

Préface

En matière de cadrage, Alfred Hitchcock ne craignait personne. Il y a dans *La Mort aux Trousses* une scène de séduction dans un train. Cary Grant se penche pour allumer la cigarette d'Eva Marie Saint. Cadrage sur le fenêtrage du wagon restaurant : on ne voit plus que leurs mains au premier plan. Il approche le briquet, elle allume sa cigarette. Il se redresse lentement. Elle lui prend la main et la ramène vers elle, dans une pavane érotique de flamme et de mains, images sur image. La scène se passe entre New York et Chicago, mais je n'arrive pas à retrouver le paysage qui défile derrière la fenêtrage : si je connais bien mon Hitchcock, il avait dû aussi le choisir pour faire partie de la danse.

Ce qui « fonctionne » entre Cary Grant et Eva Marie Saint, c'est « la chimie ». Cette expression est l'une des métaphores chimiques qui sont entrées dans le langage de tous les jours.

Attendez un peu... La science, la triste chimie, servant de métaphore ? Bien sûr, et pourquoi pas ? D'abord, on ne peut se passer de métaphores. Un être humain ne peut considérer un objet ou une émotion, qu'il ne comprend pas mais désire ardemment comprendre et communiquer aux autres, sans passer par l'intermédiaire de quelque chose de familier, quelque chose de compréhensible. Oui, mais des métaphores empruntées à la **chimie** ? La chimie est une réalisation perpétuelle du nouveau, et par là même une riche source de métaphores. Il y a deux cents ans, le poète Samuel Taylor Coleridge disait que lorsqu'il était à court de métaphores, il allait assister aux démonstrations de son ami, le chimiste Humphry Davy.

Citons, parmi d'autres métaphores chimiques de notre langue quotidienne : « cristalliser » (comme dans « mes idées se sont cristallisées »), « précipité », « sublimation » (lisez les merveilleuses dernières pages des *Météores* de Michel Tournier), « catalyseur », ou en anglais « the litmus test¹ », « the acid test² ». Et puis, il y a la plus féconde de toutes, explorée dans toute sa richesse dans le présent livre, la **liaison**.

Il y a dans les métaphores une tension inhérente. C'est la tension de la stase et de la transformation, de l'adhésion et du refus, de la persévérance et de l'abandon. Qu'il y ait tension dans ces métaphores est logique, puisque la chimie est métier,

¹ « A test in which a single factor (as an attitude, event, or fact) is decisive » : un test où un seul facteur est décisif (décidant d'une attitude, un événement, un fait).

² « A decisive or critical test, as of worth or quality » : un test décisif, crucial quant à la valeur, la qualité.

art, affaire et science des substances, des molécules **et de leurs transformations**. Et se transformer peut être hasardeux. La liaison maintient les atomes ensemble, évidemment. Mais la tension peut être, doit être, rompue et l'est souvent.

Dans *L'Homme à la découverte de son âme*, Carl Gustav Jung a dit : « la rencontre de deux personnalités est comme le contact de deux substances chimiques : la moindre réaction les transforme toutes les deux »³.

*Roald Hoffmann*⁴, *prix Nobel de Chimie*,
Été 2008

³ Cette traduction, adaptée de l'anglais est due à l'aimable obligeance de M. Alain Traissac.

⁴ Roald Hoffmann a reçu le prix Nobel de Chimie en 1981. Nous vous recommandons la visite de son site : <http://www.roaldhoffmann.com/pn/>.

Avant-propos

*[L'affinité chimique] paraît être née au début du XVIII^e siècle ; en 1775 le chimiste suédois Bergmann¹ a publié un livre rédigé en latin dont le titre commence ainsi : « *Disquisitio de attractionibus electivis* ». Ce texte a été traduit en allemand (Berthollet, je crois, l'a lu en latin). Goethe a découvert cette traduction qui lui donna l'idée surprenante mais géniale, de considérer les rapports humains sous l'angle de la chimie².*

Cette petite leçon de chimie, dit Charlotte, est presque l'image de la société dans laquelle nous vivons. J'y reconnais toutes les classes dont elle se compose; la noblesse et le tiers-état, le clergé et les paysans, les soldats et les bourgeois³.

Le but de cet ouvrage est d'instruire en divertissant.

La science a une réputation de sérieux imperturbable que justifient ses théories, ses méthodes et sans doute plus encore le style de ses publications. Il ne faut pas perdre de vue que ces dernières sont destinées à des spécialistes connaissant déjà l'essentiel des prémisses nécessaires à leur compréhension, d'où un style elliptique, des acronymes, des références supposées connues et qui nécessitent pour être compris le long entraînement d'un professionnel. Les traités d'enseignement n'échappent pas à cette règle générale ; situés en amont de la spécialisation, leur but est de permettre, progressivement, de pouvoir lire les articles spécialisés sans trébucher sur chaque expression. Il s'ensuit de curieux quiproquos que les spécialistes définissent par l'allégorie suivante : les seuls à sourire à un exposé dans telle ou telle discipline, sont ceux qui la pratiquent et rient sous cape du malheureux conférencier. Les autres se taisent et attendent la pause café. Nous sommes conscients de ces obstacles en abordant un sujet très vaste : la constitution intime de la matière résultant de liaisons variées entre les atomes qui la constituent. Nous avons donc utilisé une approche qui, d'un côté expose le plus simplement possible les notions nécessaires à la compréhension de l'ensemble et, de l'autre, permet par des exemples très variés de montrer que les concepts scientifiques peuvent être illustrés par des exemples, des analogies, tirés de la vie courante.

