ensemble de la communauté scientifique.

L'avenir est ouvert, sur des bases renouvelées incluant autant d'éthique que de philosophie et de pédagogie. Comptons sur les futures générations pour en prendre conscience. Cet ouvrage est là pour les y inciter, et douze figures marquantes de la discipline leur montrent la voie vers la chimie du futur, dont elles ont commencé à esquisser les contours.

**Richard-Emmanuel Eastes**

Treffort-Cuisiat, le 14 juillet 2008.

8.

## Jean-Marie Lehn



**L**auréat du prix Nobel de chimie en 1987 et professeur au Collège de France, il est probablement le chimiste français le plus respecté par ses pairs aujourd'hui. Ses travaux sur les « molécules cages » ont abouti au concept de chimie supramoléculaire, véritable révolution dans la manière de comprendre et d'appréhender les réactions et les édifices chimiques.

**1939***Naissance à Rosheim***1963***Soutenance de thèse sur l'analyse conformationnelle des triterpènes***1963-1964***Postdoctorat à l'université Harvard (États-Unis)***1970-1979***Professeur de chimie à l'université Louis Pasteur de Strasbourg***1978***Première utilisation du terme de « chimie supramoléculaire »***Depuis 1979***Professeur de chimie des interactions moléculaires au Collège de France***1987***Prix Nobel de chimie***1996***Commandeur de l'ordre de la Légion d'honneur*

## La vocation

« Ma vocation – terme qui a une connotation trop religieuse à mon goût – n'est pas apparue soudainement, mais s'est développée de façon graduelle au cours de ma scolarité. En effet, lors de mes études secondaires, je ne me destinai pas à la chimie, mais à la philosophie et cet intérêt initial n'est pas étranger à la vision de la chimie que j'ai développée par la suite. Deux raisons principales me poussaient vers les études littéraires. J'ai été fasciné et tout d'abord perturbé par la lecture, alors que j'étais en classe de seconde au collège d'Obernai, de *l'Introduction à la psychanalyse* de Freud qui heurtait bon nombre de mes convictions et croyances. Ensuite, et surtout, de longues discussions avec un de mes amis en classe de philosophie, en compagnie duquel je me rendais au collège en bicyclette, m'ont convaincu de la profondeur du questionnement philosophique. Arrivé en terminale philo, je n'avais donc pas fait beaucoup de sciences. Cependant, nous suivions un cours de chimie et, déjà, je ressentais et appréciais l'ordonnement et la régularité qui s'en dégageaient.

J'ai alors commencé à l'étudier à travers l'ouvrage de chimie destiné aux terminales scientifiques. Et à la fin de l'année, j'ai passé deux baccalauréats, le premier en philosophie et le second en sciences expérimentales, afin de préserver un maximum de possibilités quant au choix de mes études supérieures. À la faculté des sciences de l'université de Strasbourg, tout en conservant mon ambition initiale, à savoir de revenir vers la philosophie, je décidais d'effectuer une première année en sciences physiques, chimiques et naturelles (SPCN) pour approfondir mes connaissances scientifiques. C'est là que mon intérêt pour la chimie s'est révélé. En effet, je constatais que les produits chimiques pouvaient être répartis en classes déterminées caractérisant leurs propriétés, qui s'exprimaient de façon particulière dans les divers produits d'une même classe. Cela se rapproche, métaphoriquement, de la médecine où une maladie peut être identifiée à un ensemble de symptômes caractéristiques, mais s'exprime différemment pour chaque individu particulier. C'est probablement cette dualité entre cohérence de classe et singularité d'expression qui m'a tout d'abord séduit dans la chimie. Il m'apparaissait de plus en plus que, si la philosophie traite des

grandes interrogations humaines, il lui manque cette capacité de "contrôle" de ses résultats que je retrouvais en sciences. Certes, me disais-je, les questions soulevées par les chimistes sont moins ambitieuses que celles des philosophes, mais ils disposent d'un moyen de vérification de la validité des réponses qu'ils y apportent.

