



HAL
open science

Introduction. Questions d'ontologie

Sacha Loeve, François Pépin

► **To cite this version:**

Sacha Loeve, François Pépin. Introduction. Questions d'ontologie. Bernadette Bensaude-Vincent; Richard-Emmanuel Eastes. Philosophie de la chimie, De Boeck Supérieur, pp.205-208, 2020, Philosophie des sciences, 978-2-8073-0566-3. halshs-04483814

HAL Id: halshs-04483814

<https://shs.hal.science/halshs-04483814>

Submitted on 1 Mar 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

PARTIE 3 : ONTOLOGIE

Coordination :
Sacha LOEVE & François PEPIN

CHAPITRE I. INTRODUCTION

CHAPITRE II. MATIERE, MATIERES, MATERIAUX

- II.1. Le chimiste sceptique (Robert Boyle)
- II.2. Esprit de physique et esprit de chimie (Bernard Le Bovier de Fontenelle)
- II.3. L'hétérogénéité des matières (Denis Diderot)
- II.4. L'irréductibilité des qualités (Emile Meyerson)
- II.5. Des réseaux de dispositions (Joachim Schummer)
- II.6. Matière ou matériaux ? (Bernadette Bensaude-Vincent)

CHAPITRE III. SUBSTANCES ET RELATIONS

- III.1. Table des rapports (Etienne-François Geoffroy)
- III.2. Sur les rapports de différentes substances en chimie (Bernard Le Bovier de Fontenelle)
- III.3. La table des rapports ou affinités (*L'Encyclopédie*)
- III.4. La chimie dans l'idéalisme allemand (Mai Lequan)
- III.5. Substance en métachimie (Gaston Bachelard)
- III.6. L'étoffe des choses : une approche phénoménologique (Jens Soentgen)

CHAPITRE IV. ATOMES, CORPS SIMPLES, ELEMENTS

- IV.1. Définition de l'élément comme corps simple (Antoine Lavoisier)
- IV.2. Élément *versus* corps simple (Dimitri Mendeleïev)
- IV.3. L'élément, notion idéologique (Georges Urbain)
- IV.4. L'élément, substance métaphysique (Friedrich Paneth)
- IV.5. L'élément, irrationnel réel (Emile Meyerson)
- IV.6. L'alphabet de la chimie (Richard-Emmanuel Eastes)

CHAPITRE V. MIXTE ET COMPOSE

- V.1. L'eau sucrée (Pierre Duhem)
- V.2. La mixtion (Aristote)
- V.3. Mixte et agrégat (Gabriel-François Venel)
- V.4. Encadré sur l'émergence (Jean-Marie Lehn)
- V.5. Emergence et création d'inconnu. Pour une repolitisation de l'ontologie (Jean-Pierre Llored)

CHAPITRE VI. INTERFACES, SURFACES, INTERACTIONS

- VI.1. Inépuisables surfaces (Mathias Grote)
- VI.2. Les particularismes ontologiques de la chimie (Jean-Pierre Llored)

CHAPITRE I

INTRODUCTION

QUESTIONS D'ONTOLOGIE

L'ontologie de la chimie s'intéresse à la question des modes d'existence des êtres chimiques. Que sont-ils, qui sont-ils, que font-ils ? Quel monde construisent-ils et avec quels concepts le qualifier ? « La chimie crée son objet », affirmait Marcellin Berthelot¹, mais quel(s) genre(s) d'objet, voire de monde crée-t-elle ?

Cette introduction vise à reconstituer la trame historique et conceptuelle des problèmes d'ontologie chimique. Chaque partie de cette section rassemble des textes qui proposent autant de traitements différents d'un même problème. Dans chacune de ces parties, les textes sont généralement organisés selon un ordre chronologique, ceci pour plusieurs raisons.

La première est didactique : il s'agit avant tout de restituer la construction des problèmes, la manière dont ils se sont posés.

La seconde tient à un caractère constitutif de l'ontologie de la chimie : son historicité et sa part irréductible de contingence. En effet les innombrables substances et réactions chimiques identifiées aujourd'hui ne sont pas le pur produit d'une nécessité abstraite. Non seulement leurs *conditions* d'existence sont le fruit d'une histoire de la nature, cosmique, stellaire, géologique, biologique et humaine, qui aurait pu se dérouler autrement², mais leurs *modes* d'existence sont des composites d'histoire naturelle et d'histoire sociale, de processus et de procédés, de curiosité théorique et de pressions économiques. En cela, l'ontologie de la chimie ne saurait s'identifier à un système anhistorique. Elle raconte une histoire.

Enfin parce qu'il faut prendre à lettre les chimistes quand ils disent « caractériser » – et non définir – des substances, c'est-à-dire révéler leurs caractères à travers des épreuves et des histoires. Tels des protagonistes de récit, les êtres chimiques font des choses, réagissent, se combinent, inscrivent leur ontogenèse contingente dans des histoires³. L'ontologie de la chimie ne saurait donc être une ontologie *a priori*, une ontologie générale « appliquée » à la chimie : elle doit partir des « produits de réaction »⁴.

Dès lors, il s'agit de montrer comment la chimie a pu inspirer la philosophie en lui fournissant des concepts (comme élément, analyse et synthèse⁵) ou en les remettant à l'ouvrage (comme le concept de substance) ; comment elle a pu aussi distordre les grandes traditions de l'ontologie philosophique ou s'en émanciper pour « créer son objet » en esquissant une ontologie idoine, une ontologie chimique. Nous voudrions ainsi rendre à la chimie ce qu'elle a été – et peut encore être – pour la philosophie : une source d'innovation

¹ Marcellin Berthelot, *La chimie organique fondée sur la synthèse*, Paris : Mallet-Bachelier, 1860, p. 275. (texte 1.II.3 « La chimie crée son objet »).

² Voir textes 1.IV.1.b, « La chimie, une histoire à raconter » et 1.IV.3, « Les trois parenthèses enchantées de la chimie sur Terre ».