La matière est constituée d'atomes, liés entre eux selon un nombre limité de modes. Intuitivement, nous pouvons penser que les atomes d'un cristal, d'une

¹ Torbern Olof Bergman (1735-1784) chimiste et minéralogiste suédois ; connu pour sa *Dissertation sur les affinités électives*, parue en 1775.

² Marcel Fétizon, *Berthollet et la théorie des affinités*, Bulletin de la Sabix, Bibliothèque de l'Ecole Polytechnique, Bulletin 24, août 2000 (www.sabix.org/bulletin/b24/affinities.html).

³ Goethe, *Les Affinités électives*, chapitre IV.

barre de métal, d'un composé organique, d'un gaz ou des substances dont nous sommes formés ne sont pas liés par des forces de même nature. Il n'en est rien, en dépit de l'étonnante variété de formes adoptée par la matière, qu'elle soit minérale ou vivante, qu'il s'agisse d'un nuage ou d'une comète. La théorie de la liaison illustre cette unité sous-jacente⁴. Mais notre connaissance des liaisons repose surtout sur une longue pratique des scientifiques qui ont minutieusement exploré toutes les façons possibles dont se lient les atomes et les molécules dans tous les composés imaginables.

Une fois tracées les grandes lignes de notre thème scientifique : décrire les liaisons chimiques et les stratégies qui conduisent à leur étude et leur synthèse, nous avons cherché à les illustrer de deux manières. La première consiste à donner des exemples choisis parmi les composés que nous connaissons en très grand nombre. Nous le ferons le cas échéant, mais avec parcimonie car nous ne voulons pas écrire un traité spécialisé⁵ qui serait rapidement fastidieux. La seconde consiste à montrer que les concepts qui servent à décrire la constitution de la matière peuvent très aisément être éclairés par des parallèles avec les situations de la vie humaine. Le terme de liaison permet des analogies aisées et nous avons tenté de montrer qu'aux immenses possibilités ouvertes par les formes connues de la matière répondent des comportements humains qui peuvent, en dépit de leur apparente diversité, se ramener à certains archétypes. Parmi ces comportements, certains sont tragiques, d'autres heureux, mais nous avons privilégié ceux qui font sourire. Nous avons à cet effet choisi des illustrations prises dans les milieux les plus divers, allant d'Héloïse et Abélard à l'amant de la femme à barbe, de Socrate à Boby Lapointe, avec pour maxime qu'il n'y a pas de sujet tabou et que la science peut très bien s'accommoder sans déchoir de la légèreté de ton.

Nous proposons un exposé en deux temps : chaque chapitre technique, ramené au strict minimum, est suivi par des *Echos, potins et illustrations* destinés à montrer comment les concepts scientifiques peuvent profiter des analogies avec les situations humaines. Cette dernière partie est plus étoffée que la première. Nous tentons en effet de montrer que les exemples sont souvent plus divertissants et parfois même plus éclairants que la théorie proprement dite. C'est à une promenade à travers les différents paysages de science que nous invitons le lecteur, espérant lui montrer que derrière le sérieux de la théorie se trouvent des possibilités d'illustrations et de sourires, prises dans les domaines les plus divers. La science ne s'y trouve ni trahie ni banalisée, nous pensons au contraire qu'elle gagne en humanité à ce voisinage intime avec notre humaine condition.

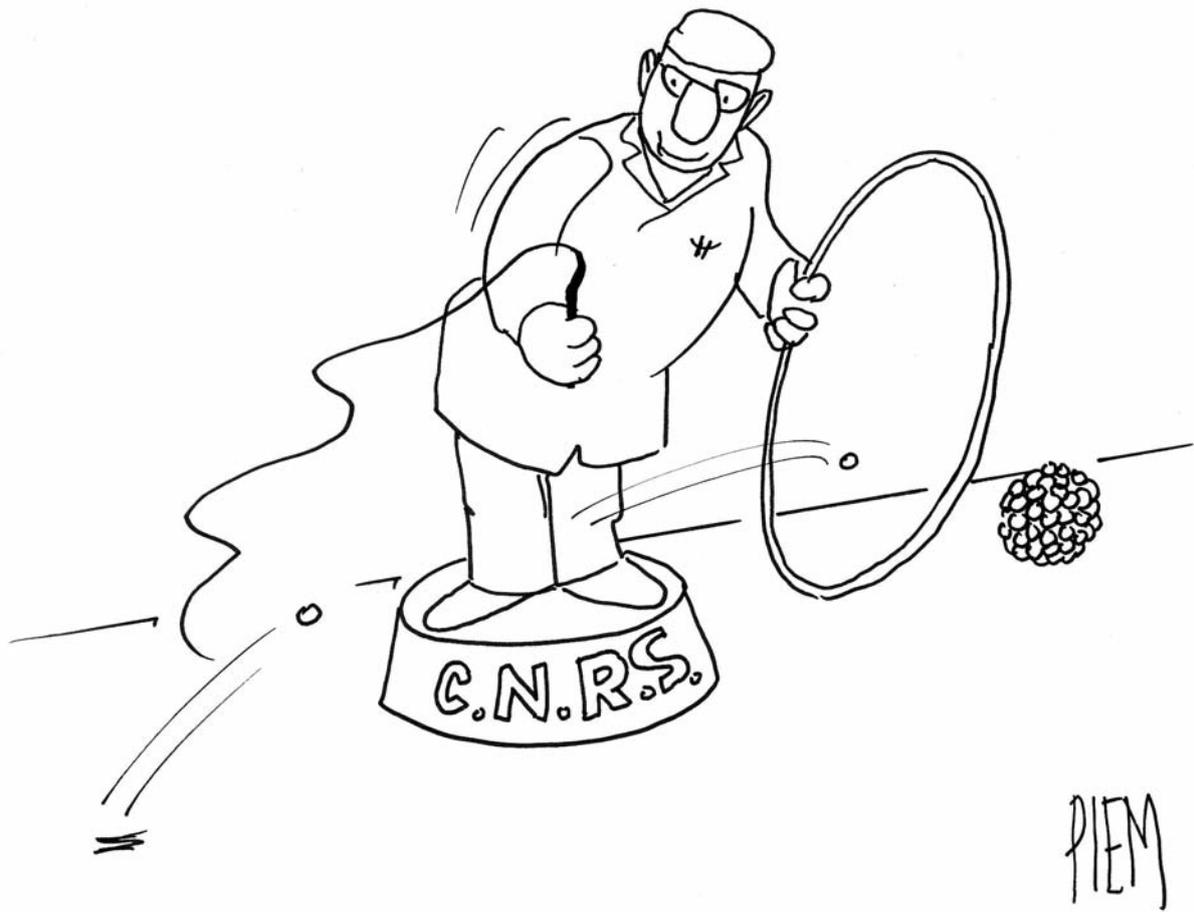
⁴ L'unité profonde qui ramène l'ensemble des aspects connus de la matière à des forces de même nature ne date que du milieu du XIX^e siècle. Jusqu'à cette époque les chimistes, adeptes pour la plupart du vitalisme, pensaient que les composés « organiques », produits par des êtres vivants, étaient d'une autre essence que les composés minéraux. La première synthèse de l'urée par Friedrich Wöhler, en 1824, montra que les substances organiques pouvaient être synthétisées au laboratoire et ne différaient pas des autres produits de la chimie. De très nombreuses synthèses de composés organiques, dues en particulier à Marcellin Berthelot, vinrent définitivement conforter l'unicité de la matière.

