

L'espace épistémologique et didactique de la chimie*

par Roger BARLET

Professeur

Laboratoire Interdisciplinaire de Didactique des Sciences Expérimentales
Bâtiment Chimie Recherche BP 53 - 38041 Grenoble Cedex 9

RÉSUMÉ

La chimie, omniprésente dans la vie quotidienne, reste largement méconnue du grand public même si son image est en train de s'améliorer. Cet article vise à affirmer l'identité de cette discipline, riche et créatrice, par rapport aux disciplines voisines que sont la physique et la biologie.

L'épistémologie de la chimie est très spécifique : culture de la diversité, rapport à l'expérimental fort et complexe, approche de la réaction chimique multifactorielle et systémique, etc. L'histoire des sciences de ces deux derniers siècles n'est d'ailleurs pas avare en paliers épistémologiques clefs, très caractéristiques du développement de cette discipline.

Cette nature épistémologique entraîne une véritable autonomie didactique avec des enjeux d'apprentissage assez spécifiques : dualité microscopique-macroscopique, rapport expérimentation-modélisation avec risques de dogmatisme, poids du langage... Le chantier didactique de la chimie est donc largement ouvert.

INTRODUCTION

Dans une période où l'interdisciplinarité est à l'honneur et où les interfaces et les confrontations entre les disciplines prouvent chaque jour leur fécondité, il est plus que jamais nécessaire pour les chimistes d'affirmer la richesse et la spécificité de leur discipline.

* NDLR : Cet article a été publié dans l'Actualité Chimique d'avril 1999. Nous remercions cette revue et l'auteur de nous avoir autorisés à le reproduire.

Il est pourtant vrai que les chimistes aujourd'hui, comme hier sans doute, éprouvent un réel malaise et en même temps un fort sentiment d'appartenance. Ils ont la perception d'une discipline qui reste largement méconnue et mal-aimée du grand public et dont l'image oscille entre la technicité des usines et laboratoires modernes et l'archaïsme des flacons et cornues d'antan.

Pire même, la chimie est souvent mise en accusation : ne menace-t-elle pas en permanence l'environnement même si ce sont les progrès de ses moyens analytiques qui permettent de prendre la mesure de la pollution ? N'est-elle pas perçue comme le domaine de l'artificiel, forcément suspect, face au naturel, forcément bénéfique, même si la structure, la réactivité ou la toxicité des molécules ne sont pas liées à leur origine naturelle ou synthétique.

Les faibles connaissances en chimie du grand public ne font qu'aggraver le phénomène et montrent combien les chimistes ont du mal à communiquer et à faire connaître réellement leur discipline : passe encore que la seule molécule connue soit celle de l'eau mais que le dioxyde de carbone soit confondu avec la «dioxine de carbone qui produit l'effet de serre» [1] montre l'étendue du fossé. Les chimistes savent pourtant mieux que quiconque combien ce procès et cette méconnaissance sont contraires à l'évolution économique et culturelle : la chimie, omniprésente dans la vie de tous les jours, est une grande dispensatrice de biens, de matériaux et de confort même si elle se doit d'étudier les problèmes d'environnement, aussi bien à court qu'à long terme.

La chimie sait quelquefois apparaître sous un jour plus avenant et montrer son importance. Il n'est pas anodin que les nouveaux programmes du secondaire parlent de «chimie des champs et des jardins» en seconde ou de «molécules de l'hygiène, de la beauté et de la santé» en terminale. Convenons cependant que les chimistes, convaincus du modernisme et de l'avenir de leur discipline, ont du mal à dépasser leur sentiment de frustration devant une image sociale assez négative et adoptent souvent un profil bas. La chimie serait-elle selon la formule du professeur Mathey à la fois un géant économique et un nain culturel [2] ? Serait-elle la science du XIX^e siècle qui a d'abord cédé le pas à la physique, science du XX^e siècle, puis à la biologie, science du XXI^e siècle ?

Nous souhaitons dans cet article contribuer à l'analyse des caractères distinctifs et spécifiques de la chimie et montrer sa forte identité. Cette identification sera faite à partir de la délimitation d'un espace épistémologique, lié à sa nature propre et à quelques phases clés de son développement, et d'un espace didactique, mettant en évidence les difficultés de son enseignement et les enjeux que l'on retrouve dans la formation de tout chimiste.

UNE IDENTITÉ AFFIRMÉE

Une science expérimentale

La chimie est avant tout une science expérimentale qui étudie les propriétés, la réactivité et la structure d'une multitude d'espèces (plus de quinze millions actuellement). En même temps elle cherche à organiser et structurer cette diversité.

La chimie, en tant qu'activité expérimentale, se perd dans la nuit des temps (métallurgie, fermentations, fabrication des teintures, colles, savons, parfums, etc.). La bibliothèque d'Alexandrie, point de rencontre des traditions grecque et égyptienne a accompagné les premières activités de laboratoire organisées. Les activités expérimentales se sont poursuivies au cours de la longue nuit alchimiste et ont abouti à un capital de savoir-faire, malgré le culte du mystère et de l'ésotérisme qui accompagnait cette période. Ce n'est pourtant qu'à la fin du XVIII^e siècle (fin du phlogistique, avènement de la chimie quantitative de Lavoisier...) que les conditions ont été réunies pour l'élaboration et l'émergence des bases structurales de la chimie. Cette émergence a encore duré un bon siècle alors que les bases de la mécanique et de l'optique (Galilée, Descartes, Newton...) étaient déjà largement acquises.

L'histoire a ainsi montré que l'interprétation de la diversité des réactions, des phénomènes et des observables en chimie n'est pas chose simple. Expliquer, selon la formule de Jean Perrin, «le visible compliqué» par «l'invisible simple» a nécessité de longues controverses autour de la théorie atomique, particulièrement en France où «équivalentistes» et «atomistes» se sont durement affrontés jusqu'à la fin du XIX^e avec des figures de proue telles Berthelot et Wurtz [3].

Le champ expérimental de la chimie est très vaste et il est difficile à circonscrire a priori. Les nouvelles réactions, comme les nouveaux produits quotidiens ou industriels (alimentation, hygiène, matériaux, médicaments, engrais...), sont chaque jour plus nombreux. Les progrès de la chimie permettent d'anticiper et de prévoir, mais en même temps la création continue de nouvelles espèces et de nouvelles transformations n'échappe pas à de multiples aléas. Tout ne peut pas être prévu et le qualitatif ou l'approximatif, lié à la diversité des conditions expérimentales, supplante souvent le calcul rigoureux et définitif.

Les rapports avec la physique

Affirmer l'identité de la chimie, c'est également bien identifier ce qui la distingue des disciplines voisines, telles que la physique et la biologie, et analyser l'évolution de ses rapports de proximité avec ces deux disciplines.

En se limitant aux trois derniers siècles, on peut mesurer combien la physique a longtemps joué un rôle dominant dans ses rapports avec la chimie :

– au siècle des lumières, Venel précise dans l'encyclopédie que «*la chimie est peu cultivée parmi nous*», que c'est «*la physique des petits corps*», c'est-à-dire une sous-classe de la physique, mais, en même temps, il regrette vivement que les chimistes pensent n'avoir d'autre avenir que dans le mimétisme de la physique et il loue leur «*passion de fou*», leur capacité à avoir «*un thermomètre au bout des doigts*» et «*une horloge dans la tête*» ;

– Diderot, dans ses «*pensées sur l'interprétation de la nature*» met en avant l'importance de l'expérience en chimie et dénonce le mépris de ceux qui réfléchissent pour ceux qui apprennent à partir de l'expérience [4] ;

– Kant ne considère pas la chimie pré-lavoisienne comme une science, à l'inverse de la physique, car, pour lui, la caractérisation d'une science réside dans la mathématisation jointe à l'abstraction ;

– la révolution scientifique apportée par Lavoisier rapproche la chimie de la physique et, par un véritable effet table rase, récuse la tradition artisanale du savoir-faire et consacre l'importance de chimie quantitative et de la mesure, nouveau critère de scientificité (thermomètre, calorimètre, balance...) ;

– au XIX^e siècle, la situation devient plus contrastée car si Auguste Comte, dans sa classification positiviste, assigne une place modeste à la chimie et conteste son statut de science à part entière, en même temps la chimie ayant assis ses bases structurales se construit une identité conquérante et devient (avènement de la synthèse, découverte d'éléments, essor industriel...) «*la science des professeurs*» [4] ;

– au XX^e siècle, ce territoire à peine construit tend à se démembrer devant les avancées de la physique qui ébranle l'identité de l'élément face aux familles radioactives, incorpore à son histoire l'atome de Bohr, pourtant nourri par la chimie, et affirme par son atome quantique le pouvoir des lois physiques devant les lois de la chimie, vouées à des approximations.