³ Les étapes de la formation d'une substance étaient d'ailleurs souvent nommés « histoire chimique » (sur le modèle de l'« histoire naturelle ») jusqu'au début du XX^e siècle dans les comptes rendus des classes de chimie des académies. Par exemple : « Histoire chimique de l'acide succinique », « Histoire chimique des houilles du département de l'allier », ou encore la célèbre *Histoire chimique d'une bougie* de Michael Faraday (1860).

⁴ Formule d'Emile Meyerson pour qualifier sa philosophie de l'intellect.

⁵ Voir par exemple la reprise des concepts chimiques d'analyse, de synthèse et d'affinité chez Kant ou la manière dont la chimie inspire la *Naturphilosophie* de Schelling (texte 3.III.4, « La chimie dans l'idéalisme allemand »).

conceptuelle, mais aussi d'altérités et de défis, qui lui offrent sans cesse de nouvelles *matières* à penser.

Matière, matières, matériaux

De quel genre d'être relèvent les choses chimiques ? La réponse chimique à la sempiternelle question *quid* (« qu'est-ce que c'est ? ») se démarque des deux grandes traditions qui, historiquement, l'ont structurée : i) le traitement scolastique de la « quiddité » hérité d'Aristote ; ii) son traitement mécaniste par les fondateurs de la science moderne. La perspective chimique a constitué une tierce tradition, et celle-ci continue d'interroger d'une manière singulière l'être des choses.

Dans la tradition héritée d'Aristote, la question « quid » ouvre à la recherche d'une essence stable et connaissable. Si toute réalité physique est composée de *matière* et de *forme*, couple fondamental de l'ontologie, l'essence est déterminée par cette dernière⁶. La tradition scolastique a ensuite largement prolongé cette prééminence de la forme, distinguée de la matière⁷. La forme d'une substance est ce qui fait qu'elle est ceci plutôt que cela (plomb plutôt qu'or). Même si la matière est substrat, on ne la connaît que par la forme. Ainsi, la matière première, ou matière sans forme, est un *non être* en un double sens : sans forme qui la spécifie, elle n'est rien (rien de particulier donc rien en soi), et sans forme pour l'identifier, elle ne peut être nommée.

La philosophie moderne a pour une large part rompu avec ce schéma, notamment dans la tradition cartésienne. Le couple matière/forme fait place à une caractérisation mécanique des propriétés physiques de chaque portion de matière. La matière d'un corps se ramène à son extension (à la place qu'elle occupe dans l'espace) et se caractérise par ses coordonnées spatiales, nombre, figure et mouvement.

Quel rapport la chimie entretient-elle avec ces manières de traiter l'ontologie ? Dans la tradition aristotélicienne, la chimie, qui s'occupe bien davantage de la matière que de la forme, ne peut avoir de réelle place. Certes, les alchimistes médiévaux s'appuient sur la doctrine des quatre éléments (air, terre, eau, feu) supports de qualités (les couples chaud/froid et sec/humide d'Aristote) combinés à des principes comme la combustibilité, la fusibilité et la solidité ; ils manipulent dès lors des *qualités*, les séparent par analyse, les déplacent vers un autre corps, sans les traiter comme des substances dotées d'une essence stable. Pour un alchimiste, un métal, par exemple, n'est pas un corps doté d'une forme substantielle fixe, il est un état ou un degré (sur l'échelle de perfection allant jusqu'à l'or) et un mélange particulier de principes (mercure, soufre puis, à partir de la fin du Moyen-âge, sel). Deux ontologies du qualitatif s'affrontent donc, l'une axée sur une définition traditionnelle de la substance caractérisée par une essence fixe, l'autre inspirée par un travail actif de transformation des substances.

En un sens, la rupture cartésienne fut l'occasion d'un changement de statut pour la chimie. Mais ce fut au prix d'un usage très libre voire stratégique de son régime explicatif. En effet, au sens strict, il ne peut y avoir de chimie autonome dans la pensée cartésienne⁸ : les objets de la chimie relèvent de la physique universelle, qui les réduit à leur figure géométrique (microscopique). Pourtant, en Angleterre avec Boyle, en France avec les chimistes de l'Académie Royale des Sciences de Paris, un usage des explications corpusculaires promues par Descartes a permis à la chimie de caractériser ses objets tout en préservant leur spécificité.

⁶ Aristote, *Physique*, II.

⁷ Joachim Schummer, "Matter versus form, and beyond" In: Ruthenberg, K., van Brakel, J. (eds.) *Stuff. The nature of chemical substances*, pp. 3–18. Würzburg, Königshausen & Neumann (2008).

⁸ Bernard Joly, *Descartes et la chimie*, Vrin, 2011.

A l'époque, la mode du cartésianisme est si prégnante⁹ que l'inflexion par rapport à Descartes n'est pas proclamée haut et fort, mais elle est profonde : les explications corpusculaires ne réduisent pas les objets chimiques à leur prétendue figure (ronde, pointue, ou diversement tarabiscotée...), elles éclairent, après coup, leurs propriétés et leurs interactions dans certaines opérations chimiques. La dimension qualitative de la pratique chimique n'est aucunement annulée dans la pratique des chimistes postcartésiens. Elle se retrouve dans la caractérisation des propriétés effectives des substances, que les chimistes des XVII^e et XVIII^e siècles formulent toujours en termes de principes ou d'éléments. Si ces derniers peuvent être représentés sous la forme de corpuscules figurés, cette représentation est un outil, une fiction utile, non une réduction ontologique : elle aide le chimiste à concevoir et présenter les processus causaux à l'œuvre au laboratoire et, en particulier dans la chimie d'inspiration newtonienne, à déterminer l'échelle pertinente des forces en jeu dans les rapports entre les corps¹⁰.

En outre, ces chimistes ne cherchent pas à faire dériver les objets sur lesquels ils travaillent d'une ontologie universelle. Contrairement à Descartes, ils les prennent tels qu'ils se manifestent, sans les déduire de la matière en général. Même Boyle, qui considère chaque corps comme une certaine « texture » de matière universelle, s'intéresse avant tout aux propriétés individuelles¹¹. Loin de traiter les corps comme des modifications de la matière universelle, les chimistes les plus mécanistes, tels Nicolas Lémery, utilisent la figure et le mouvement comme des outils pour se repérer dans le pluriel des substances individuelles.