⁵ Il en existe un grand nombre, y compris le nôtre : Alain Sevin et Christine Dézarnaud Dandine, *Liaisons chimiques, Structure et réactivité*, Dunod, 2006.

Chapitre 1

Les atomes dans les liaisons

Un peu d'histoire et de science



La richesse de la nature est à la fois bornée et facile à atteindre ; mais celle des opinions vides se perd dans l'illimité.

Epicure¹

Impeccablement sanglé dans un smoking blanc en soie sauvage, il s'approche du manoir d'Ernst Stavro Blofeld. Un majordome lui demande :

- Qui dois-je annoncer ?

- Mon nom est Liaison, Jacques Liaison² !

Notre monde familier est constitué de liaisons entre atomes

Tous les corps que nous observons, tous les aspects de la matière résultent des différents types de liaisons que forment les atomes entre eux. Où que se pose notre regard, le monde déploie son infinie variété. Si nous le dirigeons vers le ciel, nous avons le sentiment que l'environnement qui nous est proche doit se retrouver, sous d'autres formes, dans d'autres conditions, dans les milliers de points lumineux que nous distinguons ou imaginons et dont nous savons depuis peu de temps que ce sont des étoiles, des galaxies, elles-mêmes formées de milliards d'astres de toutes sortes. Il nous est difficile de nous convaincre que cette pensée est paradoxale. En effet, en moyenne, l'univers est très peu dense. La densité critique qui devrait permettre de décider s'il restera en expansion ou bien finira par revenir à un « big crunch » final, est de 3 à 5 particules par mètre cube³. Ces particules sont pour l'essentiel des atomes d'hydrogène isolés (H). Les atomes plus lourds dont nous sommes constitués (le carbone C, l'oxygène O, l'azote N, pour l'essentiel), ne constituent qu'une part infime de la matière totale⁴. Notre planète, ainsi que celles qui lui ressemblent, constituent des exceptions locales.

Il nous faut considérer que la connaissance de la matière que nous avons est fortement conditionnée par les interactions que nous avons avec elle. Cet aspect a constitué pendant des siècles la justification du modèle géocentrique : la Terre étant le centre de l'univers et l'homme un observateur unique et privilégié. Ceci nous aide à comprendre combien, au fil du temps, le vocabulaire anthropocentrique a envahi, saturé même, ceux de la physique, de la chimie, de la biologie. Depuis Galilée le modèle géocentrique a été abandonné et, depuis Darwin, nous savons que l'homme n'est qu'une espèce émergeant d'une très complexe évolution. Ayant perdu notre rôle privilégié, un nouveau principe guide toute démarche scientifique : les lois que nous observons et démontrons dans des conditions loca-

¹ Epicure, *Lettres, maximes, sentences*, Traduction de Jean-François Balaudé, Le livre de poche, 1994, p. 202.

² Traduction de l'anglais : « *My name is Bond, James Bond* ».

³ Le résultat dépend de l'estimation de certaines constantes. James Rich, *Principes de cosmologie*, adaptation française de Jean-Louis Basdevant, Les Editions de l'Ecole Polytechnique, 2002, p. 23. Pour un ouvrage plus accessible, voir Steven Weinberg, *Les trois premières minutes de l'Univers*, Editions du Seuil, 1988, p. 211.