Par ailleurs, parmi les philosophes, j'ai toujours préféré ceux qui, comme Kant par exemple, cherchaient à édifier des systèmes logiques du monde. Cette recherche de cohérence déductive de la pensée est à mon sens ce qui fonde la science. Elle s'exprime particulièrement dans la chimie, contrairement à ce qu'affirment ceux qui ne l'ont jamais étudiée. Cet aspect s'est

L'EXALTATION QUI NAÎT  
LORSQU'ON PARVIENT  
À FABRIQUER UN  
OBJET NOUVEAU  
RAPPROCHE LE CHIMISTE  
DU SCULPTEUR OU DU  
PEINTRE QUI RÉALISE  
UNE ŒUVRE D'ART.

révélé à moi pendant l'année de propédeutique en SPCN, soit la première année d'études supérieures après le baccalauréat. Avec un ami, en effet, nous effectuions régulièrement des expériences de chimie au domicile de nos parents respectifs à partir de produits achetés chez le droguiste. À l'époque, nous aurions notamment pu nous procurer sans difficulté, par exemple, de l'acide nitrique et du glycérol, ce qui nous aurait permis de fabriquer de la nitroglycérine ! Ces manipulations de chimiste en herbe me montraient, à nouveau, la logique sous-jacente qui fait que, quand on mélange deux substances, on peut prévoir quel produit on va obtenir. De surcroît, si on ne l'obtient pas, on sait qu'on a fait une erreur quelque part. J'ai également compris lors de ces expériences que la chimie possède une part créatrice, artistique. L'exaltation qui naît lorsqu'on parvient à fabriquer un objet nouveau rapproche, à mon sens, le chimiste du sculpteur ou du peintre qui réalise une œuvre d'art. »

révélé à moi pendant l'année de propédeutique en SPCN, soit la première année d'études supérieures après le baccalauréat. Avec un ami, en effet, nous effectuions régulièrement des expériences de chimie au domicile de nos parents respectifs à partir de produits achetés chez le droguiste. À l'époque, nous aurions notamment pu nous procurer sans

## Le cursus

« Au collège, sans être mauvais élève, je n'étais pas considéré comme brillant, du moins dans les premières années. À tel point que, à la fin de la sixième, alors que je suivais la filière dite "classique" où l'on enseignait le latin et où se concentraient en général les bons éléments, mes professeurs m'ont menacé de me faire passer en filière dite "moderne" ! Je me suis éveillé progressivement, stimulé par cette joute avec les idées que constitue la philosophie et par mes discussions à bicyclette avec cet ami Claude Koenig qui fut, je m'en rends compte aujourd'hui, quelqu'un de très important pour moi.

Après mes années de collège, j'ai intégré l'université de Strasbourg où j'ai suivi l'enseignement de chimie organique de Guy Ourisson (1926-2006), un très grand chimiste apprécié de tous, qui allait par la suite devenir mon directeur de thèse. À l'université, je ne me suis pas cantonné à étudier la chimie et me suis intéressé à la fois à la biochimie et à l'optique physique, deux disciplines qui m'ont beaucoup apporté dans ma carrière.

En 1960, j'entrais donc à l'Institut de chimie de Strasbourg pour effectuer ma thèse sous la direction de Guy Ourisson. Ce dernier venait d'obtenir les crédits pour acheter un appareil d'analyse par résonance magnétique nucléaire (RMN) et il me mit immédiatement en charge de le faire fonctionner. Cela fait sourire aujourd'hui, mais il était si complexe qu'il me fallait souvent plusieurs heures pour simplement le régler. Toutefois, de par la rareté de ce type de machine, j'ai eu la chance de collaborer avec des chimistes du monde entier qui nous envoyaient leurs échantillons à des fins d'analyses et j'ai ainsi pu participer à un grand nombre de publications. J'aimais en particulier le côté "Sherlock Holmes" de l'analyse par RMN, où le "détective" doit, à partir d'indices révélés par l'appareil (le spectre RMN), tenter de remonter la piste jusqu'à la détermination de la structure de la molécule analysée.

À l'époque, lorsqu'on effectuait une thèse, il fallait présenter en plus une "deuxième thèse", sous forme d'un petit mémoire sur un autre sujet afin de montrer qu'on était capable de comprendre autre chose. Sans doute un peu par défi intellectuel

et parce que c'était en lien direct avec la RMN, je me suis intéressé à la théorie des interactions spin-spin, un thème impliquant la mécanique quantique, pourtant assez étranger aux préoccupations habituelles des chimistes.