Cependant la croissance exponentielle du nombre d'espèces chimiques oblige à des efforts de structuration et de rationalisation propres à la chimie (modèles de la liaison, transferts de doublets entre donneur et accepteur, mésomérie, mécanismes réactionnels, effets de solvant, etc.). Cette rationalisation a été rendue possible par de véritables changements successifs de paradigme au sens de T.S. Kuhn [5], particulièrement en chimie organique [6] :

– le paradigme Lewis permettant la représentation des entités en réaction ;

– le paradigme quantique, en rupture avec toute représentation figurée et associé au concept de fonction d'onde ;

– le paradigme milieu permettant de passer de l'entité isolée à la dimension sociomoléculaire du groupe d'entités.

La chimie physique, de son côté, crée son propre espace au XIX^e et au XX^e siècle : thermodynamique chimique, potentiel chimique, systèmes dissipatifs producteurs d'entropie, exigences cinétiques d'une réaction chimique, équilibres chimiques... Aujourd'hui l'interface avec la physique, historiquement plus affirmée au niveau de la chimie physique, présente de nouveaux développements (nanostructures et nanoréacteurs, microscopie à effet tunnel et applications, chimie du solide, etc.).

Les rapports avec la biologie

Du vitalisme à la biologie moléculaire contemporaine, les rapports entre chimie et biologie se sont totalement modifiés. Que de chemin parcouru, en un siècle et demi, depuis 1828, date de la synthèse de l'urée par Wöhler à partir du cyanate d'ammonium. Cette synthèse a marqué le début de l'ébranlement du principe de la «force vitale» et de l'idée selon laquelle les processus vitaux n'obéiraient pas aux lois et aux mécanismes physico-chimiques. La multiplication des synthèses en chimie organique (figure 1) et l'abandon de la théorie de la génération spontanée contribuèrent rapidement à montrer que chimie et biologie, malgré leurs champs distinctifs, ne manquaient pas de points de convergence. Il n'est d'ailleurs pas contestable que le langage très spécifique de la chimie, fait de formules et de multiples symboles pour expliciter la notation chimique, a été adopté tel quel par les disciplines voisines au premier rang desquelles la biochimie mais aussi la biologie ou la géologie.

Synthèse de l'urée par Wöhler à partir du cyanate d'argent (1828) :



Synthèses de Berthelot :

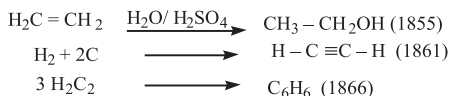


Figure 1 : Les premières synthèses.

Aujourd'hui, le développement des synthèses dans le domaine des substances naturelles, la connaissance des mécanismes de la biosynthèse des protéines, l'essor de l'enzymologie, le déchiffrement de la carte du génome, tendent à rapprocher chimie moléculaire et biologie moléculaire. La **reconnaissance moléculaire**, concept biologique, se trouve associé à la **chimie supramoléculaire**, concept chimique, popularisé par

J.-M. Lehn [7]. La spécificité des processus biologiques et en particulier leur caractère asymétrique n'empêche pas une convergence avec la chimie.

Les chimistes essaient de mieux comprendre les mécanismes biologiques pour mieux les réutiliser en chimie (essor de la chimie biomimétique, élaboration de modèles d'enzymes, essor de la chimie de coordination...). Cette évolution s'est d'ailleurs traduite de façon remarquable par l'attribution du prix Nobel de chimie en 1993 à K.B. Mullis pour la PCR (Polymérase Chain Reaction), technique d'amplification génique développée dans les années 80 et utilisée en routine aujourd'hui en biologie moléculaire.

On peut, cependant, se demander si, dans cette convergence entre chimie et biochimie, l'identité de la chimie ne risque pas d'être menacée par une sorte de biocentrisme continu. D'une part, il est certain que l'essor de la biologie moléculaire, les manipulations d'ADN, tendent à donner à la biologie un impact culturel et médiatique qui diffuse peu vers la chimie. D'autre part, les chimistes ne risquent-ils pas de devenir prestataires de services et de molécules pour les biologistes ? Les radiopharmaceutiques, les molécules actives au plan thérapeutique, l'activité enzymatique ne sont-elles pas devenues plus intéressantes par leur champ d'action biologique que par leur mode d'action et de connaissance chimique ? Pour reprendre le mot de Bachelard, la chimie ne serait-elle pas *« plus utile à la vie »* qu'à *« l'esprit »* ?

Bien entendu, on peut tout au contraire penser que l'interface chimie-biologie, en plein développement actuellement dans beaucoup de laboratoires de chimie organique, constitue un lieu de travail interdisciplinaire particulièrement fécond pour la chimie. Le formidable laboratoire biochimique constitué par la nature, qu'on trouve déjà dans le plus simple des colibacilles, montre que les processus biochimiques n'ont pas d'équivalent en finesse, en complexité et en efficacité (sélectivité et pouvoir catalytique des enzymes par exemple). Ils dépassent de loin tout ce qu'on peut réaliser au laboratoire chimique. La connaissance des modes d'action, l'élucidation d'une partie de la complexité des mécanismes biochimiques, la mise en œuvre d'une certaine modélisation biomimétique peuvent cependant constituer un nouveau champ d'action pour les chimistes.

UN ESPACE ÉPISTÉMOLOGIQUE BIEN IDENTIFIÉ

L'analyse des rapports de la chimie avec la physique et la biologie et l'évolution de ces rapports, au cours de l'histoire récente, nous montrent donc les risques de perte d'identité d'une discipline carrefour comme la chimie. Sa proximité avec ces deux disciplines la met néanmoins en situation de développer des interfaces d'autant plus fécondes qu'elle y préservera son identité. Entre relégation au rang de discipline-outil ou pro-

motion au rang de science centrale, la chimie peut affirmer son identité disciplinaire à partir d'un espace épistémologique bien délimité.

Un champ et un objet d'étude liés à la société et à l'industrie

Domaine de l'étude des **propriétés des espèces**, la chimie est en même temps un lieu d'étude des **structures et des réactions chimiques**, une science de la matière et de ses transformations :

- la notion d'*espèce chimique*, dont la création n'a pas de fin et dont l'acte de naissance conceptuel (Proust) ne remonte qu'au début du XIX^e siècle, est la pierre angulaire, le préalable de toute étude de la chimie ;
- la réaction chimique est l'étude de la transformation de ces espèces, «*le processus qui a pour résultat la conversion d'une ou plusieurs espèces chimiques en une ou plusieurs autres espèces chimiques*» (IUPAC).

La nature expérimentale de la chimie, enracinée dans l'histoire, est relayée par l'imagerie populaire aujourd'hui comme elle l'était hier :

- le succès de l'opération «Graine de chimiste» menée dans les écoles et les collèges renvoie à l'évocation spontanée de la chimie, par des élèves de troisième, au moyen de mots liés au laboratoire et à l'expérimental [8] ;
- les cours publics et les démonstrations du XVIII^e siècle au Jardin du Roy par des propagandistes célèbres de la chimie, tels Rouelle et Macquer, ont beaucoup fait pour la promotion de la chimie expérimentale.