⁴ De ce fait, leur détection, à l'état de traces, n'est possible que depuis peu de temps. Mais il ne se passe pas de jour sans que de nouvelles observations en confirment la présence dans les milieux interstellaires.

les, sont celles qui agissent dans tout l'univers. Ce principe a été explicitement utilisé par Einstein pour bâtir la théorie de la Relativité Restreinte. Il constitue depuis lors la toile de fond de toute la cosmologie contemporaine sous le nom de Principe Cosmologique⁵ postulant que les lois de la science sont invariantes, en tous lieux, de tous temps⁶. Toutefois, ce principe d'objectivité absolue est difficile à respecter en toutes circonstances. Il nous est très difficile d'oublier la longue évolution des théories de la matière, empreintes de langage usuel, de comparaisons tirées de l'expérience commune et de parvenir à la stricte objectivité scientifique qui devrait être de règle. Comment, par exemple, pouvons-nous parler de « l'affinité électronique » ou bien de la « forme bateau du cyclohexane », deux expressions familières aux chimistes, sans être envahis par des images qui nous rattachent à notre expérience de la vie ?

Aperçu sur l'évolution des notions fondamentales

L'ensemble des termes que nous utilisons à satiété, comme ceux d'atome, d'élément, de substance, de symétrie, de hasard, de vide etc. ont une longue histoire que nous occultons la plupart du temps en donnant à ces notions un sens restreint, utile à nos pratiques particulières. Pour comprendre la multiplicité de sens qu'ils sous-entendent, il est important de connaître leurs racines profondes et de suivre, ne serait-ce que dans un survol très rapide, l'essentiel de leur filiation. Ce sont les philosophes de la Grèce antique⁷, à partir du V^e siècle *av. J.-C.* qui ont, les premiers, cherché à fournir des explications rationnelles du monde (nature en grec se dit *physis*), distinctes des grandes mythologies et des différentes théogonies. En fondant des théories aussi complètes que possible, exemptes de contradictions internes, basées sur un faible nombre de principes généraux, ils inauguraient la démarche axiomatique que suivra Euclide peu de temps après, au III^e siècle *av. J.-C.*, pour fonder la géométrie avec ses fameux *Eléments*. Nous assistons avec ces philosophes aux premiers pas de la physique et plus généralement de la science telle que nous la connaissons aujourd'hui. Dans les paragraphes qui suivent, nous allons distinguer deux grands types de théories. Les premières considèrent une structure du réel continue à toute échelle, les secondes, basées sur l'atomisme, postulent une structure discontinue à l'échelle microscopique.

Les quatre éléments. La plupart des philosophes antiques, à l'exception des atomistes, considèrent que l'ensemble du monde résulte des combinaisons variées de quatre substances ou éléments premiers : l'eau, le feu, l'air et la terre. Ces éléments sont des principes universels, susceptibles de donner forme et réalité aux corps réels qui les contiennent en proportions variables. Le feu, la terre réels, qui sont infiniment variables dans leurs manifestations ne sont que des matières pre-

⁵ Pour une discussion très accessible : Jean-Pierre Luminet, *L'univers chiffonné*, Folio Essais, 2005, p. 71-72.

⁶ Une étude détaillée de ces invariances se trouve dans *Symétrie m'était contée, Histoires de symétries*, Christine Dézarnaud Dandine, Alain Sevin, Piem, Editions Ellipses, 2007, chapitre 6.

⁷ Nous avons centré notre étude sur cette seule filiation. L'étude des théories hindoues et chinoises dépasse le cadre de cet ouvrage. Ces traditions se sont développées indépendamment et n'ont joué qu'un rôle secondaire dans l'évolution de la science occidentale. (Voir B. Pullman, référence 16).

mières auxquelles manque la forme, tout comme l'argile qui va servir au potier pour créer un vase. Le feu-élément est au feu qui se tient devant nous, ce que le concept de chaise est à la chaise sur laquelle nous sommes assis. Ainsi, par exemple, tout liquide est composé essentiellement d'eau-élément, mais aussi de traces d'autres éléments qui lui donnent son caractère propre, unique. Nous retrouverons cette théorie jusqu'à la naissance de la chimie moderne, vers la fin du XVI^e siècle.

La théorie élémentale d'Empédocle

Dans l'ensemble des doctrines présocratiques, nous avons choisi d'illustrer particulièrement celle d'Empédocle⁸ (vers 490-435 av. J.-C.). Ce philosophe a exercé une influence majeure sur l'ensemble de la philosophie et de la physique antiques. Il considère les quatre éléments qu'il appelle « racines » comme formant un tout irréductible et c'est cette notion qui a connu la plus grande postérité. Chaque chose, chaque être, sont formés d'un mélange subtil de ces quatre principes, qui, mis ensemble, permettent à la forme de s'exprimer, de se matérialiser⁹. Les éléments s'unissent ou se séparent sous l'action de deux principes généraux, l'Amour (ou l'Amitié) et son antagoniste, la Haine (ou la Discorde) :

Par ces propos on pourrait supposer qu'il [Empédocle] fait allusion à la double ordonnance du monde :

*C'est que les éléments - le Soleil et la Terre
Et le ciel et la mer¹⁰ - sont étroitement liés
A leurs propres parties, que loin d'eux la naissance
A fait se disperser dans les êtres mortels.
De la même façon, tout ce qui se rassemble
S'assemble et se chérit sous la loi d'Aphrodite.
Mais les choses qui sont tout à fait séparées
Entre elles par le genre et la composition
Du mélange, et la forme en elles imprimée,
Irréductiblement demeurent ennemies.
De s'unir elles n'ont jamais l'habitude,
Elles portent le deuil imposé par la Haine
Qui en elle introduit le vif désir de maître.*

Et en effet, il a montré que chez les mortels ces éléments se trouvent harmonieusement combinés et que l'unification est davantage réalisée chez les êtres intelligibles que chez

*Tout ce qui se rassemble
S'assemble sous la loi d'Aphrodite*

et que cela se produit également partout ; mais que les intelligibles sont portés à la ressemblance par l'Amitié, tandis que les sensibles, dominés par la Haine et

⁸ *Les présocratiques*, édition de la Pléiade sous la direction de Jean-Paul Dumont, Gallimard, 1988, p. 319-439 ; les mêmes extraits se trouvent en format de poche dans *Les écoles présocratiques*, édition établie par Jean-Paul Dumont, Folio essais, 1991, p. 127-247. Une somme d'études et d'érudition se trouve dans Jean Bollack, *Empédocle, I, (Introduction à l'ancienne physique), Empédocle II (Les origines), Empédocle III (Les origines)*, Tel Gallimard, volumes 201 à 203.