Quant aux chimistes rejetant les explications mécanistes, comme Gabriel-François Venel ou Guillaume-François Rouelle, ils renforcent cette ontologie plurielle. Si matière il y a, elle ne peut être qu'hétérogène : telle est la leçon que tire Diderot de la pratique et de la théorie de ces chimistes. Une diversité irréductible de substances en interaction compose l'univers des chimistes. La matière, ce sont en fait *des* matières qui se combinent, agissent les unes sur les autres, produisent et modifient tout ce qui existe¹². La science des matériaux, qui se constitue au XX^e siècle aux interfaces entre physique et chimie, science et industrie, échelles micro et macro, consacre ce primat du pluriel et de l'individuel¹³.

Plus encore que les réponses des chimistes aux questions ontologiques, c'est leur *manière* nouvelle et subversive de poser la question de l'être qui retient l'attention. Au lieu de chercher une essence fixe aux êtres, les chimistes interrogent le comportement effectif des substances et leurs manières d'être les unes par rapport aux autres. La question *quid* n'est plus l'unique question ontologique ni la priorité en chimie. Ce serait plutôt : « qu'en est-il ? », « qu'est-ce que cela *fait* » ? La chimie invite alors à prendre les choses, non telles qu'elles sont concevables par notre esprit, mais telles qu'elles se comportent effectivement dans la nature et au laboratoire. Il ne s'agit plus de trouver une essence connaissable satisfaisant une recherche théorique de l'intelligible, mais de s'ouvrir à un ensemble de relations opérationnelles où les « choses » existent toujours les unes par rapport aux autres.

Substances et relations

L'ontologie des chimistes semble singulièrement déterminée par leurs pratiques de travail. Avec la chimie, l'ontologie n'est plus un domaine réservé à la métaphysique, c'est une manière d'interpréter un travail opérationnel et de reconstituer son « histoire ».

⁹ Voir texte 3.II.2, « Esprit de physique et esprit de chimie ».

¹⁰ Voir texte 1.V.2 b, « L'idée d'attraction en chimie, un concept différencié ».

¹¹ Voir texte 3.II.1, « Le chimiste sceptique ».

¹² Voir texte 3.II.3, « L'hétérogénéité des matières ».

¹³ Voir texte 3.II.6, « Matière ou matériaux ? ».

Mais le déplacement de la question ontologique est plus profond encore, du moins dans certaines traditions chimiques. En effet, les chimistes s'intéressent en général moins à la nature ou à la structure de leurs objets qu'à leurs *rappports*. L'essence d'un objet chimique est de pouvoir entrer en relation avec d'autres objets avec lesquels il possède plus ou moins d'affinité dans des contextes expérimentaux déterminés. Elle se caractérise par son *comportement* et plus précisément par ses *interactions*. C'est ce que les chimistes affirment de plus en plus fortement dès le XVIII^e siècle, notamment à partir de la table des affinités ou rapports, formulée pour la première fois par Etienne Geoffroy en 1718¹⁴. L'essence stable fait alors place au « en tant que » : l'or n'est plus une certaine forme spécifique cachée à nos regards et supposée connaissable *en soi*, il devient une manière d'exister dans un cadre opérationnel déterminé et de se combiner plus facilement avec certains métaux, acides, etc., qu'avec d'autres. « Si l'on cherche la définition du lithium dans un ouvrage de chimie, on trouvera peut-être qu'il s'agit d'un élément dont le poids atomique est approximativement de 7 », rapporte le philosophe pragmatiste Charles Sanders Peirce. Mais la définition du lithium des manuels de chimie n'est que le raccourci d'une définition opérationnelle précisant toute la liste des procédés requis pour l'obtenir et l'identifier¹⁵.

Une substance est donc en chimie le résultat de *purifications* successives qui lui permettent d'être isolée *par rapport* à d'autres substances et d'interagir avec elles. Les chimistes parlent en effet de « produit presque pur », PPP (le « presque » est important). Or cette « pureté » n'est pas une propriété intrinsèque des substances chimiques mais une condition de possibilité d'édification des classifications chimiques qui sont le résultat d'une action. Comme le remarquait Gaston Bachelard, « les trajectoires qui permettent de séparer les isotopes dans le spectroscope de masse n'existent pas dans la nature ; il faut les produire techniquement »¹⁶. Il ajoutait que celles-ci sont des « théorèmes réifiés » mais c'est plutôt sa définition théorique, celle des manuels, qui est une réification, tandis que la substance purifiée est un faisceau de performances¹⁷. Les substances chimiques « pures » sont donc co-définies *par et avec d'autres* dans un réseau de dispositions¹⁸ et d'actions réciproques. Le corps purifié permet de former une classe de substances composées qui sera caractérisée *via* ses diverses réactions avec d'autres composés.

L'ontologie chimique se fait alors relationnelle et processuelle, à tel point que la substance elle-même devient, non seulement composé, mais relation. Et comme la relation chimique implique un cadre expérimental particulier, un milieu déterminé, cette ontologie est aussi contextuelle ou mieux, « mésologique¹⁹ » (de *meso*, milieu). Dans les pratiques des chimistes, relations (réactions chimiques) et relata (corps chimiques) sont indissociables, et

¹⁴ Voir 3.III.1, « Table des rapports ».

¹⁵ « Si vous choisissez parmi les minéraux vitreux, translucides, gris ou blancs, très durs, cassants et insolubles, celui qui donne à une flamme incolore une coloration cramoisie ; si vous mélangez ce minéral avec de la chaux ou de la mort-aux-rats pilée et si vous pouvez dissoudre partiellement ce mélange dans de l'acide muriatique, puis une fois la solution évaporée, après avoir extrait le résidu avec de l'acide sulfurique et l'avoir dûment purifié, si vous pouvez le transformer en un chlorure par la méthode habituelle, obtenir ce chlorure à l'état solide, le fondre et l'électrolyser avec une demi-douzaine d'éléments puissants jusqu'à ce qu'il en sorte un globule de métal argenté et rosâtre qui flottera sur de l'essence, le matériau résultant de tout cela sera un spécimen de lithium ». Charles- S. Peirce, *The Collected Papers of C. S. Peirce*. Cambridge, Ma : Harvard University Press, 1931-1958, Volume 2, §330.