Cette imagerie très expérimentale va de pair avec une image sociale assez duale : la chimie reste très associée à la pollution, à l'artificiel, à la toxicité des produits et, en même temps, elle s'affirme de plus en plus comme le lieu de mise au point de nouveaux matériaux, destinés à améliorer notre bien-être, ou de «nouvelles molécules», efficaces sur le plan thérapeutique. L'analyse de la perception par le grand public de quatre mots caractéristiques montre bien ce contraste [9] :

- le terme *chimie* évoque une science positive, créatrice de produits, omniprésente, utile et réparatrice, qui possède un champ scientifique, une pratique et un langage ;
- le terme *chimistes* évoque une profession honorable et intéressante ;
- les termes *produits chimiques* et *industrie chimique* sont, au contraire, liés à danger, toxicité et pollution malgré les progrès récents et déterminés de la profession dans ce domaine.

Le poids économique de la chimie est d'ailleurs plus important que celui de n'importe quelle autre discipline scientifique :

- la chimie alimente une industrie chimique puissante (environ 15 % de la valeur ajoutée industrielle, près de 20 % des exportations industrielles françaises) ;
- les entreprises industrielles du secteur chimie sont parmi les plus puissantes entreprises mondiales (Rhône-Poulenc Rorer, Elf Aquitaine, Rhodia Chimie...) ;
- il existe une Union des Industries Chimiques qui n'a pas son équivalent dans d'autres disciplines ;
- le génie des procédés et la chimie industrielle sont des domaines d'étude qui ont leur répondant direct dans l'industrie et qui, tout en continuant à alimenter la formation des ingénieurs chimistes, se développent largement, à l'heure actuelle, dans les IUP universitaires.

Une culture spécifique

La culture de l'espèce chimique et la chimiodiversité, la capacité à synthétiser de nouvelles molécules, caractérisent aujourd'hui la chimie et le chimiste. Ces molécules peuvent conduire à un niveau de complexité qui fait du chimiste un véritable «architecte de la matière». Il n'y a pas de commune mesure entre la synthèse de l'urée et celle de la vitamine B12 en 1976 par Woodward et Eschenmoser (structure tétrapyrrolique obtenue par une centaine d'étapes ayant mobilisé cent vingt chimistes). L'accès contemporain aux «supermolécules», capables de conduire à des assemblages moléculaires programmables, rend plus que jamais pertinente la définition de Marcellin Berthelot «*la chimie crée son propre objet d'étude*».

En même temps, cette culture de l'espèce chimique est récente et ne s'est pas faite sans soubresauts au début du XIX^e siècle : une des difficultés épistémologiques majeures, observée dans le développement de la chimie, a été la loi d'Avogadro-Ampère, c'est-à-dire l'observation que les gaz, quelle que soit leur nature, occupent le même volume dans les mêmes conditions de température et de pression. Il y avait là une sorte de négation de l'espèce, de paradoxe, qui n'a pu être interprété, que plus tardivement, par le modèle du gaz parfait considérant les molécules de gaz comme indépendantes les unes des autres, à pression modérée.

Le chimiste doit posséder la double culture du microscopique et du macroscopique. Il évolue en permanence entre le niveau de *l'entité chimique isolée*, particulièrement lorsqu'il étudie les structures, et le niveau de la *collection gigantesque d'entités*, lorsqu'il étudie les phénomènes et les réactions chimiques observables. Le passage de cette modélisation microscopique (on devrait plutôt dire nanoscopique) à la réalité

macroscopique caractérise fortement l'épistémologie de la chimie. La confrontation de cette double culture apparaît typiquement dans les équilibres chimiques.

La modélisation microscopique et structurale est le moyen pour le chimiste de mettre en ordre et de rationaliser le comportement des multiples espèces chimiques. Elle permet de rendre intelligibles et interprétables les diverses observations expérimentales :

- modélisation atomique et moléculaire prenant appui sur de puissantes techniques de détermination des structures telles que la RMN et la spectrométrie de masse ;
- modélisation de Lewis permettant de prédire en partie structure et réactivité ;
- modélisation de Gillespie, permettant de prévoir l'organisation dans l'espace autour d'un atome central ;
- modélisation espèces-milieu, permettant d'expliquer le comportement d'espèces chimiques qui ne sont jamais isolées sauf en phase gazeuse suffisamment diluée.

Cette modélisation microscopique vaut surtout pour le chimiste moléculaire. Le chimiste du solide qui s'intéresse lui, à des objets, des matériaux présentant un nombre infini d'atomes (cristaux, feuillets, fibres, composés d'intercalation...) aura recours à une modélisation structurale appuyée sur de puissants outils analytiques (spectrographie de rayons X, EXAFS etc.).

Un rapport à l'expérimental fort et complexe

Le champ expérimental est d'une diversité infinie en chimie. Il n'a pas de limites : création continue de nouvelles espèces, structure spécifique de chaque réactif, variété des conditions de milieu, compétitivité des réactions, orientation dépendante des conditions réactionnelles... On comprend que l'expérimental soit ainsi le fondement épistémologique de la chimie mais que, dans ce véritable maquis expérimental, le contrôle précis de chacun des paramètres directeurs de la réaction chimique soit particulièrement difficile.

L'expérimentation et sa diversité sont donc fondamentales en chimie, comme dans les disciplines expérimentales voisines que sont la physique et la biologie, mais avec une dimension spécifique. Comme la biologie la chimie est une science de la complexité mais avec le pouvoir de créer sans cesse, et quelquefois de façon inattendue, de nouvelles espèces qui deviennent de nouveaux objets d'étude. Pour reprendre un graphe connu de Jean-Marie Lehn [7], si l'axe de la complexité caractérise la biologie, l'axe de la diversité et de la créativité, combiné avec l'axe de la complexité, singularise la chimie (figure 2).

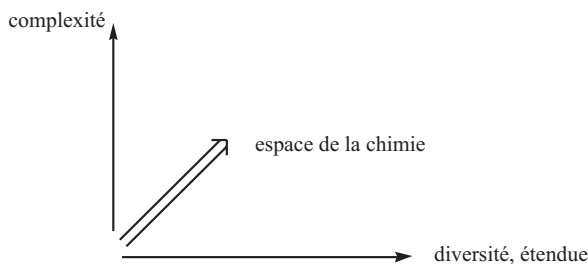


Figure 2 : La chimie entre diversité et complexité.

Dans ce contexte de complexité expérimentale, il est hautement souhaitable de pouvoir disposer d'une **modélisation prédictive**, mais la première fonction de la modélisation en chimie vise à interpréter la richesse expérimentale, à expliquer plutôt qu'à prédire. C'est en dernier recours l'expérimentation qui, dans tous les cas de figure, fonde le savoir. Le **va-et-vient entre modélisation et expérimentation** ajuste en permanence le contenu de ce savoir. Les modèles s'emboîtent et deviennent plus performants au fur et à mesure qu'ils sont capables de répondre à davantage de situations expérimentales mais ils se réfèrent inévitablement à un champ expérimental limité. Toute modélisation ne peut être qu'approchée et révisable. Elle permet difficilement l'accès à la prédiction. La richesse et la complexité expérimentale ne s'accommodent pas comme en physique, d'une modélisation très mathématisée et à fonction aussi prédictive. La modélisation et l'expérimentation entretiennent en chimie, plus qu'ailleurs, un rapport dialectique, un va-et-vient continu. Si en physique on utilise les développements limités nécessaires, au second ordre par exemple, en chimie, dans les domaines mathématisés comme la thermodynamique on utilise plutôt la notion de variable d'écart ou de coefficient d'activité. Cette présentation permet de «coller» à l'expérience tout en renvoyant à une notion cohérente et unifiée comme celle des potentiels chimiques ou de l'énergie potentielle, associée à la fonction enthalpie libre G (cf. l'introduction d'un ouvrage d'enseignement très récent) [10].