J'ai soutenu ma thèse en 1963, soit deux ans et demi environ après l'avoir commencée, ce qui, même à l'époque, était très rare ; mais j'étais passionné et travaillais avec acharnement. Suite à cela, et grâce aux recommandations de Guy Ourisson, je suis parti effectuer un postdoctorat à Harvard sous la direction de Robert Woodward (1917-1979), sans doute le plus grand chimiste de synthèse de l'époque. J'ai notamment apporté ma petite contribution au grand œuvre de la synthèse de la vitamine B12 qui, aujourd'hui encore, est considérée comme un moment clé dans l'évolution de la synthèse organique. Harvard a par ailleurs ceci de particulier qu'on peut très facilement y étudier d'autres disciplines que celle pour laquelle on y est entré. J'ai ainsi suivi les cours de mécanique quantique et me suis initié aux calculs de chimie théorique sur ordinateur, notamment avec mon ami Roald Hoffmann, auteur avec Woodward de leurs fameuses règles qui régissent la sélectivité de toute une classe de réactions dites "électrocycliques", dont certaines sont des étapes fondamentales dans de nombreuses synthèses.

En 1964, j'ai quitté Harvard pour revenir à Strasbourg. Pour créer mon laboratoire, je cherchais des thèmes de recherche différents de ceux pratiqués avec Ourisson et Woodward. Je me suis alors penché sur un problème qu'un de mes amis m'avait soumis durant ma thèse et auquel je réfléchissais depuis. Le spectre RMN de l'ion tétraéthylammonium lui semblait étrange car il présentait des pics démultipliés à des endroits où on ne les attendait pas. J'ai fini par comprendre que cela était dû à un couplage spin-spin particulier, observable du fait de la symétrie du champ électrique autour de l'atome d'azote 14. J'ai donc décidé de m'éloigner de la chimie organique de synthèse et d'orienter mes recherches vers la chimie physique. C'est alors que, peu à peu, je me suis aperçu que si, comme chacun sait, les principes physiques appliqués à la chimie permettent de comprendre les propriétés et les réactions d'un point de vue fondamental, la réciproque était également vraie. En effet, la chimie, lorsqu'on

la "pousse" vers la physique, peut générer des modèles qui permettent de mettre en évidence certains phénomènes physiques. Il s'en est suivi des études par RMN des mouvements des molécules d'un liquide. Parallèlement, grâce à un programme de chimie théorique, apporté à Strasbourg par un ami et collègue, Alain Veillard, qui avait contribué à sa mise au point par Enrico Clementi chez IBM aux États-Unis, j'ai développé dans mon groupe un thème entièrement théorique de calculs *ab initio* de propriétés structurales et conformationnelles.

En 1966, je fus nommé maître de conférences à l'université de Strasbourg puis, en 1970, professeur sans chaire et professeur titulaire la même année. C'est au cours de cette période que j'ai aussi initié les travaux qui allaient conduire au concept de chimie supramoléculaire (cf. "L'apport à la chimie"), mon principal centre d'intérêt. En 1972 et 1974, je suis retourné à Harvard, chaque fois pendant un semestre, où j'ai donné des cours et dirigé des projets de recherche en tant que "*visiting professor*". J'ai été élu en 1979 à la chaire de chimie des interactions moléculaires au Collège de France, institution au sein de laquelle j'ai dirigé un laboratoire de chimie depuis 1980, à la suite d'Alain Horeau (1909-1992). Depuis lors, je partage mon temps entre Paris et Strasbourg où je dirige le laboratoire de chimie supramoléculaire de l'université Louis Pasteur. »

## L'apport à la chimie

### Des cryptants à la chimie supramoléculaire

De mes premières amours pour la philosophie en général, et pour la philosophie de la connaissance en particulier, me sont restées un grand nombre de questions sur les fondements des capacités cognitives de l'être humain. J'ai donc cherché, et fini par trouver, par quel biais il me serait possible de me rapprocher de l'étude de processus chimiques ayant lieu dans le système nerveux. L'influx nerveux, en effet, est dû à des changements de concentration de petites particules chargées, appelées ions, de part et d'autre des membranes des neurones. Ces échanges nécessitent notamment que ces ions traversent les membranes de manière sélective et ces dernières doivent donc, en un certain

sens, "reconnaître" les ions qu'elles peuvent laisser passer dans un sens ou dans l'autre. Or, les ions impliqués dans ces échanges sont des ions potassium et sodium, dont les tailles sont les mêmes à quelques dixièmes d'angström près. La question que je me suis posée était donc de comprendre comment des molécules présentes dans ces membranes pouvaient faire la différence entre une bille minuscule et une bille de taille à peine différente.