⁹ A l'opposé de cette doctrine, Héraclite posait que toute substance émanait du feu, qui en se condensant donnait d'abord l'eau, puis la terre si le processus continuait.

¹⁰ Nous reconnaissons évidemment dans cette métaphore les quatre éléments : le feu, la terre, l'air et l'eau.

davantage dispersés, occupent une place inférieure dans la génération résultant du mélange, en donnant naissance aux formes imaginées et *imprimées*, dans le mélange, qui sont produites *par la Haine*, et n'ont pas *l'habitude* de s'unir mutuellement¹¹.

Un commentaire de saint Hippolyte¹² (170-235), donc très postérieur aux écrits d'Empédocle, révèle la pérennité de ses conceptions et la façon dont sa pensée était encore reçue par les premiers chrétiens. Selon Hippolyte, pour Empédocle, l'Amitié et la Haine sont des principes immortels et sont les seules forces qui régissent l'ensemble des éléments :

L'artisan et l'auteur de la génération de toutes les choses engendrées est la Haine funeste ; en revanche, l'Amitié est responsable de la sortie des engendrés hors du monde, de leur changement et de leur restauration en l'Un. A propos de la haine et de l'Amitié, Empédocle dit qu'elles sont toutes deux immortelles, non engendrées et le principe de la génération ; il ajoute qu'elles n'ont jamais admis d'autres forces qu'elles, et dit à peu près ceci :

*Comme elles ont été, ainsi elles seront.
Et le temps infini, je crois, de ces deux forces
Jamais ne sera veuf.*

Qui sont ces forces ? La Haine et l'Amitié. Car leur devenir n'a pas eu de commencement ; au contraire, elles ont été et seront toujours¹³.

Bernard Pullman dans son ouvrage magistral *L'atome dans l'histoire de la pensée humaine*¹⁴ commente les deux principes antagonistes d'Empédocle qui, selon leurs poids respectifs, déterminent la nature des substances réelles :

Pour bien souligner leur caractère primordial [des éléments], Empédocle les appelle « racines ». Cette multiplicité de substances originales, par opposition à l'unicité clamée en particulier par Parménide, restaure la notion de changement. Celui-ci s'obtient essentiellement par leur mélange et leur séparation, ces opérations s'effectuant sous l'influence de deux agents externes (agents matériels que l'on ne doit pas assimiler aux *forces* attractives et répulsives, mais qui en sont néanmoins une prémonition), l'amour et la haine, qui, ensemble, représentent la « nécessité ». Le devenir s'explique donc comme ayant lieu *dans* l'être plutôt que comme étant celui *de* l'être. Il n'y a ni génération, ni destruction mais seulement changement dans la composition des choses¹⁵.

Pour Empédocle, les éléments ne sont pas imperméables, ils sont poreux, ce qui permet leur mélange :

Chaque substance primordiale est considérée comme étant constituée de petites particules homogènes, invariables, insécables et éternelles, séparées par des

¹¹ Simplicius, *Commentaire sur la physique d'Aristote*, 160, 26, extrait de *Les écoles présocratiques*, ouvrage cité, *Empédocle*, XXII, p. 191. Nous avons respecté les italiques de cette édition.

¹² Saint Hippolyte (170-235) prêtre romain qui vécut en Sardaigne, auteur d'une *Réfutation de toutes les hérésies*.

¹³ Saint Hippolyte, *Réfutation de toutes les hérésies*, VII, 29, *Les écoles présocratiques*, ouvrage cité, *Empédocle* XVI, p. 187.

¹⁴ Bernard Pullman, *L'atome dans l'histoire de la pensée humaine*, Fayard, 1995.

¹⁵ Bernard. Pullman, ouvrage cité, p. 38, italiques de l'auteur.

pores (mais non le vide, qu'Empédocle récuse). L'ensemble des corps observables se forme par la pénétration des particules d'une substance dans les interstices qui séparent les particules de l'autre, le mélange étant facilité lorsque ces interstices ont la dimension appropriée¹⁶.

Comme nous le verrons plus loin, cet ensemble de propriétés rapproche la théorie d'Empédocle de celle des atomistes. Toutefois, il en reste éloigné dans la mesure où ses racines ne sont qu'au nombre de quatre, qu'il récuse le vide et que les principes extérieurs, l'Amour et la Haine en proportions variables, qui unissent ou séparent les éléments, n'agissent pas au hasard, mais selon certaines règles qui permettent la reproductibilité des phénomènes.

