

# La chimie, aujourd'hui et demain

F. Albert Cotton\* professeur, directeur du Laboratory for Molecular

**A**llocution présentée le 18 septembre 2000 par F.A. Cotton lorsqu'il reçut la médaille Lavoisier au Congrès SFC 2000 à Rennes.

C'est, pour moi, un très grand plaisir que d'être parmi vous aujourd'hui pour recevoir cette honorable distinction.

Lavoisier fut le père de la chimie moderne et sans sa contribution et sans celle des chimistes français à sa suite, la chimie ne serait pas ce qu'elle est aujourd'hui. Je voudrais rappeler quelques grands noms français qui ont marqué par leurs travaux la chimie d'hier : Lavoisier lui-même, Louis Pasteur, Achille Le Bel, Jacques Friedel, Henri Moissan, Pierre et Marie Curie, Victor Grignard, Paul Sabatier... A cette série d'illustres chercheurs, s'ajoutent, parmi nos contemporains, Jean-Marie Lehn dans le domaine de la chimie supramoléculaire, Anatole Abragham dans celui de la résonance magnétique et Henri Kagan pour ses études sur la catalyse asymétrique. Cette dernière énumération me permet sans aucun doute d'illustrer et de généraliser la prépondérance de la chimie française.

J'ai été honoré et heureux de me lier d'amitié avec un nombre croissant de chimistes français durant ces dernières décennies. Le fait de recevoir la médaille Lavoisier marque bien l'estime réciproque que les chimistes français et moi-même nous nous portons. J'apprécie donc beaucoup cette marque de reconnaissance.

Je suis américain mais, enfouie au fond de moi, existe une facette française qui s'exprime à l'occasion.

Mon propos s'articulera autour de trois thèmes essentiels :

- Le premier concerne l'importance de la chimie dans de nombreuses disciplines scientifiques telles que la biologie, la médecine, la génétique, l'écologie, la physique des états condensés et, enfin la science des matériaux.

- Mon second thème expose le rôle central de la chimie dans les différents aspects de la vie quotidienne dans les pays développés.

- Dans le troisième thème, je préciserai en quoi la chimie n'est pas uniquement une science au service d'autres sciences, mais reste une discipline à part entière, ouverte sur d'exaltantes aventures intellectuelles et de nouveaux défis fondamentaux.

Permettez-moi d'aborder chacun de ces thèmes dans l'ordre que je viens d'annoncer.



F.A. Cotton vient de recevoir la médaille Lavoisier.

Tout d'abord, il y a les biologistes qui refusent qu'une approche réductrice de la biologie, tentant de ramener tout phénomène biologique à une série d'événements chimiques, puisse permettre une compréhension complète de la biologie. Et je pense qu'ils ont raison. Cependant, sans une connaissance des bases chimiques de la biologie, on ne peut espérer arriver à une compréhension totale des phénomènes biologiques. Bien entendu, il ne suffit pas de connaître l'intégralité des réactions chimiques à l'œuvre dans un système biologique pour rendre compte de ce système. De manière plus imagée, savoir qu'une maison est construite de briques et de poutres ne permet pas d'en connaître l'architecture, la répartition des pièces et leurs différentes fonctions. Nous devons savoir comment les choses s'ordonnent. Et la question de savoir comment les différents événements chimiques particuliers impliqués dans un système biolo-

\* W.T. Doherty-Welch Foundation, Laboratory for Molecular, Texas A & M University, Department of Chemistry, PO Box 30012, College Station, TX 77842-3012, États-Unis. Fax : +1 (979) 845-9351. E-mail : cotton@tamu.edu

gique interagissent reste une question de chimie. En d'autres termes, même si un ordinateur est plus qu'un assemblage de plusieurs processeurs, il est impossible de pouvoir écrire un logiciel sans connaître la nature de chaque processeur.

Parlons de la médecine maintenant. Peut-être ne devrais-je point la classer parmi les sciences, puisqu'elle est un art ! Cependant, à cette occasion, je me le permettrai. Que serait la médecine moderne sans la chimie ?