Dans ce rapport à l'expérimental, la **part d'imprévu** demeure importante. Comme le souligne P. Laszlo, la chimie n'est pas seulement faite de procédures méthodiques et réfléchies aboutissant à coup sûr au résultat attendu ; elle est aussi le lieu de l'inattendu «*c'est une science expérimentale... qui fait une large part à la découverte fortuite*» [11]. J. Jacques ne dit pas autre chose lorsqu'il évoque la découverte intuitive, subite et inattendue, s'imposant par des voies autres que celles d'un raisonnement construit. Cette découverte heureuse appelée «*sérendipité*» coexiste évidemment avec la découverte plus classique, produit d'un raisonnement et d'une longue patience. Il cite comme exemples de sérendipité la découverte des propriétés analgésiques de l'aspirine ou

encore la synthèse du Téflon ou du polychloroprène. Il ajoute *«cette science [la chimie], consciente de ses limites actuelles comme de ses capacités reconnues, se laisse quotidiennement surprendre»* [12].

Une approche multifactorielle et systémique

L'approche de la chimie, science de la diversité illimitée autant que science de la complexité, ne peut être que multifactorielle. Les paramètres qui contrôlent les espèces en réaction ou plutôt leur sociologie moléculaire sont très nombreux :

- structure spatiale et électronique de la molécule solvatée ;
- interaction espèces-solvant ;
- structure et interactions des réactifs et des substrats ;
- interactions intra- et intermoléculaires ;
- énergie d'activation, enthalpie libre, entropie, etc.

Dans une réaction caractéristique de la chimie organique, la substitution nucléophile S_N , un auteur américain a identifié dix-sept paramètres directeurs [13]. Cela ressemble assez au rôle des douze facteurs de la coagulation sanguine ou au contrôle des équilibres physiologiques homéostatiques tels que la glycémie et la calcémie.

Sans accéder au niveau de complexité des mécanismes biologiques, la chimie nécessite, comme la biologie, la prise en compte globale de ces multiples paramètres et une approche holistique et systémique fondée sur la diversité des interactions. Comme la biologie, mais à un degré un peu moindre, la chimie paraît relever du *«macroscopie»*, instrument utilisant la méthode systémique et adapté à l'infiniment complexe comme le microscope l'est à l'infiniment petit et le télescope à l'infiniment grand [14].

Le poids du langage en chimie

Comme dans les autres disciplines scientifiques, la langue est en chimie le véhicule de la conceptualisation, de la rigueur et de la précision mais s'y ajoute, en propre, des rôles assez spécifiques.

Le langage de la chimie s'apparente à une **véritable linguistique** [11] :

- le langage moléculaire ressemble au langage des mots *«de même que les mots sont des arrangements de phonèmes, les molécules sont des arrangements d'atomes... à la productivité du langage répond la créativité du chimiste de synthèse»* ;
- le récit chimique est métaphorique avec des acteurs invisibles, des pauses très fugaces et un codage incessant du visible par l'invisible, du tangible par le conceptuel.

Le langage joue un **rôle fonctionnel** en chimie :

- la chimie est une science qui doit disposer d'une nomenclature pour décrire des espèces ;
- cette nomenclature a beaucoup évolué depuis les alchimistes en passant par la révolution du langage de 1787 [15]. Le patrimoine expérimental de la chimie a fait coexister une nomenclature d'usage et une nomenclature officielle plus rigoureuse (IUPAC) à la fois pour l'identification des composés et l'identification de leur stéréochimie.

Le langage joue un **rôle symbolique** en chimie avec les aspects suivants :

- un langage sémantique propre (les éléments, les atomes, les molécules, les ions...) ;
- la constante d'Avogadro N_A , opérateur assurant le passage du microscopique au macroscopique ;
- l'équation de réaction permettant de faire le bilan en masse et en volume des réactions chimiques ;
- la représentation des équilibres chimiques ;
- le langage graphique ou pictographique tant au niveau structural et spatial qu'au niveau réactionnel ou intervient le langage des flèches ;
- le langage idéographique et le poids de l'implicite [16].

QUELQUES PALIERS ÉPISTÉMOLOGIQUES CLÉS

L'histoire de ces trois derniers siècles révèle quelques phases clés du développement de la chimie qui peuvent être vues comme des paliers épistémologiques, ou encore des changements de paradigme au sens de Kuhn [5]. Ces jalons sur les chemins de la connaissance en chimie, produits de processus non linéaires et souvent erratiques, illustrent bien son épistémologie.

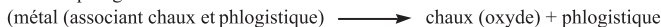
De la théorie du phlogistique à une théorie scientifique de la combustion

Au début du XVIII^e siècle, malgré le développement de la chimie des gaz et des premières machines à vapeur, le feu reste, pour beaucoup de chimistes, l'un des éléments d'Aristote et il manque une théorie scientifique de la combustion.

C'est Stahl qui va énoncer, en 1723, la première théorie cohérente, **la théorie du phlogistique**. Cette théorie devient très populaire et reçoit une très large audience (la «sublime théorie» selon Macquer). Elle donne une nouvelle identité à l'élément feu puisque le principe de l'inflammabilité, le phlogistique (du grec phlogiston : combustible), est répandu intimement dans la matière et s'en échappe à la combustion. Le métal

calciné perd alors son phlogistique et devient chaux tandis que l'air est le solvant du phlogistique (figure 3).

La combustion selon les phlogisticiens :



Dans la r\u00e9action inverse, on repasse d'un corps capable de lib\u00e9rer beaucoup de phlogistique (le charbon par exemple) \u00e0 une chaux m\u00e9tallique l'associant \u00e9troitement dans le m\u00e9tal :



La combustion et le r\u00f4le de l'oxyg\u00e8ne pour Lavoisier (exp\u00e9riences de 1777) :

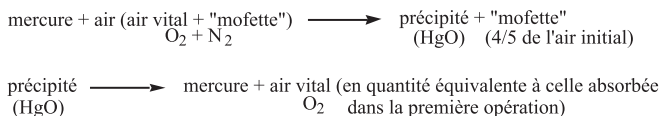


Figure 3 : Combustion et phlogistique.

Entre 1772 et 1777, Lavoisier va proposer une th\u00e9orie de la combustion fond\u00e9e sur des exp\u00e9riences rigoureuses :

- conduite en tube scell\u00e9 la combustion ne donne aucune variation de poids ;
- le m\u00e9tal transform\u00e9 en chaux augmente de poids mais, en m\u00eame temps, celui de l'air du r\u00e9cipient diminue.

Il donne alors son plein sens \u00e0 la d\u00e9couverte r\u00e9cente de l'oxyg\u00e8ne «*l'air du feu*» et consid\u00e8re que l'air atmosph\u00e9rique n'est pas un \u00e9l\u00e9ment mais contient de l'oxyg\u00e8ne, responsable de la r\u00e9action de combustion et de la calcination des m\u00e9taux, et un gaz inerte la «*mofette*» (qui ne prendra le nom d'azote que dans la nomenclature de 1787) (figure 3).

\u00c9mergence des structures et d\u00e9veloppement des synth\u00e8ses

Au d\u00e9but du XIX^e si\u00e8cle le nouveau contexte de la chimie (lois de conservation de la mati\u00e8re, notion d'\u00e9l\u00e9ment d\u00e9barrass\u00e9 du carcan aristot\u00e9licien, th\u00e9orie scientifique de l'oxydation) lui donnait les bases n\u00e9cessaires pour la naissance de la chimie quantitative et la recherche nouvelle d'une interpr\u00e9tation microscopique.

La **th\u00e9orie atomique de Dalton**, \u00e9mise d\u00e8s 1803, allait pourtant mettre plus d'un demi-si\u00e8cle pour s'imposer en Europe (congr\u00e8s de Karlsruhe en 1860) et pr\u00e8s d'un si\u00e8cle pour s'imposer d\u00e9finitivement en France. Elle s'appuyait pourtant sur la loi des proportions d\u00e9finies de Proust qui, \u00e9tablissant clairement en 1806 la distinction entre m\u00e9lange et combinaison chimique ainsi que la constance de composition des combinaisons, signait le v\u00e9ritable **acte de naissance de l'esp\u00e8ce chimique**.