À la même époque, des travaux ont été publiés sur la valinomycine, antibiotique de la famille des cyclopeptides, qui transporte sélectivement les ions potassium à travers les membranes des mitochondries. Pour ce faire, la molécule de valinomycine présente un "creux" dans sa structure, qui lui permet de capturer les ions. En 1966, j'ai essayé d'imaginer des molécules synthétiques qui présenteraient les mêmes propriétés car les cyclopeptides sont des produits sensibles et inadaptés à une utilisation chimique en laboratoire. C'est ainsi qu'est née l'idée des cryptants, sortes de "molécules cages" qui présentent elles aussi une cavité, mais une cavité tridimensionnelle qui peut être "taillée" sur mesure pour accueillir toutes sortes d'entités plus petites. La synthèse du tout premier cryptant a été réalisée au laboratoire par deux chercheurs en cours de thèse, Jean-Pierre Sauvage et Bernard Dietrich en octobre 1968, et la première publication à ce sujet est parue en 1969.

La philosophie, là encore, m'a aidé à saisir le concept derrière le fait et, par une démarche de généralisation et de systématisation, nos travaux ont conduit à caractériser précisément le processus sous-jacent : la reconnaissance moléculaire. Un cryptant donné, en effet, ne peut capturer au sein de sa cavité que le type d'entité qui lui est complémentaire, qui s'ajuste un peu comme une clé qui ne correspond qu'à une seule serrure, suivant l'image introduite en 1894 par Emil Fischer. Par ailleurs, le type d'interaction qui lie cette clé à sa serrure n'est pas de la même nature que celle, dite "covalente", qui lie les atomes entre eux dans une molécule. On dit que la liaison est non-covalente, c'est-à-dire qu'elle ne met pas en jeu d'échanges d'électrons entre atomes mais qu'elle fait intervenir d'une part des correspondances géométriques et, d'autre part, des méca-

nismes électrostatiques. Dès lors, puisqu'on étudie ici des ensembles formés de plusieurs espèces, molécules ou ions, en interaction, cela nous amène à envisager la chimie, non plus à l'échelle atomique ou moléculaire, mais à une échelle supérieure, se situant par-delà la molécule. C'est pour quoi j'ai proposé d'appeler cette nouvelle discipline la "chimie supramoléculaire" et j'ai utilisé ce terme pour la première fois en 1978 dans deux articles. S'il a fallu quelques années avant que la communauté des chimistes ne l'adopte, il est aujourd'hui utilisé par tous et devenu classique.

Les recherches dans ce domaine nouveau ont alors suivi de nombreuses directions. Dans une première phase, elles ont concerné principalement les trois fonctions de base des espèces supramoléculaires : la reconnaissance moléculaire, la réactivité et les processus de transport. En particulier, ces derniers concernent les phénomènes du type de ceux qui permettent aux ions de traverser les membranes cellulaires. Il s'agissait en effet de comprendre comment une molécule pouvait successivement reconnaître le bon ion, le capturer, le transporter à travers la membrane puis le relâcher à l'intérieur de la cellule.

L'annonce du prix Nobel en 1987 a été une grande satisfaction et une grande joie pour moi-même et pour tous ceux qui avaient contribué au travail ainsi reconnu. Ce prix a bien sûr facilité la suite, mais il l'a également compliquée, vu le nombre de sollicitations diverses et variées dont il s'est accompagné. Quand affluent les appels téléphoniques et quand se pressent les quêtés d'entretiens, on peut se prendre à regretter le calme (relatif, il est vrai) du laboratoire. Mais on se fait facilement une raison, car le prix Nobel est chaque année une occasion unique de parler à un large public de cette science qui sans cesse réinvente son objet et se recrée à tout instant, inscrivant dans la matière les fruits de son imagination, comme le sculpteur qui modèle la

CE PRIX NOBEL A BIEN  
SÛR FACILITÉ LA SUITE,  
MAIS IL L'A ÉGALEMENT  
COMPLIQUÉE, VU LE  
NOMBRE DE SOLLICITATIONS  
DIVERSES ET VARIÉES DONT  
IL S'EST ACCOMPAGNÉ.