L'habileté d'un chirurgien serait inutile sans les antibiotiques, sans les médicaments contre le rejet des greffes, sans les prothèses synthétiques, et ainsi de suite. Pourquoi sommes-nous capables de contrôler une maladie et parfois de la guérir ? Principalement par l'utilisation de médicaments qui ont été préparés par des chimistes et qui n'existeraient point autrement.

Même les substances naturelles douées de propriétés thérapeutiques ont besoin de la main d'un chimiste. Ainsi en est-il de la pénicilline naturelle vis-à-vis de laquelle se développent, par mutation bactérienne, des résistances qui lui ôtent son efficacité. Mais les chimistes, qui ont appris à synthétiser la pénicilline, savent aussi en modifier la structure pour la rendre plus active vis-à-vis de ces bactéries résistantes.

La génétique ! Serait-il excessif de dire qu'elle n'est que chimie ? Probablement en effet. Cependant, c'est quand même de la chimie à 95 % ! Le code génétique, quant à lui, l'est à 100 % ! Sans la compréhension de l'ADN et du codage génétique, nous n'aurions pas avancé au-delà des observations empiriques de Gregor Mendel.

Dans le domaine des matériaux et des états condensés, nous sommes, là-encore, dans le « purement chimique » ! Les fullerènes et les nanotubes au carbone ont été découverts par des chimistes, de même que les polymères et les plastiques. L'étude des polymères naturels, des protéines et de l'ADN tombe maintenant dans le domaine de la chimie.

Sans entrer dans les détails, il est clair que la recherche en écologie dépend des merveilleux moyens analytiques conçus par les chimistes.

Je voudrais maintenant consacrer un instant à discuter de l'impact de la chimie sur notre vie quotidienne, spécialement dans les pays développés : elle y apparaît, sous bien des aspects, comme une science centrale. Par exemple, il serait tout bonnement impossible de construire une automobile sans utiliser les matériaux synthétiques élaborés par les chimistes. Et c'est aussi vrai pour les trains et les avions. La plupart des vêtements que nous portons sont, tout ou en partie, constitués de produits synthétiques. L'emballage, comme les maisons que nous habitons, bénéficient des commodités du plastique que les chimistes ont créé. De la brosse à cheveux du matin à la brosse à dent du soir, nous vivons des vies confortables et sûres grâce aux matériaux créés par les chimistes.

Même le monde des ordinateurs et de la communication n'existerait pas sans les semi-conducteurs, les substances phosphorescentes et magnétiques inventées par les chimistes.

Le troisième thème de mon exposé concerne la chimie proprement dite, indépendamment de son influence sur les autres sciences et de son importance technologique. La chi-

mie reste, en effet, une merveilleuse aventure pour l'esprit humain et elle ne nous a pas encore livré tous ses secrets. Qu'il s'agisse du déroulement des réactions chimiques, de la composition et de la structure atomique et moléculaire de la matière, ou de la synthèse de nouvelles molécules, notre compréhension de ces processus demeure extrêmement incomplète. La plupart des questions auxquelles nous avons réussi à répondre en suscitent de nouvelles bien plus subtiles.

Une des raisons pour laquelle je trouve la chimie si fascinante tient au fait qu'elle diffère des autres sciences par l'effort créatif qu'elle nécessite ou permet. La chimie, comme les mathématiques et la musique, autorise la création d'objets que l'on ne peut rencontrer dans la nature. Comme l'a dit Marcelin Berthelot, il y a de cela un siècle, « la chimie crée son objet ». Je crois que le nombre de composés découverts dans des laboratoires est bien supérieur à ceux inventés dans la nature. En effet, les chimistes élaborent plus d'un million de nouvelles molécules chaque année et la cadence de ces découvertes ne cesse de croître. Néanmoins, nous devons poursuivre l'exploration de la nature pour y découvrir les trésors toujours cachés dans le monde du vivant.