La théorie de la matière selon le Timée de Platon

Dans le *Timée*¹⁷, Platon expose en détail sa conception du monde et ce qui peut être considéré comme la première expression d'une physique géométrique. Le monde a été formé par un Démon, dieu bâtisseur, s'inspirant des Idées. Les Idées sont extérieures au monde des humains, elles sont parfaites, éternelles, immuables. Leur langage est mathématique. Au cours de son action, le Démon a divisé le monde en deux : la sphère supralunaire, domaine idéal, sphérique, incorruptible, animé d'un mouvement circulaire éternel et le monde sublunaire, le nôtre. Il s'est fait aider par des dieux subalternes pour bâtir ce dernier. Ce monde est imparfait car soumis au devenir. Platon utilise à cet effet des données antérieures, dont certaines viennent de l'école pythagoricienne et des mathématiciens qu'il a côtoyés. Il s'inspire aussi en partie des atomistes et également d'Empédocle.

Suivant la théorie élémentaire de ce dernier, Platon considère que l'ensemble des corps que nous observons et dont nous-mêmes sommes formés sont composés de quatre éléments : l'eau, l'air, le feu et la terre. Ces éléments s'échangent, se mélangent dans un processus incessant. Au sein de ces transformations, il recherche les constantes, les éléments ultimes, invariants, permanents. Nous retrouvons dans cette préoccupation celle de l'ensemble des philosophes présocratiques. Ce qui fait la grande originalité de Platon, c'est qu'il cherche à décrire la forme de ces constituants élémentaires. Mais il s'agit d'une forme au sens mathématique abstrait et non pas uniquement une forme sensible comme par exemple une sphère ou un polygone. Cette forme est une Idée, un moule parfait, que seule la description mathématique nous permet de comprendre et manipuler, puisque cette description est le langage, imparfait à notre échelle, des vérités éternelles. Nous pourrions la comparer à un algorithme ou un plan d'ingénieur, contenant en germe l'ensemble d'un projet. L'analogie avec le code génétique peut également être envisagée. Ce concept de forme est aujourd'hui devenu primordial dans toutes les théories de la matière que ce soit à l'échelle microscopique ou à celle de l'Univers tout entier. Il

¹⁶ Ibidem, p. 38

¹⁷ Nous nous référons à l'édition du *Timée* de la collection Garnier-Flammarion, traduction de E. Chambry, Paris, 1969. En regard de chaque référence, nous citons la page correspondante de l'édition du *Timée* dans l'édition Les Belles Lettres, texte traduit et établi par Albert Rivaud, Paris, 1985, avec l'abréviation suivante : (B. L. p. x).

suffit de constater à quel point le terme « formalisme » a saturé le vocabulaire scientifique pour en avoir un aperçu.

La genèse des solides parfaits

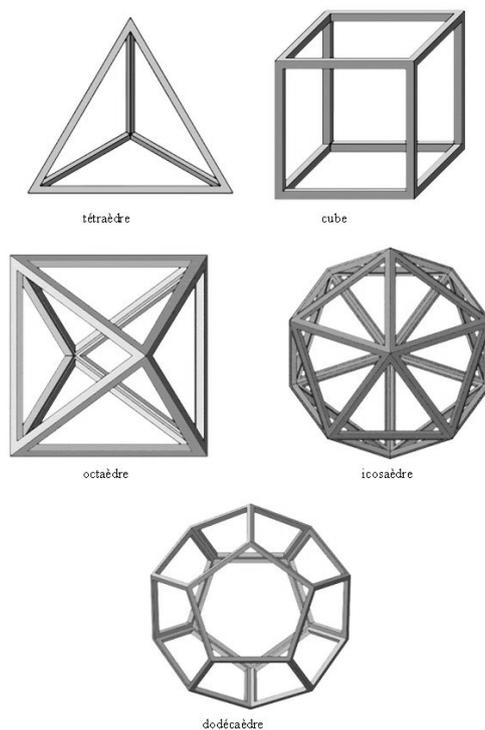
L'ensemble du monde matériel peut se réduire à des composants élémentaires discrets qui sont des entités mathématiques. Ces composants élémentaires fondamentaux doivent être aussi parfaits que possible. Pour Platon, cela revient à dire qu'ils ne peuvent être que des objets géométriques purs, dotés de la plus grande symétrie possible.

Et maintenant, il me faut m'efforcer de vous découvrir par un raisonnement assez insolite la manière dont fut disposé et naquit chacun de ces éléments. [...] Il faut toujours considérer que le Dieu, dans la mesure où l'*anagké* se laissait persuader, les a partout réalisés de façon exacte et a ainsi harmonisé mathématiquement les éléments¹⁸.

Voilà pourquoi Platon fait correspondre ces composants élémentaires à quatre des cinq polyèdres (tétraèdre, cube, octaèdre, icosaèdre, dodécaèdre) connus à cette époque. Ces polyèdres réguliers, inscriptibles dans une sphère, sont considérés comme les objets géométriques les plus parfaits selon le désir du Demiurge. La fabrication du monde se fait ainsi à partir des éléments les plus semblables aux formes intelligibles : les quatre polyèdres, associés aux éléments, se construisent à partir d'un triangle rectangle isocèle et d'un second triangle rectangle scalène qui est la moitié d'un triangle équilatéral¹⁹. La figure suivante représente les différents solides platoniciens.

¹⁸ *Le Timée*, ouvrage cité, p. 432, parties 53c, (B. L. p. 173), et 56 b-c, p. 434, (B. L. p. 176-177). L'*anagké* est le destin et la nécessité, que tous les Dieux respectent et auxquels ils obéissent tous.

¹⁹ *Ibid*, p. 432-433, (B.L. 53c-54c, p. 173-175).