¹⁶ Gaston Bachelard, *Le rationalisme appliqué*. Paris : PUF, 1949, p. 103.

¹⁷ Jean-Pierre Llored, *Chimie, chimie quantique et concept d'émergence : étude d'une mise en relation*, Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique, 2013.

¹⁸ Voir l'encadré sur l'émergence, 3.V.4.

¹⁹ Augustin Berque, *Poétique de la Terre. Histoire naturelle et histoire humaine : essai de mésologie*. Paris : Belin, 2014.

inséparables des milieux réactionnels dans lesquelles elles agissent²⁰. Le contexte expérimental n'est plus seulement ce qui fait apparaître la substance, il est constitutif de l'existence de la substance et permet de la définir. D'où la dimension ontologique de l'appareillage chimique, qui participe à l'existence même des objets, comme le souligne le concept d'*affordance*²¹ (de *to afford* : permettre, au sens ici de rendre possible voire de potentialiser).

On peut penser qu'on touche ici à une limite même de l'idée d'ontologie : comment parler d'ontologie sans substance fixe, sans essence connaissable stable ? Bachelard, percevant la difficulté, écrivait que « pour bien souligner que la substance est définie par un groupe de déterminations externes agencées de telle manière qu'elles ne peuvent toutes ensemble se préciser assez pour atteindre un intérieur absolu », il faudrait remplacer cette notion par celle d'« ex-stance »²². Mais on peut aussi voir dans ce basculement l'occasion d'un profond renouvellement de la question ontologique. Car la relation existe et conserve une matérialité ; elle n'est pas simplement, comme certaines traditions philosophiques ont pu le soutenir, pur phénomène réglé par des lois.

Atomes, corps simples, éléments

En forçant un peu le trait, on pourrait dire qu'on passe de la question « quoi ? » à la question « qui ? » : *qui* sont, ultimement, les êtres, les unités élémentaires de la chimie, ses *individus*, et qu'est-ce qui fait d'eux des individus *chimiques* ?

C'est une question ancienne que soulève la chimie : elle est à la recherche de termes (en général provisoires) à l'analyse, pensés comme des éléments. Elle s'interroge alors sur la singularité des objets concrets qu'elle manipule, les individus étant alors, potentiellement, tous les objets chimiquement caractérisables et isolables (du moins en partie). Mais ces deux sens sont loin de converger : les individus indivisibles ou indivisés, termes réels ou projetés de l'analyse, sont en nombre restreint et constituent les composants ultimes de l'univers chimique. Au contraire, les individus manipulés quotidiennement au laboratoire, spécifiés et nommés par le chimiste, sont en nombre indéfini et peuvent être composés d'autres individus. Nous aborderons cette seconde classe dans la section suivante, pour nous restreindre ici à la première.

En premier lieu, la chimie offre une pluralité de candidats au titre d'individu chimique. En effet, dans son histoire, la chimie a oscillé entre plusieurs déterminations de l'élément : les quatre éléments des chimistes du XVIII^e siècle diffèrent de ceux du *Traité élémentaire* de Lavoisier comme de ceux du tableau de Mendeleev, qui définit l'élément par le poids atomique²³, ou de l'élément actuel défini par le nombre atomique pour tenir compte des isotopes. Qui sont les « vrais » individus de la chimie ?

En second lieu, la chimie suggère et parfois impose une réflexion nouvelle sur l'individualité. Elle invite notamment à distinguer l'individualité, non seulement de l'unité du vivant, c'est-à-dire de la totalité organique, mais aussi de l'insécabilité, avec laquelle elle est confondue dans l'ancienne tradition atomiste.

²⁰ Jean-Pierre Llored, « How Philosophy of Nature Needs Philosophy of Chemistry », *Philosophica*, vol. 47, p. 93-108. Jean-Pierre Llored, Rom Harré, R 'Developing the Mereology of Chemistry', in: C. Calosi, P. Grauziani (eds.), *Mereology and the Sciences*, New York etc.: Springer, 2014, p. 200-207.

²¹ Rom Harré, « Hinges and affordances. New tools in the philosophy of chemistry », in J.-P. Llored (dir.), *Philosophy of chemistry: practices, methodologies and concepts*, Cambridge: Cambridge Scholar Publishing 2012.

²² Gaston Bachelard, *La philosophie du non*, Paris : PUF, 1940, p.78.

²³ Voir texte 3.IV.2, « Élément versus corps simple ».

D'une part, en chimie, l'indivisibilité chimique ne recouvre pas l'impossibilité de toute division. Les arguments de Descartes sur la divisibilité à l'infini concernent la division mathématique ou géométrique, non chimique. Dans le cas de l'élément, c'est son indivisibilité *qualitative* et non quantitative qui définit son individualité : l'élément est ce qui ne saurait être divisé sans perdre sa nature chimique. Cependant la question de savoir si et en quoi l'élément se distingue du corps simple (chimiquement isolable), et de l'atome (le corps insécable), reste posée. Ce qui est sûr, c'est que la notion chimique d'élément permet de conjuguer l'atome au pluriel. Si les physiciens peuvent parler de « l'atome » (de sa structure, de ses propriétés, etc.), les chimistes parlent toujours *des* atomes (de fer, de carbone, d'azote, etc.) : il y a autant de types d'atomes que d'éléments qualitativement différents. Comme la matière homogène, « l'atome » en général est pour le chimiste une abstraction. De plus, un individu chimique n'est pas un indivisible absolu, mais plutôt un *indivisé*, en un double sens : il est le terme d'une analyse chimique, terme pensé comme limite au-delà de laquelle la chimie ne peut aller ; il est aussi une unité faisant sens chimiquement, unité qui perd toute individualité *chimique* si elle est divisée. Cela exclut du présent questionnement la foule des êtres (chimiquement) composés : les molécules, les supramolécules, les agrégats et les diverses guises du mélange. Car s'ils peuvent avoir une individualité chimique propre (ce sera l'objet de la section suivante), ils ne perdent pas *toute* individualité chimique une fois divisés, mais donnent plusieurs individus chimiques. En revanche, une fois divisé, l'atome n'a plus d'individualité chimique et ressortit à la physique nucléaire.