Maintenant, je voudrais vous faire part de mon inquiétude en ce qui concerne la manière dont la recherche vraiment fondamentale est financièrement soutenue de nos jours. Avant de poursuivre, je préciserai ce que j'entends par recherche vraiment fondamentale. C'est une recherche dont le seul but est la connaissance du fonctionnement de la nature, et ceci indépendamment d'éventuelles applications pratiques que permettraient ces découvertes. Cela ne veut pas dire, bien entendu, que des connaissances fondamentales ne puissent, quelquefois, être issues d'une recherche appliquée. Mais exiger que la recherche soit toujours orientée vers des applications pratiques, retardera considérablement le développement de nouvelles connaissances fondamentales.

En ce qui concerne le financement de la recherche, mon expérience s'appuie seulement sur la situation américaine. Je crois cependant que les choses sont très similaires au Royaume-Uni ainsi qu'en Europe continentale. Pendant une période d'environ 30 ans, la recherche scientifique (par rapport à la recherche technologique) a connu un « âge d'or » aux États-Unis. Cela a commencé peu de temps après le décollage de « Spoutnik » en 1957 et s'est à peu près terminé lors de la dissolution du bloc soviétique. Cette concordance temporelle suggère que la guerre froide était en fait le moteur de cet âge d'or ! Mais les choses n'étaient pas aussi simples : la compétition militaire avec l'Union soviétique aurait dû promouvoir la seule recherche militaire. Bien entendu, les budgets pour la recherche militaire furent augmentés durant cette période. Mais de manière surprenante, il en fut de même pour la recherche fondamentale en mathématiques et dans les sciences physiques. Pourquoi ?

Je ne peux répondre à cette question, mais il me vient à l'esprit les réflexions suivantes : pour une raison quelconque, il est possible que le public non scientifique et les politiciens aient été, à cette époque, prêts à accepter l'idée que toute découverte fondamentale soit susceptible de

retombées technologiques. De ce fait, la recherche fondamentale méritait d'être soutenue. Je pense même que, dans une faible mesure, il pouvait y avoir un idéal posant la connaissance fondamentale en elle-même comme un objectif digne, juste et apprécié, objectif qu'une société prospère pouvait se permettre au même titre que les musées, les poètes et les orchestres symphoniques ! Mais, par dessus tout, je pense qu'à cette époque, compte tenu des montants faramineux investis dans la recherche technologique, peu de gens se souciait des modiques sommes attribuées à la recherche « inutile », c'est-à-dire fondamentale. Cela n'avait pas bien grande importance de toute façon.

Pendant cet âge d'or pour la recherche fondamentale, la science, au sens large, était une valeur populaire. De nos jours, le public semble s'être détourné de la science au profit de mythes préscientifiques tels que l'astrologie par exemple. En ce qui concerne la chimie en particulier, le public ne semble pas réaliser que bien des aspects de la vie de tous les jours dépendent très largement des matériaux et médicaments préparés par des chimistes. Plus encore, le public se focalise sur des problèmes de pollution relativement mineurs causés, non par la chimie en elle-même, mais par des industriels avides et irresponsables et des gouvernements corrompus et incompétents.

Dans les sciences de la vie, il existe toujours un soutien financier important. Ceci est dû simplement au fait que, dans l'esprit d'un public non scientifique, la recherche fondamentale dans les sciences de la vie est souvent associée aux bénéfices que ces découvertes peuvent avoir pour la santé des individus.

Un autre type de science fondamentale reste, de façon surprenante, encore prospère : il s'agit de l'astronomie et de la cosmologie. Il est clair, cependant, qu'en dépit des découvertes qui peuvent être faites dans ce domaine, telles que l'expansion ou la contraction de l'univers, la présence d'eau sous la surface de Mars ou encore l'existence des trous noirs, la vie humaine sur terre n'en sera pas bouleversée. Néanmoins, d'importantes sommes d'argent sont dépensées pour clarifier ce type de questions sans que le public s'y oppose ou s'en offusque. En fait, ce type de recherche est même activement encouragé par le public.

Hélas ! La chimie ne semble pas susciter une telle fascination sur l'imaginaire collectif ! Au contraire, il est impossible, de nos jours, d'obtenir un soutien financier pour un projet de recherche fondamentale, à moins que celui-ci ait été déguisé pendant sa conception comme un projet aux ambitions technologiques. Un chimiste qui, aujourd'hui, soumet un projet de recherche, sans mentionner comment la société bénéficiera de cette recherche d'une manière évidente, a peu de chance d'être financé. La simple recherche de réponses à des questions pertinentes, ou issues de défis scientifiques, est rarement considérée comme digne de financement.