Les solides platoniciens (tirés de www.kulturica.com/pythagore/solides.htm)

Dans un tableau sont regroupées toutes les propriétés des quatre polyèdres auxquels sont associés les quatre éléments. A chaque élément est associé un solide parfait. Ce dernier est constitué par la duplication d'une même figure élémentaire selon la table suivante :

<u>élément</u>	<u>polyèdres</u>	<u>nombres de faces</u>	<u>nombre de triangles</u>
feu	tétraèdre	4 triangles équilatéraux	24 scalènes ²⁰
air	octaèdre	8 triangles équilatéraux	48 scalènes
eau	icosaèdre	20 triangles équilatéraux	120 scalènes
terre	cube	6 carrés	24 isocèles

Le cinquième solide parfait connu à cette époque, le dodécaèdre qui est formé de douze pentagones réguliers n'apparaît pas dans cette liste. La raison en est que ce polyèdre ne peut être rapporté à une construction élémentaire basée sur les triangles précédents. Ce solide dont la forme, pour Platon, s'apparente le plus à la sphère, fut choisi par Dieu pour représenter l'Univers.

Il restait encore une cinquième combinaison. Dieu s'en est servi pour achever le dessin de l'Univers²¹.

²⁰ Pour compter convenablement les triangles rectangles, il faut considérer que dans chaque triangle équilatéral, il est possible de dessiner six triangles rectangles scalènes à partir des trois sommets.

²¹ Ibid. p. 433, (B. L. 55c, p. 175).



La sphère est également absente de cette liste puisque sa perfection est l'attribut de l'âme du monde et si nous l'ajoutons aux cinq solides parfaits, nous obtenons les figures géométriques qui présentent les symétries les plus complètes, les plus « parfaites ».

L'orateur Timée décrit ensuite l'algorithme, le principe de construction qui permet la synthèse des solides, donc des éléments, à partir des constituants élémentaires. Il n'est pas nécessaire de revenir sur ces constructions. Nous pouvons illustrer la nature des lois de composition à l'aide des quelques exemples suivants :

$$1 \text{ (feu)} = 4 \text{ triangles équilatéraux (tétraèdre)}$$

$$2 \text{ (feu)} = 8 \text{ triangles équilatéraux} = 1 \text{ (air) (octaèdre)}$$

$$1 \text{ (feu)} + 2 \text{ (air)} = (4 + 2 \times 8) \text{ triangles équilatéraux} = 1 \text{ icosaèdre (eau)}$$

La construction de Timée est achevée une fois que les éléments et leurs combinaisons sont décrits. Le devenir dès lors consiste à mélanger sans cesse ces corps dont la forme parfaite, la symétrie, subsistent, restent inaltérées au sein de tous les changements. Le monde évolue, change, se dégrade, la symétrie persiste car c'est une forme pure.

La correspondance du réel avec les Idées s'exprime par l'intermédiaire de la symétrie (*sym metron*, littéralement : avec mesure) qui est synonyme de proportion, de rythme, d'harmonie, tous tendant vers la Beauté, la perfection. Nous verrons par la suite que cette première définition de la symétrie revêt pour nous une importance primordiale car nous la retrouverons tout au long de notre promenade à travers les formes de la matière. C'est son approche géométrique de la structure de la matière qui caractérise l'originalité profonde de Platon. Sa théorie des solides associés aux éléments révèle des parentés avec la pensée des atomistes, mais il reste cependant difficile de faire un trop grand rapprochement. Bernard Pullman souligne ce dilemme :

Dans ces conditions, Platon a-t-il une place dans l'histoire du « mouvement » atomique ? Je dirai oui en ce qui concerne la « pensée » atomique, non au regard de la « théorie » atomique. Ainsi, à la fois par ses intentions et par son concept des polyèdres-corpuscules, construits sur deux types et deux types seulement, de surfaces triangulaires (même si celles-ci peuvent comporter un certain nombre de variantes dimensionnelles), il s'inscrit dans un système que certains qualifient « d'atomisme géométrique » (dénomination qu'il aurait sans doute récusée). D'autre part, son approche picturale de l'atomisme est si fantaisiste, ses proportions si arbitraires, ses jugements esthétiques tellement artificiels que, dans l'ensemble, on ne saurait s'étonner qu'il n'ait guère joué de rôle significatif dans la trame du développement de la théorie atomique, celle qui se rattache à sa formulation moderne²².

La théorie des quatre éléments revue par Aristote

Aristote, bien que resté longtemps élève de Platon, critique vivement l'ensemble de ses conceptions, en particulier la référence aux Idées. Dans sa *Physique*²³, qui est résolument tournée vers le comportement observé du réel, Aristote

²² B. Pullman, ouvrage cité, p. 76.

²³ Aristote, *Physique*, édition en deux tomes d'Henri Carteron, Les Belles Lettres, 1983.

reproche ouvertement à Platon de mélanger l'observation et la réflexion métaphysique, il exprime son pragmatisme dans une véritable pétition de principe :

Quant au principe formel, la question de savoir s'il est un ou multiple et quelle est sa nature (ou leur nature²⁴) revient à la philosophie première qui doit y donner une réponse précise ; jusque-là, en attendant, laissons-la de côté. Quant aux formes physiques périssables, nous en parlerons dans nos indications ultérieures²⁵.