D'autre part, l'individualité chimique, contrairement à celle de l'organisme, ne suppose pas nécessairement une unité interne forte et une existence indépendante. L'individu chimique peut être instable et n'exister comme tel que dans des conditions expérimentales très contraignantes. Des éléments aussi communs que l'hydrogène, le carbone, l'azote et l'oxygène ne peuvent exister à l'état d'atomes isolés qu'à très basse pression et à très haute température. On retrouve ici, sous une forme radicale, l'idée véhiculée par le concept d'*affordance* : l'individu chimique ne se soutient pas nécessairement seul dans l'existence, il n'est pas une entité indépendante.

La perspective chimique modifie alors la question, devenue classique en philosophie analytique, des *natural kinds*²⁴. Au philosophe tenté de stabiliser des espèces naturelles à partir des théories scientifiques, censées permettre de découper objectivement la nature et de classer ses entités, la chimie répond par une série de déplacements. Cherchera-t-on ces *natural kinds* dans la table de Mendeleev ? Faudra-t-il alors intégrer tous les isotopes d'un élément dans une même « sorte » naturelle, malgré leurs différences chimiques ? Préférera-t-on plutôt les trouver dans la microstructure moléculaire, quitte à démultiplier indéfiniment les espèces naturelles retenues ? Même pour une substance en apparence aussi familière que l'eau, l'identité chimique est complexe. Se réduit-elle à une seule sorte de molécule, H₂O, considérée comme sa microstructure ontologique, ou doit-elle être identifiée à une population de molécules, dont OH⁻ et H₃O⁺ ? Faut-il prendre en compte les différentes phases de l'eau (solide, liquide, gazeuse) et leurs conditions physico-chimiques de pression et de température ? Rappelons aussi que la pureté chimique est une donnée relative, et que de fait, l'eau que nous buvons contient un grand nombre d'impuretés. Les exclure totalement, n'est-ce pas viser une sorte d'eau abstraite, certes utile comme idéalisation, mais peu pertinente pour décrire les espèces naturelles ? Il est rare que les espèces naturelles soient chimiquement pures et les espèces chimiquement pures sont rarement naturelles. Dès lors, pourquoi demander aux *chemical kinds* d'être « naturels », quand la chimie crée chaque jour de nouvelles sortes d'objets ?

²⁴ Sur ce débat issu de la tradition de philosophie analytique on peut consulter *Foundations of Chemistry* 7 (2005) : 1-4.

Mixte et composé

Même si l'ontologie de la chimie se distingue de la tradition aristotélicienne, elle en hérite un concept et un problème, le mixte. Les atomistes ne peuvent penser que des corps simples ou composés, mais pas de véritables « mixtes », c'est-à-dire des mélanges. En revanche, les premiers « physiciens » grecs qui défendaient une théorie à un ou plusieurs éléments abordent tous cette question. Mais c'est Aristote qui lui consacre l'analyse la plus systématique, dans son traité *De la génération et de la corruption*. De quoi s'agit-il ?

Aristote explique que le mixte est difficile à penser car de deux choses l'une : soit les éléments de départ demeurent dans le mixte et conservent leur identité, soit ils s'y dissolvent et perdent leur identité. Or dans le premier cas il n'y a pas mixtion mais simple juxtaposition de particules ou agrégat, comme dans un mélange de grains d'orge et de blé – ce sont les « faux mixtes » des atomistes, qui ne sont mixtes que pour les sens, des mixtes apparents. Dans le second cas, il n'y a pas non plus mixtion mais corruption (*phthorá*) des éléments, suivie de la génération (*genesis*) d'une nouvelle substance – le couple « génération et corruption » désignant chez Aristote la modalité la plus radicale du changement : le changement substantiel, qui caractérise le vivant. Avec la mixtion, Aristote cherche donc à caractériser un type de changement différent d'un simple réarrangement d'éléments conservant chacun leur identité distincte (comme les atomes de Démocrite) : la mixtion est *plus* qu'une simple altération ou changement superficiel, mais *moins* qu'une génération et une corruption (qui décrit la naissance et la mort des êtres vivants). Pour qu'il y ait véritable mixtion, il faut que i) les substances mélangées s'unissent pour former quelque chose de plus et de différent que la somme des ingrédients du mélange et ii) qu'elles puissent se séparer à nouveau du mélange. Pour reprendre l'exemple de Pierre Duhem²⁵, dans l'eau sucrée, l'eau est altérée, le sucre est altéré, mais ni l'un ni l'autre ne sont détruits. Ils subsistent en puissance pour actualiser un nouveau corps qui n'est ni une substance, ni un simple composé sans union, mais bien un mixte. Le mélange concerne les *qualités*. Les qualités changent, mais la substance mélangée perdure ; même altérée à travers le mélange, elle perdure en puissance. Ainsi la théorie aristotélicienne de la *mixis* propose une formule élégante pour penser le stable sous le changeant, l'unité sous la diversité.

S'il semble illusoire de prétendre traduire l'antique notion de mixte dans des concepts modernes comme « synthèse » ou « molécule », elle apparaît précieuse pour penser la synthèse chimique et le mode d'existence des produits de synthèse.