Il est vrai que la querelle entre **atomistes** et **équivalentistes**, qui va durer pratiquement tout le siècle, est typique d'une double approche microscopique et macroscopique qui caractérise la chimie. Les atomistes (Laurent, Wurtz...) s'intéressent avant tout à la structure et à la lisibilité microscopique qui ne dérive pas de l'expérience mais de racines théoriques et abstraites. Au contraire, les équivalentistes sont des expérimentalistes (Berthelot, Sainte-Claire Deville) qui ne s'intéressent pas à cette approche microscopique mais seulement aux rapports pondéraux relatifs, aux *équivalents*.

Il est également vrai que la difficulté de concevoir des molécules gazeuses diatomiques et d'interpréter la loi d'Avogadro-Ampère a constitué une pierre d'achoppement qui n'a été levée qu'au congrès de Karlsruhe par Cannizzaro.

Si le retard apporté à la théorie atomique et à **l'étude des structures** (tétravalence du carbone, structure cyclique du benzène, théorie du carbone tétraédrique) a été tel, c'est aussi parce que le choix avait été fait par certains, tels Berthelot, d'accéder à de nouveaux composés, de privilégier le développement des synthèses. Pour ceux-là, la théorie des équivalents était suffisante pour faire de la chimie expérimentale même si les structures demeuraient inconnues... Il est bien vrai que la synthèse, dès 1856, par Perkin de la mauvéine, premier colorant artificiel, qui allait bientôt être suivie de celle de l'alizarine en 1869 (figure 4), anticipait largement sur les structures.

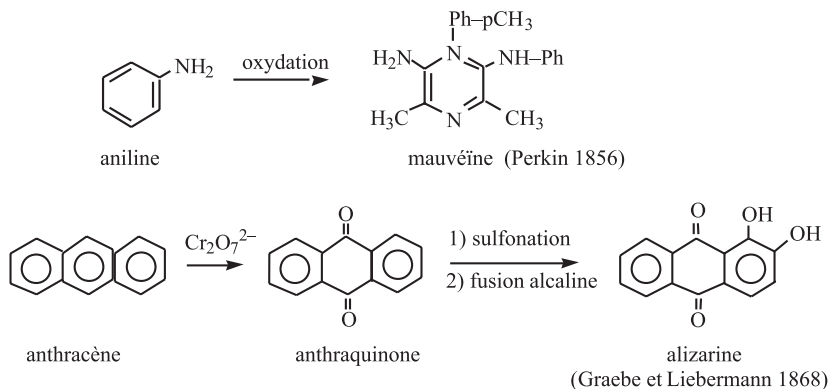


Figure 4 : Les premières synthèses de colorants.

Cette **dualité espèces-structures** est bien d'ailleurs une caractéristique de la chimie dont une nouvelle manifestation se retrouvera à propos de la chimie organique près d'un siècle plus tard (priorité donnée soit aux mécanismes et à la structure spatiale et électronique soit aux nouvelles réactions et à la synthèse).

Des représentations planes à la stéréochimie

La multiplication des synthèses organiques et la recherche de structures amènent les chimistes vers le milieu du XIX^e siècle à rendre compte de la complexité des nouvelles molécules par diverses théories :

- la **théorie des substitutions** de Dumas selon laquelle l'hydrogène peut être remplacé par divers halogènes ce que conteste Berzelius qui, au nom du «dualisme électrochimique» ne peut admettre «*que le chlore, élément électronégatif, puisse se substituer à l'hydrogène électropositif*» ;
- la **théorie des radicaux** de Liebig (nous dirions aujourd'hui des groupes) qui met en œuvre des constituants invariants dans une série de composés ;
- la **théorie des types** de Gerhard qui ramène tous les composés organiques à la substitution de quatre types de composés, H–H, Cl–H, H–OH et H–NH₂.

Les avancées décisives sur ce plan concernent **la valence**. Le terme est introduit par Frankland en 1852 «*the combining-power of the attractive element... is always satisfied by the same numbers of atoms*». La tétravalence du carbone est énoncée en 1858 par Berzelius qui introduit également le terme d'isomérisie pour les substances de même composition et de propriétés différentes.

La représentation des molécules demeure pourtant **plane** alors que les résultats sur l'isomérisie se multiplient :

- Biot observe la rotation de la lumière polarisée en 1813, son application aux solutions organiques en 1815 et l'inversion du sucre (saccharose) en milieu acide en 1832 ;
- après la mise en évidence par Gay-Lussac en 1828 de l'acide racémique, (acide de raisin) appelé plus tard acide paratartrique par Berzelius, Mistscherlich montre en 1844 que les tartrates et paratartrates de sodium et d'ammonium sont isomorphes (même forme cristalline) mais qu'en solution seul le premier est actif ;
- Pasteur fait en 1848 l'expérimentation décisive sur ces sels doubles. Il montre que le paratartrate, à l'inverse du tartrate, ne possède pas de faces hémiedriques orientées dans le même sens. Il sépare sous binoculaire, à la pince, les cristaux droit et gauche du paratartrate et constate que les solutions correspondantes sont actives mais que, réassociées en quantité équivalente, ces cristaux redonnent une solution inactive.

Le phénomène de chiralité, le terme ne sera introduit que trente-cinq ans plus tard par Lord Kelvin, est ainsi mis en évidence à l'échelle macroscopique sur des cristaux mais l'interprétation de l'hémiedrie par les propriétés des molécules elles-mêmes nécessitait le recours à une géométrie moléculaire tridimensionnelle. Cette géométrie est suggérée en 1863 par Wislicénus lors d'études sur l'acide lactique. C'est l'hypothèse du **carbone tétraédrique**, émise en 1874, successivement par Van't Hoff et

Le Bel, qui signera l'acte de naissance de la stéréoisométrie, marquera la rupture avec les formules planes, et permettra l'interprétation féconde, sur une base microscopique, des études stéréochimiques contemporaines et à venir.

Les paradigmes de la liaison chimique

Dans la première moitié du XX^e siècle, l'emboîtement des différents modèles de la liaison chimique, affirmant la spécificité de ces liaisons par rapport au rêve newtonien d'affinités attractives entre particules [4], marquera une nouvelle révolution paradigmatique associée au développement de la chimie.

Le modèle de Lewis de la covalence postule en 1916 la mise en commun d'électrons de liaison avec minimisation de l'énergie de liaison et distinction entre doublets liants et non liants. Ce **paradigme Lewis**, appuyé sur la connaissance de la structure électronique des atomes et la lisibilité du tableau périodique de Mendeleïev, s'avérera dans les années suivantes d'une grande efficacité. Bouleversant la modélisation moléculaire il permettra, par une visualisation simple et cohérente, d'accéder à la distribution électronique sur les différents atomes et de développer les études de mécanismes réactionnels en chimie organique (Ingold, Robinson...) [6].

A partir de 1925, le **paradigme quantique** associé au modèle ondulatoire [6], complètera le modèle précédent et introduira de nouveaux concepts (orbitales atomiques et moléculaires, méthodes LCAO, hybridations des orbitales...). Mathématiquement plus compliqué il permettra, moyennant un certain nombre d'approximations, d'interpréter, de façon plus complète, la mésométrie, la différence entre liaisons π et σ , l'équivalence des liaisons dans les systèmes symétriques... Il sera complété ultérieurement par les règles de symétrie de Woodward-Hoffman et la théorie des orbitales frontières [17] qui seront d'une grande utilité en chimie organique où elles sont à l'heure actuelle très largement utilisées.

Popularisé en 1957 et enseigné dans les universités dès la fin des années 70, le **modèle de Gillespie** apportera un complément géométrique efficace et prédictif dans une vision microscopique à trois dimensions.

Le paradigme milieu

Plus récent, il prend en compte une nouvelle dimension fondamentale, longtemps sous-estimée et pourtant seule en mesure d'expliquer les résultats expérimentaux, qu'on peut appeler la **sociologie moléculaire**. Elle explique que les entités réagissantes, sauf en phase gazeuse très diluée, ne sont jamais isolées.

Particulièrement précieuse pour les réactions en solution, cette vision macroscopique est indispensable pour expliquer le comportement de ces entités, associées en nombre gigantesque entre elles et au solvant. Ce paradigme milieu permet d'interpréter des résultats surprenants sur les forces relatives des acides si l'on s'en tient au seul niveau moléculaire (figure 5) [6][18].