pierre ou le compositeur qui organise les sons. Et de fait, à partir de 1987, j'ai eu beaucoup plus d'occasions de m'adresser à de plus larges audiences que celle de la communauté scientifique. Pour parler de mes travaux, mais également de la chimie, de ses avancées, de ses applications. En tant que prix Nobel, on devient un peu le porte-parole de sa discipline. Ceci dit, le prix n'a pas modifié mon attitude vis-à-vis de mes recherches, qui ont continué à se développer comme avant. »

### **L'auto-organisation moléculaire**

Vers 1984, l'idée fondatrice de la reconnaissance moléculaire a engendré un concept nouveau : l'auto-organisation. En effet, la reconnaissance repose sur l'ajustement spécifique de groupements moléculaires qui se positionnent d'une certaine façon pour se reconnaître. Dès lors, on comprend que, si on fabrique ces "briques" moléculaires et leurs sites d'interaction de manière à ce qu'ils se reconnaissent, ils vont spontanément s'ajuster d'une manière bien précise. Autrement dit, ils s'auto-organisent.

Les virus, du moins les plus "simples" d'entre eux, constituent un exemple parfait de ce type de structures complexes auto-assemblées. En effet, un virus est constitué de plusieurs grosses molécules qui, lorsqu'elles sont suffisamment proches, se reconnaissent et s'accrochent les unes aux autres d'une seule et unique façon, les différents éléments possédant exactement la bonne forme et les bons sites actifs. On peut alors généraliser et conceptualiser encore davantage en considérant que ces propriétés qui dirigent l'assemblage sont des informations et que, dès lors, si on parvient à stocker l'information adéquate au niveau moléculaire et la lire de façon correcte au niveau supramoléculaire, on peut parvenir à créer les structures que l'on veut, en les laissant "simplement" se fabriquer toutes seules.

Par ailleurs, à l'échelle supramoléculaire, les interactions sont non-covalentes, donc relativement faibles. Ceci implique que les assemblages de molécules soient labiles, c'est-à-dire qu'ils puissent se faire et se défaire assez facilement. La constitution de l'objet est donc dynamique et, par conséquent, il peut s'adapter aux conditions extérieures. Nous travaillons actuellement sur ce même type de systèmes mais, en l'étendant aussi à l'échelle

moléculaire. L'idée est de créer des molécules à partir de fragments, de groupes d'atomes, susceptibles de se connecter par des liaisons covalentes mais résultant de réactions réversibles, donc pouvant aussi se déconnecter. Dès lors, lorsqu'on les met en présence, des molécules "réversibles", donc dynamiques, se forment spontanément. Pour reprendre l'analogie de la clé et de la serrure, nous parvenons ici à faire en sorte que des fragments de clé mis en présence de la serrure se combinent spontanément pour former la bonne clé.

D'une manière plus générale, je pense que l'auto-organisation est le processus le plus crucial que la science devrait étudier en priorité, et la chimie, qui s'étend de la matière inerte à la matière vivante et pensante, a un rôle majeur à jouer dans la compréhension de ce processus de complexification progressive de la matière. Selon moi, la question première n'est pas de savoir si, par exemple, la relativité générale est vraie ou fausse, mais de comprendre comment l'univers a pu engendrer le cerveau d'Albert Einstein qui a été capable de formuler cette théorie. On touche, ici encore, à la philosophie. »

---

### **La chimie dans les pays en voie de développement**

« Je suis depuis quelques années président de l'International Organization for Chemical sciences in Development (IOCD), petite structure constituée de bénévoles qui cherche à aider les chimistes dans les pays en voie de développement. Notre objectif est de les accompagner scientifiquement dans l'élaboration d'outils pratiques utiles à l'ensemble de leur communauté. Nous possédons en effet certains domaines de compétences qui sont de nature à leur venir en aide, comme la chimie des plantes, la chimie médicinale, la biodiversité ou la chimie analytique. Des chimistes membres de l'IOCD se rendent régulièrement dans ces pays et y organisent des réunions et des ateliers. Je me suis notamment rendu à Bamako, au Mali, où j'ai pu constater que, malgré le manque flagrant de moyens, certains scientifiques, avec l'aide financière de fondations, arrivent à effectuer un

travail tout à fait remarquable. De plus, il est essentiel de ne pas les laisser à l'écart des développements de la chimie des pays industrialisés. Même si mes travaux actuels sur l'auto-organisation ont peu de chance de les aider au quotidien, je considère qu'il est de mon devoir de leur en parler. Ce genre d'initiative, aussi modeste soit-elle, est essentiel pour moi car je suis un fervent défenseur de l'idée selon laquelle la science doit bénéficier au plus grand nombre et, en particulier, à ceux qui en ont le plus besoin. »