En premier lieu, Aristote insiste sur la *sélectivité* des mélanges possibles. Comme en chimie, n'importe quoi ne réagit pas avec n'importe quoi. Les conditions du mélange pour Aristote sont i) que les composants aient des puissances respectivement actives et passives, ii) qu'ils soient facilement divisibles en petites parties, et iii) en proportion à peu près égale pour qu'il n'y ait pas dissolution de l'un dans l'autre (comme dans le cas de la goutte de vin se dissolvant dans l'eau). Les substances « se mélangent » selon certaines règles et sous certaines conditions que l'on peut connaître et utiliser : signe que le mixte est non seulement un aspect de la pratique chimique mais aussi de sa théorie. Enfin, tout produit chimique est un hybride de nature et d'artifice. Or le mixte aristotélicien fait précisément la jonction entre la *physis* et la *technè*, entre les processus de changement par nature et les processus de changement assisté ou provoqué. Il a un statut intermédiaire. Entre art et nature, le mixte a un statut mixte.

En outre, le mixte d'Aristote partage deux points communs avec la synthèse chimique : i) sa réversibilité (il y a mixte vrai si les produits de départ peuvent être obtenus à

²⁵ Voir texte 3.V.1, « L'eau sucrée ».

nouveau avec leurs propriétés de départ) ; ii) le fait que, dans une synthèse, il y a à la fois conservation de la substance et émergence de quelque chose de nouveau qui ne se réduit pas à la somme des propriétés des réactifs : ainsi les propriétés de l'eau ne ressemblent en rien à celles des gaz oxygène et hydrogène ; le sel de cuisine diffère de la simple addition d'un gaz jaunâtre (chlore) et d'un métal mou (sodium)²⁶. Il y a donc réversibilité mais non équivalence entre analyse et synthèse.

Pourtant, n'est-ce pas pour se débarrasser de l'antique notion de mixte que les chimistes modernes ont repris le concept de « synthèse » comme équivalent de « composé » et non comme la production d'un être nouveau, différent de ses réactifs ? Ainsi, la chimie lavoisienne se présente comme une science de la composition dans laquelle l'analyse (la décomposition) et la synthèse (la composition) sont deux opérations non seulement réversibles mais aussi strictement équivalentes.

Quoi qu'il en soit, la théorie aristotélicienne du mixte n'a cessé d'interroger la pensée chimique²⁷. Les alchimistes invoquent sa doctrine pour légitimer la possibilité de produire des corps réellement nouveaux et non de pures illusions ou sortilèges, et analysent les terres ou les métaux comme des mixtes de différentes natures ou principes ; même Boyle, qui les critique, utilise souvent le terme de « mixtures » ; Goerg-Ernst Stahl distingue l'« union agrégative » de l'« union mixtive » ; Gabriel-François Venel distingue les « aggrégés » dont s'occupent les philosophes mécanistes et les « mixtes » des chimistes²⁸. Le mixte apparaît au cœur de l'identité de la chimie. Même après la réforme de la nomenclature chimique portée par Lavoisier²⁹, qui prescrit des noms de composés formés par la juxtaposition des termes désignant les composants (comme « oxyde de plomb » ou « chlorure de sodium »), les chimistes du XIX^e siècle nommeront « combinaisons » les composés formés en proportions fixes et définies (aujourd'hui appelés « composés stœchiométriques ») et « mélanges » les composés en proportions continues et variables (composés « non stœchiométriques » comme l'oxyde de fer). La notion de mixte rôde également dans les débats sur la distinction entre atome et molécule. Plus proche de nous, le physico-chimiste Pierre Duhem, au tournant du XX^e siècle, réhabilite la théorie aristotélicienne du mixte pour lutter contre le mécanisme atomiste dans *Le mixte et la combinaison chimique : essai sur l'évolution d'une idée* (1902)³⁰.

Mixte et émergence

Le mixte aristotélicien conduit au traitement chimique d'un autre problème, celui de l'*émergence*. En effet, le cœur de la théorie aristotélicienne est de penser comment l'union de deux ou plusieurs composants peut donner naissance à un être nouveau qui ne ressemble ni à l'un ni à l'autre des principes qui l'ont engendré. Les propriétés du mixte sont plus que l'addition des propriétés des composants. On dirait aujourd'hui qu'elles sont émergentes. L'intérêt de la réflexion chimique sur cette question, qui a fait couler beaucoup d'encre, est double.

²⁶ Voir texte 3.II.4, « L'irréductibilité des qualités ».

²⁷ Bernadette Bensaude-Vincent, « L'énigme du mixte », in *Matière à penser, Essais d'histoire et de philosophie de la chimie*. Paris, Presses Universitaires de Paris Ouest, 2008.
<http://books.openedition.org/pupo/1300?lang=fr#bodyftn3>

²⁸ Et, à une autre échelle d'organisation, Venel distingue les « composés » formés par union de mixtes dissemblables et les « amalgames » formés par agrégation de mixtes semblables. Voir texte 3.V.3., « Mixte et agrégat ».

²⁹ Louis-B. Guyton de Morveau, Antoine Lavoisier, Claude-Louis Berthollet, Antoine de Fourcroey *Méthode de nomenclature chimique* (1787) réédition, Seuil, 1994.

³⁰ Voir texte 3.V.1, « L'eau sucrée ».

D'un côté, la chimie peut à bon droit revendiquer que la grande majorité de ses substances et propriétés sont émergentes, et que cette émergence est au cœur de sa pratique et de sa théorie. Il s'agit alors de savoir produire des propriétés et substances nouvelles à partir d'autres qui, tout en les produisant, ne les contiennent pas déjà et ne leur ressemblent pas. A ce titre, la chimie invite à un élargissement de la base de la réflexion : si le vivant et les états mentaux offrent des exemples importants pour la réflexion sur l'émergence, ne faudrait-il pas ajouter la richesse des corps chimiques ?

D'un autre côté, la chimie déplace la question. En biologie et en physique, l'émergence est souvent pensée à partir d'une complexification de niveaux de réalité : à un niveau N où un certain type de propriétés (par exemple physico-chimiques) sont manifestes, succède un niveau N+1 où d'autres types de propriétés (par exemple proprement biologiques) « émergent ». La chimie invite à penser tout autrement l'émergence : elle ne réside pas dans la complexification, mais dans le mixte. En chimie, l'interrogation sur l'émergence prolonge et radicalise celle sur le mélange comme opération produisant des qualités nouvelles, à la fois déterminées par des composants et des agents premiers et irréductibles à l'addition de leurs propriétés³¹.