Les forces des couples acide-base dépendent du milieu

1) Certains résultats ne peuvent s'expliquer sur une base strictement moléculaire :

(CH₃)₂CH-CH₂COOH est plus fort que CH₃COOH en dessous de 16 °C

(CH₃)₂CH-COOH est plus fort que CH₃CH₂COOH en dessous de 46 °C

2) L'étude thermodynamique en fonction de T montre que le terme $T\Delta S^\circ$ est déterminant et la variation de ΔH° inverse de celle attendue sue la base de l'effet inducteur.

3) À partir de 1965 les mesures en phase gazeuse se multiplient et donnent des résultats paradoxaux :

– le méthanol est plus acide que l'eau ;

– l'évolution des pK_a de l'acide éthanoïque, diversement substitué est l'inverse de celui observé en phase aqueuse

acide	pK_a (aq)	pK_a (gaz)	$(\Delta H^\circ - \Delta H^\circ_{\text{ref}})_{\text{(gaz)}}$ en kJ mol ⁻¹
CH ₃ COOH (ref)	4,75	130	0
BrCH ₂ COOH	2,90	119,4	- 60,6
ClCH ₂ COOH	2,87	120,4	- 54,8
FCH ₂ COOH	2,59	122	- 45,6

Figure 5 : La force des acides organiques et les effets de milieu.

Les interactions de milieu jouent actuellement un rôle tout aussi important dans le passage de la sociologie moléculaire du couple en phase homogène, par exemple le couple acide-base, à la sociologie moléculaire du groupe en phase hétérogène (milieux liquides organisés comme dans les produits tensioactifs [19], micelles et agrégats, catalyse par transfert de phase, nanoréacteurs [20]).

On peut rattacher à ce domaine ce qui relève de la notion d'**ingénierie moléculaire**, c'est-à-dire du contrôle de l'architecture et de la fonction de supermolécules, polymères ou matériaux :

- assemblages auto-organisés de J.-M. Lehn comme les complexes métalliques en doubles et triples hélices ou les réseaux inorganiques ;
- greffage de sites fonctionnels sur les protéines ;
- réalisations d'objets spécifiques dans le domaine des matériaux comme des électrodes, des sources laser ou encore des aimants moléculaires [21].

DES ENJEUX DIDACTIQUES SIGNIFICATIFS

Une véritable autonomie didactique

L'autonomie didactique de la chimie apparaît très nettement par rapport aux disciplines voisines car elle se fonde sur des caractéristiques propres déjà mentionnées :

- *Une dialectique modélisation-expérimentation* sans doute plus forte qu'en physique, à cause, d'une part, de la grande diversité expérimentale des réactions chimiques et, d'autre part, d'un rapport aux mathématiques moins accentué et moins abstrait ;
- *Une diversité descriptive* des différentes espèces, moins forte qu'en biologie car les interactions dans le champ de la chimie moléculaire ou supramoléculaire sont moins complexes et moins rétroactives que les interactions dans le champ des mécanismes ou des régulations physiologiques ;
- *Un statut du modèle* plus explicatif que prédictif car, très assujéti à la diversité expérimentale, le modèle montre plus souvent ses limites ou son caractère provisoire.

Les stratégies d'apprentissage doivent évidemment tenir compte de cette autonomie didactique et de cette nécessité de gestion de la diversité. Elles doivent s'appuyer sur l'expérimental, comme le prouvent les nouveaux programmes du secondaire, mais également mobiliser des raisonnements qualitatifs ou analogiques dans lesquels l'intuition et le bon sens permettent une mise en ordre de l'empirique.

La mise en œuvre d'une approche globale et systémique, assez voisine de celle de la biologie, nécessite le recours à des raisonnements multifactoriels et la mise à l'écart du raisonnement linéaire causal isolant arbitrairement une seule variable.

La dualité microscopique-macroscopique

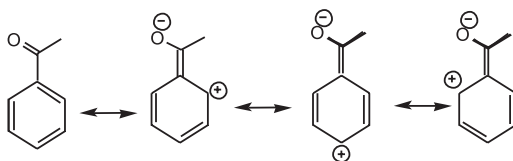
Cette dualité constitue l'une des difficultés didactiques majeures de la chimie. La modélisation microscopique est toujours associée à la dualité-espèces-structures, mais la chimie, science expérimentale par excellence, met au premier plan les phénomènes observables, le niveau macroscopique. **La dialectique microscopique-macroscopique ou modélisation-expérimentation** est ainsi une caractéristique épistémologique autant qu'une nécessité didactique : la compréhension profonde des observables macroscopiques et des données quantitatives passe nécessairement par des représentations pertinentes de leurs aspects microscopiques.

Les enseignants se déplacent facilement et continûment entre ces niveaux microscopique et macroscopique et doivent exercer une attention vigilante face à cette difficulté didactique en indiquant tout changement de niveau et en mettant en relation ces deux niveaux, de façon explicite, le plus souvent possible [22].

La mobilisation psycho-cognitive, la capacité d'abstraction, le niveau de pensée formelle nécessaires sont souvent sous-estimés au lycée comme à l'université. Nous avons pu vérifier en premier mais également en second cycle universitaire, à l'aide de questionnaires et de tests, les difficultés importantes liées à cette dualité [23].

L'étude des mécanismes réactionnels en chimie organique se fait par une entrée essentiellement microscopique. L'enseignant fait traditionnellement une présentation et une lecture des entités isolées en cherchant à localiser, sur le substrat séparé de son environnement, les charges partielles et les sites de réactivité, nucléophiles ou électrophiles. La symbolique des flèches modélise ensuite les transferts d'électrons et conduit l'étudiant à penser, si l'enseignant n'y prend garde, que l'espèce «réactif» choisit un seul substrat-cible, en un lieu bien localisé et prévisible à l'avance. Nous avons expérimenté cette conception anthropomorphique, ce «syndrome du réactif intelligent» qui sait à l'avance où il doit frapper, au mépris des aspects cinétiques ou thermodynamiques [23] (figure 6).

Dans les substitutions électrophiles S_E , si on examine, par exemple, l'effet d'orientation du carbonyle, l'entrée strictement moléculaire permet d'écrire les formules limites suivantes :



Les étudiants arrivent ainsi à penser, très logiquement, qu'un électrophile E^+ ne sera attaqué que par les sites moins électrophiles, c'est-à-dire les sites en *méta* à l'issue d'une sorte de *téléguidage*

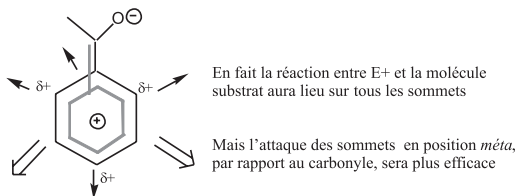


Figure 6 : Le syndrome du réactif intelligent.

Dans l'étude de la stéréochimie, l'entrée est à la fois microscopique et macroscopique. L'analyse tridimensionnelle des molécules se fait au niveau microscopique tandis que les propriétés de la chiralité, le pouvoir rotatoire en particulier, ne peuvent être examinées qu'au niveau macroscopique. Les deux niveaux sont rarement mis en confrontation et les étudiants ont ainsi beaucoup de mal à percevoir, par exemple, que le (2*R*, 3*S*)-dibromobutane est un composé *méso* dont seulement une conformation

décallee et une conformation éclipsée, au demeurant la plus improbable, sont achirales (figure 7). Si ces composés sont globalement dépourvus de pouvoir rotatoire, c'est parce que les conformations chirales, de même énergie, sont chaque fois en compensation racémique parfaite [24].