Nous avons tous réagi à cette situation d'une manière ou d'une autre. Les plus chanceux sont ceux dont les vrais intérêts fondamentaux ont des liens directs et naturels avec des applications technologiques. Les financements peuvent être obtenus sans modifications des projets de recherches ni publicités cyniques et trompeuses. Il y a donc tous les autres

qui modifient leurs projets et les présentent aux agences de financement en exagérant sans vergogne l'impact que peut avoir leur recherche sur des développements technologiques supposés. Enfin, il y a ceux qui abandonnent purement et simplement leur sujet de prédilection et construisent des projets de recherche « conformes et corrects », susceptibles d'attirer les bonnes grâces des organismes de financement. Le chimiste, dont les thèmes de recherche ne peuvent être associés à des applications technologiques à court terme, et qui est trop honnête pour inventer cyniquement une relation fictive entre son projet réel et des applications technologiques, ne recevra probablement pas de subventions.

Je ne pense pas que cet état des choses puisse se poursuivre plus longtemps sans dommages irréparables pour l'entreprise scientifique. J'ai vu bien des jeunes chercheurs, en demande d'emploi dans notre département, proposer des projets de recherche qui, à mon goût, étaient simplement de la recherche industrielle. Avant même de commencer leur carrière académique, ils ont déjà cessé de se poser des questions fondamentales de chimie. A la place de cela, ils présentent des projets de recherches conçus pour attirer des financements et ceci dans un climat dénué de sympathie vis-à-vis de ceux qui ne pensent pas en terme d'applications. Ceux qui réussissent, entraînent les prochaines générations de jeunes chimistes à suivre le même chemin : favoriser les sciences appliquées sans se soucier des questions fondamentales.

La science sera corrompue comme le furent les arts sous Hitler et Staline. Tout comme quelques artistes satisfaisaient alors ces dirigeants sans goût, seule la recherche susceptible de rapporter du « fric » sera soutenue par nos agences gouvernementales. Les bons projets de recherche devraient être financés indépendamment de leur lien direct avec la technologie ou la santé. Après tout, la recherche sur les lasers n'a pas été financée dans l'espoir de fabriquer des lecteurs de CD ou de faire de la chirurgie ophtalmique. Le concept de l'effet laser fut simplement une idée scientifique intéressante que des gens compétents ont décidé de poursuivre. Plus tard et de manière imprévue, l'application des connaissances scientifiques ainsi acquises fut mise en œuvre.

Je voudrais maintenant présenter une liste de défis fondamentaux qui méritent notre attention présente. Cette liste a été établie par mon ami et ancien élève Stephen J. Lippard, directeur du département de chimie au MIT (Massachusetts Institute of Technology).

- Nous souhaitons créer des entités chimiques qui comprennent un grand nombre d'éléments identiques arrangés de telle sorte que ces entités se comportent comme des récepteurs pour certaines unités liantes ou bien même comme des ligands.

- Nous souhaitons faire des molécules qui « s'autorépliquent » ainsi que des réactions qui s'autocorrigent. A cette dernière catégorie s'ajoutent aussi des réactions catalytiques dans lesquelles des erreurs introduites dans le produit seraient éliminées ou corrigées.

- Nous souhaitons comprendre suffisamment bien la nature d'une nouvelle transformation chimique donnée ou désirée afin de pouvoir concevoir, de manière rationnelle, un catalyseur pour cette réaction.

- Nous souhaitons explorer les phénomènes chimiques se déroulant à différentes interfaces et nous souhaitons contrôler la stéréochimie de catalyseurs hétérogènes.

- Nous souhaitons assurer l'arrimage des supramolécules afin d'en maintenir l'intégrité et d'en atténuer la labilité, tout en conservant des sites pour la catalyse de réactions chimiques et sans interférer avec la libération du produit.