Ce qu'il reproche à Platon, c'est de ne pas faire de différence entre l'activité du physicien, porté sur les objets et celle du mathématicien qui étudie les propriétés des corps en les considérant comme des formes abstraites, dépouillées des attributs qui les distinguent :

Après avoir déterminé en combien de sens s'étend la nature, il convient d'examiner par quoi le mathématicien se distingue du physicien ; en effet, appartiennent aux corps physiques les surfaces, solides, grandeurs et points qui sont l'objet des mathématiques. En outre, l'astronomie est autre chose que la physique ou n'est-elle pas plutôt partie de la physique : il serait absurde, en effet, qu'il appartint au physicien de connaître l'essence du soleil ou de la lune, et non aucun de leurs attributs essentiels, d'autant qu'en fait, les physiciens parlent de la figure de la lune et du soleil, se demandant si le monde et la terre sont sphériques ou non. Ce qu'il faut dire, c'est donc que ces attributs sont aussi l'objet des spéculations du mathématicien, mais non en tant qu'ils sont chacun la limite d'un corps naturel ; et s'il étudie les attributs, ce n'est pas en tant qu'ils sont attributs de telles substances²⁶.

Aristote reproche à Platon d'utiliser les Idées, abstraites, extérieures à notre domaine d'observation, tout comme il reproche aux autres philosophes d'avoir utilisé des principes, comme l'Amour et la Haine pour Empédocle, qui ne relèvent pas du domaine de la physique, mais de celui de la métaphysique. Pour lui, les formes qui nous paraissent idéales sont naturelles, nous les trouvons parfaites par convention. Les Idées ne sauraient avoir d'existence autonome, hors de nous.

Aristote rejette une telle séparation entre les choses sensibles et leur essence. Toute sa vision du monde repose sur le concept d'une liaison indissoluble entre matière et *forme* qui représentent les deux « principes » de l'être, l'appellation forme ne se limitant pas à la signification habituelle, géométrique, du mot mais représentant l'ensemble des propriétés qui définissent la spécificité d'un objet, autrement dit qui font qu'il est ce qu'il est. La liaison est indissoluble, en ce sens que les deux principes, bien que discernables par la pensée, ne sauraient exister séparément l'un de l'autre. Tout objet est le produit combiné des deux. C'est la doctrine d'hylémorphisme (*hylé*=matière, *morphé*=forme)²⁷.

²⁴ Il s'agit du ou des principes qui donnent forme à la matière.

²⁵ Aristote, ouvrage cité, Tome I, Livre I-9, 192 b, p. 50.

²⁶ Ibidem, Livre II-2, 193 b, p. 62.

²⁷ B. Pullman, ouvrage cité, p. 80.

Adversaire résolu du vide, il démontre avec insistance qu'il conduit à de multiples apories, en particulier au *Livre IV* de sa *Physique*²⁸. Ceci constitue un argument réhibitoire contre la doctrine atomiste (voir son exposé plus loin). Dans *De la génération et de la corruption*²⁹, il conteste avec insistance les théories de Démocrite relatives à la constitution des corps par l'union des atomes (*génération*) et leur séparation en particules libres ou leur disparition (*corruption*). Il distingue également l'*altération* qui diffère de la génération en ce sens qu'elle porte sur les modifications accidentelles d'une substance, par exemple quand l'eau se change en vapeur, sans qu'il y ait corruption (disparition de substance).

Mais la génération et la corruption absolues et complètes ne sont pas définies, comme certains philosophes [Démocrite et les atomistes] le soutiennent, par l'union et la séparation, tandis que le changement dans le continu serait l'altération. Bien au contraire, c'est là où toute l'erreur réside. Il y a, en effet, génération et corruption absolues, non pas du fait de l'union et de la séparation, mais quand il y a changement total de telle chose à telle autre chose. [...] Quand c'est en ces facteurs constitutifs mêmes que le changement a lieu, ce sera la génération et la corruption ; mais quand c'est dans les qualités de la chose, et par accident³⁰, ce sera une altération³¹.

Ces considérations deviennent plus aisées à comprendre une fois qu'Aristote expose sa propre théorie des éléments. A la théorie des quatre éléments d'Empédocle et de Platon, il oppose en effet la sienne, basée sur l'existence empirique de quatre « qualités élémentaires », opposées par paires : le chaud et le froid, le sec et l'humide. Ces qualités peuvent être également considérées comme des éléments³² puisqu'elles sont antérieures à la composition de tout corps :

Puisque les qualités élémentaires sont au nombre de quatre, et que ces quatre termes peuvent être combinés en six couples, mais que, par contre, les contraires ne peuvent, en vertu de leur nature être couplés (car la même chose ne peut être chaude et froide, ou encore sèche et humide), il est évident que seront au nombre de quatre les couples de qualités élémentaires chaud-sec, chaud-humide, et, inversement, froid-humide, froid-sec. Et ces quatre couples sont attribués, comme une conséquence logique de notre théorie, aux corps qui nous paraissent simples, le feu, l'air, l'eau et la terre. Le feu, en effet est chaud et sec, l'air, chaud et humide (l'air étant une sorte d'exhalaison), l'eau, froide et humide, la terre, froide et sèche : on aboutit ainsi à une distribution rationnelle des différences parmi les corps premiers, et le nombre de ces corps est conforme à la logique de notre théorie.

La figure 1 résume l'ensemble de cette doctrine :

²⁸ Ouvrage cité, Livre IV, parties 6 à 9, (213 a – 216 b).

²⁹ Aristote, *De la génération et de la corruption*, traduction de J. Tricot, Vrin, 2005.

³⁰ Par exemple, quand l'eau se transforme en glace, une seule de ses propriétés varie, sa forme extérieure, mais c'est toujours de l'eau qui peut revenir à son état initial.

³¹ *De la génération et de la corruption, ouvrage cité*, Livre I, 2, 317 a, p. 45. Aristote revient sur cette critique avec d'autres arguments dans son *Traité du Ciel*, traduction de J. Tricot, Vrin, 1998, III, 4, 302 b à 303 b, p. 134-138.

³² Ibidem, Note 1 de J. Tricot, p. 126.