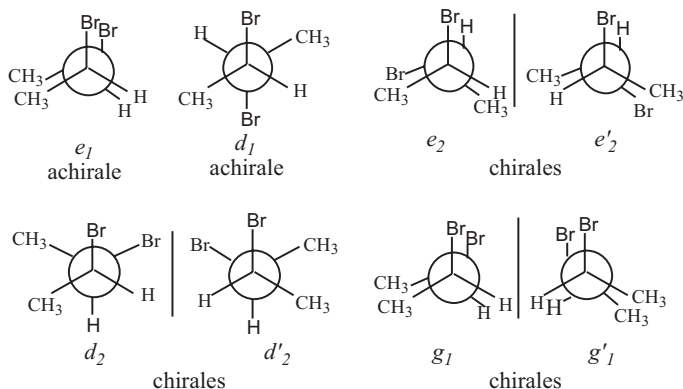


Figure 7 : Le 2,3-dibromobutane méso.

L'étude des mélanges gazeux se fait au contraire, le plus souvent, par une entrée macroscopique (pression et volume reliés par l'équation d'état des gaz parfaits) sans considération microscopique suffisante (grande distance des molécules entre-elles). Des tests passés auprès d'étudiants de première année de DEUG, au premier comme au second semestre, montrent que près de la moitié d'entre eux considèrent que la pression et le volume dans un mélange gazeux sont régis par des lois similaires d'additivité. Ils en concluent que chaque gaz occupe une partie seulement du mélange, celui correspondant à sa proportion dans le mélange [23].

Ces résultats sont beaucoup moins surprenants si on les réfère à la difficulté qu'ont eu les premiers atomistes à intégrer la loi d'Avogadro-Ampère sur les volumes gazeux et à conceptualiser la notion d'espèce et de molécule gazeuse. Ces résultats témoignent aussi de la difficulté qu'ont les étudiants à évoquer des images mentales relatives aux gaz et à leur modèle particulière (représentation des molécules isolées et de leur distance, équilibre d'évaporation liquide-gaz à toute température).

Les équilibres chimiques sont également souvent étudiés expérimentalement, à partir d'une entrée macroscopique correspondant à la situation d'équilibre. Cette stationnarité macroscopique occulte fréquemment, dans l'esprit des élèves et des étudiants, la dynamique moléculaire des réactions directes et inverses qui se poursuivent à

des vitesses devenues égales. Dans le cadre d'un travail de DEA relatif à des étudiants de seconde année de DEUG, nous avons pu vérifier l'impact de cette entrée macroscopique [25] :

- un tiers seulement des étudiants donnent une description dynamique et microscopique de l'équilibre chimique ;
- un quart sont sous la pesanteur de la stœchiométrie (privilège fort à l'écriture de l'équation de réaction dans le sens direct, relation obligatoirement simple, selon nombres entiers ou égalité, entre quantités de réactif et de produits à l'équilibre).

L'affinité chimique

L'affinité chimique peut être définie comme la tendance ou l'aptitude de deux corps à s'unir. C'est un concept qui a beaucoup évolué dans l'histoire après un long détour par la théorie de l'affinité newtonienne (forces d'attraction entre les masses analogues aux forces de gravitation) et qui s'est clarifié grâce à la définition de De Donder toujours d'actualité ($A = \sum_i \nu_i \mu_i$) [26]. Ce concept, lié à l'aspect évolutif irréversible de la réaction chimique, pose de nombreux problèmes didactiques :

- les étudiants, qui s'interrogent sur ce qui gouverne la réaction chimique ont tendance à penser qu'elle a deux moteurs (à pression constante, l'enthalpie et l'entropie, liées par l'expression $\Delta_r G = -A = \Delta_r H - T\Delta_r S$), alors que l'entropie est le moteur unique de la réaction et ne peut que croître, pour l'ensemble système + environnement, au cours d'une transformation spontanée [27] ;
- il est alors difficile d'admettre qu'une réaction chimique spontanée puisse être associée à une diminution d'entropie ;
- cette diminution intervient lorsque la réaction fait passer d'une phase gazeuse à une phase condensée (synthèse de l'eau) ou dans certaines réactions biochimiques et cette diminution est alors surcompensée par échange de chaleur avec l'environnement ;
- la confusion entre l'enthalpie H et l'enthalpie libre G est toujours menaçante et, par là même, la difficulté à ne pas considérer les réactions exothermiques comme des réactions obligatoirement spontanées (il est vrai qu'il y a d'illustres exemples historiques, cf. controverse Berthelot-Duhem).

La modélisation dogmatique

Dans une discipline où le nombre d'espèces s'accroît chaque jour, les limites expérimentales de toute modélisation apparaissent rapidement. Le souci didactique de simplification et de structuration d'une réalité complexe peut alors conduire, à partir de situations types, à la généralisation hâtive d'une modélisation établie dans un champ expérimental limité. Un tel **modèle réductionniste** prend alors trop de distance avec le savoir-savant et peut conduire à des prévisions erronées et dogmatiques.

Un exemple typique est celui du modèle du carbocation, utilisé dans les additions électrophiles (A_E) des halogénures d'hydrogène (HX) sur les alcènes, et conduisant aux fameuses règles de Markownikov. Ce modèle largement utilisé dans le savoir à enseigner, traduit par les manuels de chimie, ne peut expliquer de nombreux faits expérimentaux (addition anti-Markownikov, stéréosélectivité, cinétique d'ordre variable, différences entre solvants polaires et apolaires...) [28]. Les conséquences d'une telle transposition didactique sont que l'étudiant ne retient pas la précarité du modèle mais se constitue un dogme qu'il applique en toute circonstance. De nombreux autres exemples d'une telle modélisation dogmatique ont été recensés au laboratoire [6]. Précisons qu'il s'agit d'une situation expérimentée en France.

Le structuralisme désincarné

Après une longue période descriptive, l'enseignement de la chimie est entré, au début des années 60 et avec du retard sur de nombreux pays, dans une phase nécessaire de rationalisation. Par un inévitable effet de balancier, l'accent a alors été mis sur l'étude des structures et des mécanismes réactionnels, sur les enchaînements logiques, au détriment de la connaissance des espèces chimiques et de leur diversité.

Un véritable obstacle didactique, directement issu de la **dualité structure-espèces** est ainsi apparu.

Il est évidemment hors de question de nier la fécondité des relations structure-réactivité et leur intérêt dans l'enseignement : la connaissance de la structure moléculaire ou ionique, de la structure spatiale, de la structure électronique des réactifs permet de modéliser et de prévoir les différents types de réactivité. Mais, dans le même temps, les enseignants ont pu vérifier la connaissance souvent insuffisante, par leurs étudiants, de l'identité des espèces et de la diversité de leurs propriétés. Ce déficit entraîne une étude des structures qui tourne à vide de façon désincarnée et débouche sur une sorte de **syntaxe sans vocabulaire** dont le risque immédiat est le dogmatisme. Citons à titre d'exemples les champs d'étude suivants :

- mécanismes réactionnels en chimie organique avec méconnaissance des molécules de base ;
- force relative des couples redox avec méconnaissance des activateurs ou inhibiteurs cinétiques ;
- validité de la règle de l'octet sans considération de la réactivité des gaz rares.

La confusion langagière

Le poids du vocabulaire est particulièrement lourd en chimie. D'une part, l'identification des espèces chimiques et de leurs structures nécessite une double nomenclature

très précise : la nomenclature conventionnelle et la nomenclature d'usage. D'autre part, les progrès de la conceptualisation vont également de pair avec une exigence de précision du langage. Dans les deux cas, l'enseignement de la chimie doit donc disposer d'un langage non ambigu, permettant d'éviter les sens multiples.

Les confusions langagières, source de lourdes difficultés didactiques, sont pourtant nombreuses en chimie :

- polysémie de l'expression «équilibrer une réaction» ne permet pas de distinguer l'équilibre chimique et l'équation de réaction «égalisée» (disposant des bons coefficients stœchiométriques) [22] ;
- polysémie de l'expression «réaction réversible» qui ne permet pas de distinguer la transformation thermodynamique réversible et la réaction renversable (l'équilibre chimique) [22] ;
- expression des grandeurs thermodynamiques par rapport à une réaction référence ambiguë plutôt que par rapport à l'avancement d'une mole de réaction ;
- signe variable des enthalpies de liaison qui ne distingue pas clairement liaison et dissociation ;
- transfert d'électrons à partir des charges et non des doublets dans la modélisation par flèches en chimie organique.