La distinction entre niveaux de réalité, hiérarchiquement étagés du plus simple et fondamental au plus complexe et émergent, ne fait guère sens d'un point de vue chimique. Les récents travaux des nanosciences montrent qu'une molécule individuelle n'est pas « moins complexe » qu'une solution ou un matériau contenant des milliards de milliards de ces mêmes objets, mais « différemment complexe », en vertu notamment des propriétés nouvelles induites par le *mélange* d'états classiques et quantiques à cette échelle. Autrement dit, les parties ne se réduisent pas à la division du tout, et le tout n'est pas nécessairement le niveau de l'émergence, qui se produit aussi bien par le bas (*downward emergence*). L'individualité des molécules n'est pas donnée à un niveau fondamental N qui servirait de socle aux propriétés émergentes des populations à un niveau N+1 ; elle n'est pas la même en solution liquide, dans un matériau, et sur une surface en ultravide. Chaque milieu – naturel ou instrumental – modifie les processus d'émergence vers le « haut » comme vers le « bas », parce que l'émergence se rencontre d'abord dans le mixte avant de concerner les relations entre « niveaux ».

Pour autant, ce déplacement de la question de l'émergence ne signifie pas que les chimistes ignorent les niveaux d'organisation. Bien au contraire, la chimie supramoléculaire, en particulier, a ouvert tout un champ d'investigation chimique au-delà des molécules et des liaisons intermoléculaires (covalentes), au niveau des ensembles où des espèces chimiques se conjuguent par le biais de liaisons faibles et souvent réversibles (liaisons van der Waals, hydrogène, aromatiques, ioniques ou hydrophiles/hydrophobes). Comme le dit Jean-Marie Lehn, reprenant une analogie familière aux atomistes de l'Antiquité, si l'élément est la lettre et la molécule le mot, l'ensemble supramoléculaire est la phrase ; ou encore, si la chimie moléculaire est la « psychologie » des molécules, la chimie supramoléculaire est leur « sociologie ». Et si l'on adopte la conception élargie de l'auto-assemblage proposée de manière provocante par George Whitesides (incluant par exemple les liaisons magnétiques et gravitationnelles), les échelles d'organisation chimiques vont même jusqu'aux galaxies³². Il y a donc bien des échelles d'organisation, mais d'un point de vue chimique ce ne sont pas des « niveaux de réalité » dont certains devraient être considérés comme plus « fondamentaux » que d'autres. Ce sont moins des « étages » que des modes d'articulation, de liaison, de conjugaison, et même de communication.

³¹ Voir texte 3.V.5. « Emergence et création d'inconnu. Pour une repolitisation de l'ontologie ».

³² George Whitesides, M. Boncheva « Beyond molecules: Self-assembly of mesoscopic and macroscopic components » *Proceedings of the National Academy of Science*, 99, April 16, 2002, p.4769–4774
George Whitesides, B. Grzybowski « Self-assembly at all scales », *Science*, 295, March 19 2002, p. 2418-21.

Le problème de l'émergence n'est donc pas réductible, en chimie, à une question méréologique (de *meros*, partie), c'est-à-dire de relations entre parties (micro) et tout (macro), ni les échelles à une métrique (nano, micro, milli, etc.). Chaque échelle d'organisation rejoue singulièrement le problème du mixte. Ce déplacement est d'une grande portée philosophique : l'émergence chimique pose la question des *qualités réelles*, de leur production et de leur nature, sans les penser comme des propriétés secondes apparaissant à un certain niveau de complexité, encore moins comme des épiphénomènes se surajoutant à des déterminations quantitatives plus fondamentales.

Interface, surface, interaction

La chimie complique encore les distinctions traditionnelles par l'importance que prennent les surfaces et interfaces.

Point de contact et surface qui définit des contours, l'interface sépare et relie à la fois. Déjà, au XVIII^e siècle, le chimiste Rouelle s'est efforcé de penser la relation chimique liant des éléments pour former un mixte à partir de la surface des corpuscules. Il a ainsi forgé le concept de *latus*, côté d'un corpuscule d'un élément donné qui sert à la fois à en marquer l'individualité et à cerner une zone de relation. C'est par leur côté que les corpuscules élémentaires se lient et interagissent, formant alors un mixte aux propriétés nouvelles. Cette idée, apparemment simple, traduit un effort théorique remarquable : pour penser le lien entre deux êtres différents, sans troisième terme servant de médiation (et ce à l'infini), il faut trouver un lien dans les êtres eux-mêmes. C'est ainsi par leur contact, c'est-à-dire par la mise en commun de leur surface, que les corpuscules élémentaires s'associent. Malgré sa limitation à la relation entre deux éléments, ce modèle ouvre en un sens une question que les théories de la liaison chimique reprendront avec les modèles de la structure spatiale de la molécule. La surface devient ici couche électronique avec un contact passant par le partage d'électrons de valence entre atomes différents.

Au XX^e siècle, la notion de surface gagne de l'importance, d'abord dans la chimie dite « structurale ». Intervenant au départ en tant que simple limite d'un volume en trois dimensions dont il s'agit de déterminer la structure atomique et l'arrangement cristallin, la surface va très vite prendre du relief, se compliquer, s'immiscer dans le volume (matériaux poreux) voire s'en émanciper. Avec des sujets d'étude comme les couches minces, les tensioactifs, les membranes biologiques ou l'épitaxie (la croissance orientée des cristaux en surface), la surface non seulement gagne du terrain mais elle gagne en subtilité. Elle se complique, prend du relief comme des couleurs. On souligne son importance pour les propriétés optiques des corps : principe de visibilité, la surface fait aussi écran, protège, renvoie, réagit. Elle n'est plus simplement le bord plat d'un volume plein, mais ce qui délimite et interface les différents « états de la matière » ou « phases » (solide, liquide, gazeuse). Ainsi, dans le large domaine transverse à plusieurs disciplines physiques et chimiques qui prend le nom de « science des surfaces » au milieu du XX^e siècle, la surface est toujours interface parce qu'elle est inter-phase : elle sépare et relie plusieurs phases (solide/liquide, solide/gazeux, etc.) dont elle façonne pour un grande part la dynamique des interactions à l'échelle moléculaire. Interactives, les surfaces articulent l'hétérogène. Elles font bien plus que compliquer les structures de la matière, elles la rendent active, comme l'exprime l'idée de « surfaces d'action »³³ : loin de se cantonner à un rôle structural, les surfaces concernent surtout les opérations, les processus et même les procédés industriels. Une illustration particulièrement frappante de l'importance opérative des surfaces