## Les figures marquantes

« Au moins trois personnes m'ont fortement marqué durant ma jeunesse. Mon père tout d'abord qui, bien que n'ayant pas suivi d'études au-delà du primaire, a su me transmettre sa curiosité sur le monde et son goût pour les expérimentations de toutes sortes. Étant enfant, je me souviens qu'il m'avait émerveillé en réalisant l'électrolyse de l'eau dans notre maison à l'aide d'une vieille bobine de Ruhmkorff. Le second auquel je pense est mon instituteur de primaire, Pierre Charlier, qui nous a poussés à passer en sixième. Il nous gardait après la classe et nous soumettait des problèmes cachetés dans de petites enveloppes fermées avec deux épingles afin que nous ne puissions pas regarder la solution. Il était habité par sa vocation d'enseignant et ne comptait pas ses efforts pour nous transmettre ce qu'il savait. Enfin, le troisième est mon ami Claude Koenig, avec lequel je discutais de philosophie à bicyclette, discussions qui m'ont conduit à lire Freud, Nietzsche, Kant bien avant l'année de terminale philo. Il m'a ainsi ouvert l'esprit aux grandes questions philosophiques et, à lui comme aux deux autres, je dois d'être ce que je suis aujourd'hui. Je leur en suis très reconnaissant.

Guy Ourisson, grâce à son cours enthousiasmant, est celui qui m'a décidé à devenir chimiste plutôt que biochimiste. C'était un homme ouvert, original et brillant qui proposait une vision de la recherche avec laquelle je me sentais totalement en phase. En effet, il accordait beaucoup d'importance à la liberté intellec-

tuelle et dirigeait son laboratoire en privilégiant l'indépendance de chacun. Il faisait peu de cas des rangs hiérarchiques et tous, thésards, chercheurs ou postdocteurs, étaient mis sur un pied d'égalité. Il jugeait les gens sur la valeur de leurs idées, pas sur leur "pedigree" et, pour lui, peu importait que vous soyez issu de l'École normale supérieure ou de l'École polytechnique. Ce mode de gestion "à l'américaine" m'a beaucoup inspiré quand le temps est venu pour moi de créer mon propre laboratoire. Bien sûr, il a eu une influence déterminante sur le développement de la chimie organique en France. Il a notamment mis en place le Groupement d'études sur la chimie organique (GECO) qui, aujourd'hui encore, se réunit chaque année. Il était tout sauf quelqu'un d'unidimensionnel. Il s'intéressait à tout ce qui touchait de près ou de loin aux molécules naturelles ; la chimie de synthèse, bien sûr, mais aussi la culture de tissus végétaux, la géochimie, la pétrochimie ou la formation des membranes cellulaires. En tant que premier président de l'université Louis Pasteur de Strasbourg, il a donné son empreinte à cette université. Il a aussi créé la Fondation Alfred Kastler destinée à améliorer les conditions d'accueil en France des postdoctorants étrangers.

À Harvard, j'ai eu la chance de travailler aux côtés de l'un des – sinon du – plus grands chimistes de l'époque en la personne de Robert Woodward. C'était un homme qui possédait un esprit vif et clair, doublé d'une mémoire phénoménale. Il voyait la forêt là où les autres ne voyaient que des arbres et combinait une approche logique et déductive des phénomènes à une élégance et une originalité toutes particulières dans sa façon de pratiquer la synthèse chimique. Par ailleurs, il parvenait à générer autour de lui une atmosphère studieuse favorisant l'émulation intellectuelle dans ce milieu très enrichissant qu'était l'université Harvard. Il nous poussait sans arrêt à argumenter, à étayer nos hypothèses de recherche. Il s'imposait la même rigueur dans ses questionnements théoriques et faisait preuve d'une minutie remarquable dans ses expérimentations. Par exemple, il nous demandait de préciser la taille des morceaux de sodium que nous utilisions pour les dissoudre dans de l'éthanol. Nous pensions que ce paramètre n'avait sans doute aucune influence, mais qui sait ? En un mot, pour le chimiste en devenir que j'étais, il constituait un modèle à suivre. »