Pour limiter le poids de l'implicite, déjà souligné plus haut, et pour faire disparaître de telles confusions, une clarification langagière est urgente et constitue un enjeu didactique de tout premier plan. Cette clarification, d'ores et déjà engagée en thermodynamique [29], doit être poursuivie.

CONCLUSION

Nous espérons avoir pu convaincre que l'espace épistémologique bien circonscrit de la chimie ne peut que donner un fort sentiment d'appartenance disciplinaire aux chimistes. Notre actuel ministre de l'Éducation nationale et de la Recherche n'est pas le dernier à montrer que la chimie est une discipline riche, créatrice et novatrice [30]. Il est incontestable que **son image sociale auprès du public comme son image didactique auprès des étudiants se redresse**. Dans la filière de formation des enseignants de sciences physiques (licence et maîtrise de sciences physiques où coexistent physique et chimie en volume égal) nous avons pu observer, à Grenoble, que la préférence disciplinaire évolue actuellement, de façon continue, en faveur de la chimie. De même, des enquêtes d'opinion sur l'intérêt pour les disciplines scientifiques, à l'arrivée à l'université, nous ont montré que la chimie est mise à un haut niveau en sciences de la matière et, plus encore en sciences de la vie. Le succès des Olympiades de la chimie, qui ne se dément pas, est là pour prouver qu'il s'agit d'une évolution profonde. Pour autant, la

chimie ne pourra jamais s'affranchir d'une caractéristique majeure, celle de devoir **modéliser une grande diversité** : la richesse expérimentale de la chimie est infinie, son pouvoir de création de nouvelles espèces est sans limite et la dialectique modélisation-expérimentation ne peut que rendre précaire tout modèle.

La nécessité pour le chimiste de posséder une double culture du microscopique et du macroscopique doit aussi permettre de mieux intégrer le poids des conditions de milieu et l'aspect sociomoléculaire lié aux interactions faibles de Van der Waals. L'étudiant ainsi confronté à l'exigence de **globalisation et d'approche systémique** a du mal à distinguer les paramètres directeurs correspondant aux conditions expérimentales. Du coup, la réponse de circonstance lui paraît souvent supplanter la rigueur. Au plan didactique cette difficulté est amplifiée par le cloisonnement des enseignements (structure de la matière, thermochimie, cinétique, chimie organique...) qui entraîne chez l'étudiant le cloisonnement des savoirs, rangés dans des tiroirs étanches. Le décroisonnement des savoirs prôné par Edgard Morin, président du comité scientifique sur la consultation lycéenne de l'année scolaire 1997-1998, est particulièrement à l'ordre du jour en chimie.

De fait, la chimie, jugée difficile, désarçonne beaucoup d'étudiants qui ont apprécié l'ouverture sur la vie des nouveaux programmes du secondaire mais qui ont du mal à passer d'une culture « attrape-tout » à la mise en œuvre de la démarche scientifique adaptée.

La didactique de la chimie a ainsi devant elle un vaste chantier. Nous espérons que cet article aura pu montrer que ce chantier mérite d'être investi par beaucoup de chimistes enseignants-chercheurs et que les défis à relever sont à la hauteur de la richesse de cette discipline.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] P. CARO : « *Ferreux, ferrique, réflexions sur la vulgarisation de la chimie* » - Actes X^{es} JIREC, Grenoble, **1993**, pp. 21-27.
- [2] F. MATHEY : « *Plaidoyer pour l'enseignement de la chimie* » - Culture et Technique - **1991**, pp. 165-171.
- [3] J. JACQUES : « *Berthelot, autopsie d'un mythe* » - Le Seuil, Paris, **1987**.
- [4] B. BENSUADE-VINCENT et I. SENGERS : « *Histoire de la chimie* » - La Découverte, Paris, **1993**.
- [5] S. KUHN : « *La structure des révolutions scientifiques* » - nouvelle édition, Flammarion, Paris, **1983**.

- [6] A. LOUMOUAMOU : «*Contribution à la transposition didactique en chimie organique*» - Thèse, Grenoble, **1998**.
- [7] J.-M. LEHN : «*La chimie supramoléculaire, concepts et perspectives*» - De Boeck Université, Paris, **1997**.
- [8] O. SOUDANI : «*Statut et perception de l'enseignement expérimental en sciences physiques au collège*» - mémoire de DEA, UJF, **1995**.
- [9] D. ARMAND : «*La chimie dans la société*» - Biarritz 23 mars **1994**.
- [10] R. GABORIAUD : «*Thermodynamique, éléments fondamentaux de l'énergétique et de la cinétique chimique*» - Ellipses, Paris, **1998**.
- [11] P. LASZLO : «*La parole des choses*» - Hermann, Paris, **1993**.
- [12] J. JACQUES : «*L'imprévu ou la science des objets trouvés*», Odile Jacob, Paris, **1990**.
- [13] J.-F. BUNNET : cité dans «*Introduction to nucleophilicity*» in «*Nucleophilicity*», Advances in chemistry series, Washington DC, **1987**.
- [14] J. de ROSNAY : «*Le macroscopie*» - Le Seuil, Paris, **1974**.
- [15] A. LAVOISIER, C.L. BERTHOLLET, L.B. GUYTON DE MORVEAU et A.F. de FOUCROY : «*Méthode de nomenclature chimique*» - Le Seuil, Paris, **1994**.
- [16] G. OURISSON : «*Le langage universel de la chimie : les idéogrammes, ambiguïté et laxismes*» - L'Actualité Chimique, 1986, 1-2, pp. 41-45.
- [17] NGUYEN TRONG ANH : «*Orbitales frontières, manuel pratique*» - InterÉditions - CNRS Éditions, **1995**.
- [18] S. DAVID et C. MESNIL : «*A propos de l'ionisation aqueuse des acides carboxyliques : une révision nécessaire dans les manuels de chimie organique*» - L'Actualité Chimique, **1985**, 3, pp. 65-69.
- [19] A. LATTÈS et I. RICO : «*La sociologie moléculaire et les produits tensioactifs*» - Pour la Science, **1992**, 173, pp. 44-50.
- [20] M.P. PILENI : «*Des microréacteurs intelligents : des nanoréacteurs*» - Revue du Palais de la Découverte, vol. 26, **1998**, pp. 37-49.
- [21] «*Les matériaux inorganiques*» - L'Actualité Chimique, **1998**, 3, pp. 5-35 ;
«*Architecture et matériaux*» - L'Actualité Chimique, **1996**, 7, pp. 62-101.
- [22] R. BARLET et D. PLOUIN : «*L'équation-bilan en chimie, un concept intégrateur source de difficultés persistantes*» - Aster, **1994**, 18, pp. 27-5.
- [23] R. BARLET et D. PLOUIN : «*La dualité microscopique-macroscopique un obstacle sous-jacent aux difficultés en chimie dans l'enseignement universitaire*» - Aster, **1998**, 25, pp. 143-174.

- [24] R. BARLET : «*Les composés méso un vrai problème d'enseignement*» - L'Actualité Chimique, **1998**, 6, pp. 34-37.
- [25] J.-M. CHAUBET : «*Les équilibres chimiques : difficultés didactiques et dualité microscopique-macroscopique*» - mémoire de DEA, UJF, **1992**.
- [26] M. GOUPIL : «*Du flou au clair, histoire de l'affinité chimique*» - Éditions du Comité des Travaux Historiques et Scientifiques, Paris, **1991**.
- [27] F. ROUQUÉROL et M. LAFFITTE : «*Le moteur des réactions chimiques*» - BUP n° 704, **1988**, pp. 559-565.
- [28] R. LE GOALLER et A. LOUMOUAMOU : «*Les statuts du savoir et la transposition didactique en chimie organique*» - L'Actualité Chimique, **1997**, 3, pp. 12-18 et 4, pp. 18-24.
- [29] A. MARCHAND et A. PACAULT : «*La thermodynamique mot à mot*» - De Boeck Université, Paris, **1995**.
- [30] C. ALLÈGRE : «*La défaite de Platon*» - Le Seuil, Paris, **1997**.