- Nous souhaitons utiliser des moyens de synthèse en parallèle et automatisés, ainsi que des méthodes de chimie combinatoire pour améliorer les réactions chimiques de manière évolutive.

- Nous souhaitons contrôler le sens et l'orientation d'*approche d'une molécule réagissant avec une autre*.

- Nous souhaitons comprendre les mouvements internes des molécules de sorte qu'une courte excitation par un rayonnement électromagnétique puisse être utilisée pour dissocier spécifiquement et de façon synchrone une certaine liaison dans la molécule.

- Nous souhaitons comprendre la structure et la dynamique des interactions intermoléculaires afin d'être capables de prédire et de contrôler les propriétés d'un ensemble moléculaire.

- Nous souhaitons concevoir des réactifs ainsi que des chemins réactionnels pour casser des liaisons jugées inertes au préalable.

- Nous souhaitons trouver des moyens permettant de convertir des produits naturels abondants en de petits éléments de construction moléculaire utiles et vice versa.

- Nous souhaitons développer l'art de faire des réactions chimiques sans solvant.

- Nous souhaitons créer des réactifs qui modifient une partie d'une molécule sans avoir à protéger et plus tard à « déprotéger » d'autres sites réactifs de la molécule que nous voulons garder intacte.

- Nous souhaitons créer des produits chimiques ainsi que des procédés qui n'entraînent pas la génération de produits dangereux et qui utilisent des ressources renouvelables.

- Nous souhaitons comprendre et maîtriser les propriétés de composés de taille intermédiaire (de un à cent nanomètres) entre l'état moléculaire et l'état solide.

- Nous souhaitons inspecter la chimie d'une molécule unique isolée afin de comparer ses propriétés avec celles d'un ensemble de cette même molécule dans différents solvants.

- Nous souhaitons créer des molécules qui s'assemblent spontanément pour former des structures supramoléculaires,

des solides, dont les propriétés surpassent celles d'un ensemble de ces mêmes molécules.

- Nous souhaitons apprendre à faire croître des solides moléculaires cristallins à composition variable dans lesquels peuvent être incorporés des composés invités afin d'améliorer les propriétés chimiques et physiques du solide.

- Nous souhaitons découvrir de nouvelles compositions de la matière telles que de nouveaux assemblages d'éléments chimiques ou de particules élémentaires.

- Nous souhaitons maîtriser la chimie d'espèces piégées afin de relâcher ces mêmes espèces dans un gaz, un liquide ou un solide, et ceci sous l'influence d'un produit chimique ou d'un champ magnétique ou électrique.

- Nous souhaitons comprendre et utiliser la chimie, les propriétés énergétiques et la spectroscopie des espèces radicalaires.

- Nous souhaitons développer de nouvelles approches théoriques qui permettent de comprendre les liaisons chimiques et les réactions. Nous souhaitons aussi être capables de comparer ces théories à des résultats expérimentaux.

**En conclusion**, je voudrais résumer les points suivants.

Tout d'abord, la chimie est importante car beaucoup de sciences en dépendent. Dans certains cas, ces sciences, comme nous le savons maintenant, ne pourraient exister sans leurs fondements chimiques. Une deuxième raison rend la chimie importante : c'est le fait que la majorité des produits manufacturés de nos jours, dont nous dépendons tous et que nous considérons comme banals, sont le produit direct de la chimie. Enfin, il est essentiel que la chimie soit reconnue comme une science majeure et à part entière. Il est aussi important de noter que cette discipline réserve encore bien des questions auxquelles une réponse doit être apportée. Alors qu'à l'heure actuelle le soutien à la recherche appliquée est élevé, la nécessité et l'importance de continuer à soutenir la recherche fondamentale ne semblent pas être entièrement acceptées. Je pense que nous autres, les chimistes, devrions travailler dur pour que la recherche fondamentale en chimie soit reconnue et soutenue financièrement.

Encore une fois, je tiens à remercier la Société Française de Chimie pour l'honneur qu'elle me fait aujourd'hui. Je veux aussi exprimer mes vœux très sincères à la communauté des chimistes français pour la vigueur de leur chimie aussi bien fondamentale qu'appliquée.