## Les *Quatuors*, Ludwig von Beethoven et Béla Bartok

« J'ai toujours aimé les œuvres musicales très structurées. Les Quatuors de Beethoven et de Bartok sont remarquables en ce sens, à la fois par leur complexité et leur grande structuration. L'auditeur ne se contente pas d'écouter, il peut analyser la structure de l'œuvre et, ainsi, pénétrer l'intimité de la création artistique. De même, pour moi, la chimie est aussi un art. Le chimiste de synthèse est un créateur qui façonne non seulement l'aspect extérieur du matériau mais en fait sa nature intime, l'intérieur de la matière, "l'intrinsèque" de son "œuvre". Une molécule peut être belle à mes yeux de par sa structure, ses symétries, sa simplicité ou son fonctionnement, et me procurer autant d'émotions qu'un morceau de grande musique. »

## Regard sur la chimie d'aujourd'hui

« À l'issue de mes conférences grand public, j'entends souvent des réactions enthousiastes du type : "On ne m'a jamais montré la chimie comme ça !" Cela traduit, selon moi, un problème dans l'enseignement de la chimie, souvent présentée comme une science rébarbative et parfois exposée comme un catalogue de fonctions chimiques, de réactions, de produits, etc. Cette base de données est, bien sûr, indispensable, mais la classification repose sur des principes logiques, sur des généralisations et, en un mot, sur des concepts propres à la chimie qui sont trop rarement ou insuffisamment mis en avant. Un moyen de remédier à cela serait peut-être d'effectuer davantage de manipulations dans les écoles. Sous une double pression, financière d'une part, et "sécuritariste" d'autre part, les enseignants rechignent de plus en plus à mettre en place des séances de travaux pratiques. Je pense que cela nuit non seulement à l'apprentissage de la chimie, à l'exaltation de fabriquer (des molécules), mais aussi à son image auprès du public.

À mon sens, la chimie de synthèse est bien vivante et a un bel avenir, contrairement à ce qu'on affirme parfois. Depuis la

synthèse de la vitamine B12, de nombreuses nouvelles réactions ont été découvertes et je suis persuadé qu'il en existe encore beaucoup qui attendent de l'être. La chimie doit aujourd'hui prendre en compte les questions des ressources naturelles et de l'énergie, et elle s'oriente par la suite vers des réactions plus efficaces, utilisant moins de matières premières et générant moins de produits secondaires. Les procédés eux-mêmes aspirent à devenir moins polluants. Cette "chimie verte", à première vue intellectuellement moins excitante, peut néanmoins conduire à la découverte de nouveaux procédés et son influence ne cesse de croître.

Par ailleurs, l'introduction de techniques d'analyse nouvelles a entraîné une révolution dans les pratiques de laboratoire. La RMN, que je connais bien, a été l'une d'elles, puis sont venues la spectroscopie de masse et, bien sûr, l'informatique avec sa puissance de modélisation. De fait, on effectue des expériences de plus en plus nombreuses et de plus en plus vite en laboratoire, car le secours des appareils les rend bien plus faciles à mettre en place, à réaliser et à interpréter. Ceci a eu une influence déterminante sur les méthodes d'analyse et sur la construction des protocoles, mais au fond, la "façon de faire" de la chimie n'a pas vraiment changé.

Par ailleurs, je pense, et bien que cela soit très mal perçu aujourd'hui dans la société française, qu'il est nécessaire de conserver une certaine forme d'élitisme, car le succès de certains fait le bonheur de tous. Si on retient les meilleurs et qu'on leur donne les moyens de travailler, le fruit de leur labeur bénéficiera, au final, à la collectivité. D'une manière générale, il faut prendre en compte les spécificités de chacun et créer les conditions qui leur permettent de s'exprimer au mieux dans l'intérêt de tous. Je n'ignore pas que c'est là un discours utopique, mais j'estime que c'est ce vers quoi on doit tendre si on aspire à la véritable démocratie. »

---

## PRINCIPAUX OUVRAGES

*La Chimie supramoléculaire : Concepts et perspectives*, De Boeck, 1997. Ce livre présente le concept développé par Jean-Marie Lehn au cours de ses recherches, la chimie supramoléculaire, comme un domaine éminemment interdisciplinaire de la science et de la technologie, qui jette un pont entre la chimie, la physique et la biologie. La chimie supramoléculaire concrétise le pouvoir créateur de la chimie qui, par son essence même, est élevée au rang d'art.