³³ Voir texte 3.VI.1, « Inépuisables surfaces ».

est la catalyse hétérogène, ainsi nommée parce que le catalyseur et les réactifs ne sont pas de phase homogène (typiquement liquide) mais de plusieurs phases (généralement liquides ou gazeux pour les réactifs et solide pour le catalyseur). La catalyse s'effectuant à l'interface avec le solide, l'augmentation de leur surface de contact influe sur la cinétique globale de la réaction, qui se trouve ainsi considérablement accélérée dans une mousse céramique ou un autre matériau micro ou nano-poreux.

Récemment, les nanotechnologies ont enrichi cette idée d'une proximité des surfaces mais l'ont aussi profondément modifiée. Car avec elles les caractéristiques de surface vont jusqu'à modifier les propriétés intrinsèques des substances. La chimie des surfaces qui s'était développée avec l'essor des recherches sur les couches fines et les polymères y trouve un nouveau terrain propice, riche d'interactions avec plusieurs domaines de la physique et de la biologie.

Objet intermédiaire entre la molécule individuelle et le matériau solide, une nanoparticule se caractérise par l'importance de sa surface spécifique. Pour prendre une analogie, le rapport de la surface spécifique d'un nanomatériau à sa surface moyenne est comme celui de la côte de Bretagne vue par un promeneur qui la longe à sa représentation sur une carte à grande échelle. Ainsi, plus on diminue la taille d'un matériau, plus il présente un ratio d'atomes de surface important par rapport aux atomes du cœur (appelé « *bulk* »). Les plus petites nanoparticules ou *clusters* présentent jusqu'à 70% d'atomes de surface pour 30 % d'atomes de *bulk*. Cela leur confère une forte réactivité chimique à l'environnement local tout en modifiant leurs propriétés physiques intrinsèques (optiques, magnétiques, électroniques...). Par exemple, l'épaisseur de paroi séparant les dipôles d'un matériau magnétique peut se trouver réduite au point de rendre ce matériau « superparamagnétique » : ne pouvant plus former de domaines magnétiques distincts, le nanomatériau présente un seul moment magnétique géant pouvant changer d'orientation sous l'influence du milieu (différence de température, champ électrique). Ou encore, le confinement en taille d'un matériau peut induire une variation de la distance caractéristique moyenne entre le noyau et ses électrons (rayon de Bohr), dont dépend la largeur du gap de conduction, ce qui modifie ses propriétés électroniques et optiques. Ainsi la surface n'est plus seulement la limite externe de l'objet, comme dans le cas des matériaux massifs, mais une interface active qui modifie son comportement, ses propriétés intrinsèques comme ses capacités à s'associer plus ou moins sélectivement à ce qui n'est pas lui. En fonction de sa réactivité, de sa charge électrique de surface, de son arrangement cristallin, de son caractère hydrophile/hydrophobe, et de sa propension à s'agréger, une nanoparticule n'aura pas forcément le même comportement que son analogue massif de même composition – ce qui sous-tend d'ailleurs les questions de toxicologie que ne manquent pas de poser ces nano-objets.

Avec certains nanomatériaux, la surface va même jusqu'à s'autonomiser du volume. C'est le cas des matériaux à deux dimensions inaugurés en 2004 avec l'isolement du graphène, le feuillet individuel du graphite. Composé d'une seule couche d'atomes de carbone, le graphène n'a que des atomes de surface et est dépourvu de *bulk*. Avec lui, la surface n'est plus simplement la surface de quelque chose ou le bord d'un volume ou mais une *surface en soi*. Ses propriétés (électroniques, optiques, magnétiques, mécaniques et chimiques) s'en trouvent complètement transfigurées par rapport à celles du graphite. Que l'on superpose deux couches de graphène et ses performances sont déjà perdues dans la masse statistique de celles du graphite. Le graphène illustre encore mieux que les molécules individuelles l'idée d'une émergence par le bas : si l'on considère le graphène comme une « partie » du graphite (dont la structure est celle d'un empilement de couches de graphène liées entre elles par des forces faibles de van der Waals), alors les propriétés de la partie sont plus et autres que les propriétés issues de la division du tout.

Certes, le mode d'existence du graphène comme « pure surface » ne fait guère sens pour les industriels qui tentent de l'introduire dans leurs produits, celui-ci ne s'y trouvant jamais « à l'état libre ». En revanche, il fraye la voie à une nouvelle génération de structures bidimensionnelles en recherche fondamentale avec le nitrure de bore, le bisulfure de molybdène ou de tungstène et des carbures, ou encore les sulfures ou sélénures de métaux. L'objectif est de concevoir des matériaux sur-mesure, alternant des couches de divers matériaux 2D pour répondre à des fonctions bien précises. D'où l'élaboration, feuillet par feuillet, d'hétérostructures avec des dopants intercalés comme des lasagnes. Dans ces hétérostructures, des monocouches de graphène peuvent aussi être introduites et changer de structure cristalline pour se réaligner sur les couches de nitrure de bore. Paradoxalement, les minuscules nanos ouvrent ainsi la voie à une nouvelle classe d'objets chimiques géants, les « gigamolécules » à deux dimensions. Nano par leur épaisseur, macro par leur surface, ces objets traversent et transgressent les distinctions entre ordres de grandeur, qualités premières (ou propriétés intrinsèques) et qualités secondes (sensibles). Ainsi, la surface fait plus que redéfinir l'objet chimique par ses interfaces : elle génère de nouveaux genres d'objets qui suggèrent de nouvelles manières d'être.