

Ce que les nanoparticules font aux chimistes

Dominique VINCK

UNIVERSITE DE LAUSANNE

Une proposition pour une chimie durable

Les chimistes ont la possibilité de se saisir collectivement de la poussée des nanosciences pour intégrer la problématique du devenir des substances dans les écosystèmes dès leur conception et la révision des procédés industriels (nano-catalyse). Cela suppose de développer une nouvelle alliance entre chimie, écologie chimique, ingénierie écologique et écotoxicologue.

Résumé

En observant les dynamiques scientifiques et institutionnelles à l'œuvre autour du développement des nanosciences et des nanotechnologies, on observe des rapprochements entre certaines disciplines, dont la chimie, et la transformation de leur identité et de leurs frontières. Ce chapitre rend compte de la manière dont la communauté des chimistes réagit à ces transformations mais aussi comment elle perçoit les alertes sur l'environnement et sur les risques toxicologiques et éco-toxicologiques potentiels et ce qu'elle en fait. On constate alors que les nanoparticules impactent la communauté chimique et contribuent à la verdir (en termes d'image dans la société comme en termes de réduction effective des nuisances) encore un peu plus. Le texte tente de qualifier le phénomène et de répondre finalement à la question : « comment les nanoparticules poussent la chimie vers le développement durable ? »

La discipline dans le champ des nanos

Bien que la chimie soit une discipline relativement jeune (deux siècles), elle s'est considérablement transformée au cours du temps, tant au niveau des représentations théoriques qu'elle se fait de la matière qu'au niveau de ses instruments d'intervention. Le développement de la mécanique quantique en physique, par exemple, a conduit les chimistes, fin des années 1950, à penser autrement leurs objets en les arraisonnant au calcul. Elle serait alors devenue une science exacte alors qu'elle avait surtout une (peu sérieuse) réputation d'artisanat et d'empirie. Sa proximité et ses échanges parfois difficiles avec la physique ne l'ont pas laissée inchangée dans ses manières de penser son objet et de se penser elle-même

comme discipline. Toutefois, ce n'est que tardivement qu'elle change ses pratiques en conséquence car si les équations de la mécanique permettent de définir, en principe, la chimie, elles restent pratiquement incalculables jusqu'au développement et à la démocratisation assez récente des ordinateurs. Entre temps, les chimistes ont continué à construire des représentations phénoménologiques opérationnelles.

Aujourd'hui, l'émergence des nanosciences pourrait constituer un bouleversement équivalent pour la discipline. Non seulement, il est question d'un mouvement inéluctable de convergence entre les disciplines au fur et à mesure que les chercheurs descendent dans l'échelle métrique et se rapprochent du nanomètre, mais aussi de nouveaux instruments (microscopes à force atomique notamment) qui auraient bouleversé les manières de travailler. Effectivement, lorsqu'on entend les physiciens, tout laisse penser qu'ils ont vécu une révolution en deux temps : le premier quand Richard Feynman, en 1959, devant l'*American Physical Society*, attire l'attention sur la possibilité de réorganiser la matière atome par atome et de faire tenir le contenu de l'*Encyclopedia Britannica* sur la tête d'une épingle ; le second, à partir de 1981 avec l'apparition d'un nouveau type de microscope qui rend possible l'observation et la manipulation individuelle des atomes et des molécules pour construire des assemblages (démarche bottom-up). Ce second saut, technologique, pour les physiciens correspond à un changement majeur. Ils peuvent enfin passer de l'équation à la manipulation d'un objet visualisé via la construction d'une image. Le fait de passer par de telles images permet de délaissier les équations généralisatrices et approximées pour tendre vers un calcul exact.

Les chimistes, manifestement, sont moins bouleversés que leurs grands frères physiciens. À les entendre dire, la révolution nano ne les émeut pas beaucoup. Cette révolution, ils l'avaient faite bien avant, avec la compréhension, même approximative, de l'atome. Depuis, ils ont toujours vécu dans l'idée du bottom-up, dans l'idée de fabriquer eux-mêmes (la synthèse) l'objet qu'ils étudient (les molécules, les matériaux) et d'agréger les choses jusqu'à créer la vie. La chimie est une science habilitante (Fürstner, 2001). Cette pensée existe depuis un siècle et demi et constitue une des deux faces de leur paradigme (l'autre face étant l'analyse). Dans cette perspective, les chimistes donnent l'impression d'être familier, depuis longtemps, avec ce qui apparaît être un nouvel imaginaire chez les physiciens¹. Chez les chimistes, cet

¹ Bien que Feynman écrit un jour, en 1988, sur un tableau : « *Ce que je ne peux pas créer, je ne peux pas le comprendre.* » (<http://eurserveur.insa->

imaginaire est plutôt indexé sur le tableau de Mendeleïev pensé comme l'ensemble des briques qui permettent de reconstruire toute chose, sur la pratique bien ancienne de la synthèse, sur les travaux de Crick et Watson quand ils fabriquent une représentation de la structure en double hélice de l'ADN qui connaît d'importants développements avec la reconnaissance moléculaire, la chimie supramoléculaire (sorte de sociologie des molécules, manière dont elles interagissent, se reconnaissent, s'assemblent ou s'organisent) et l'électronique moléculaire. Le surgissement des nanos, pour les chimistes, ne serait pas, conceptuellement, un gros bouleversement. Il est en phase avec la vision que les chimistes se font d'eux-mêmes dans le futur, c'est-à-dire une science qui cherche « à construire avec une grande économie de moyens des systèmes moléculaires inspirés de la nature et dotés d'une forme d'intelligence. » (Compain et al, 2006)

Il y a pourtant bien des changements dans la discipline dont certaines tiennent en partie à l'émergence des nanosciences et nanotechnologies :

- L'émergence de nouveaux grands programmes de politiques scientifiques et technologiques, visant à mobiliser et à rapprocher physiciens, chimistes et biologistes, notamment, autour de la manipulation de la matière à l'échelle nanométrique, influe sur les stratégies de recherche de la communauté. À minima, certains re-nomment leurs objets de recherche et les habillent de nanoscience. D'autres se rapprochent effectivement des physiciens et/ou des biologistes pour se pencher sur de nouveaux objets, par exemple, le moteur moléculaire.
- Les recompositions internes à la discipline. Les chimistes, depuis un siècle, se sont divisés entre minéralistes et organiciens (chacun ayant son approche de la synthèse). Toutefois, avec les nano-objets, les organiciens se sont mis aux pratiques des minéralistes et un nouveau brassage interne à la discipline est à l'œuvre. Le changement est considérable mais il n'est pas certain que ce soit seulement un effet des nanos.
- La pratique de la synthèse, qui caractérisait autrefois le chimiste, n'est désormais plus son domaine réservé. Depuis l'avènement de l'ingénierie génétique, vingt ans avant celui des nanosciences, le biologiste en est aussi venu à fabriquer ses objets. Puis,

récemment, le physicien, avec les microscopes à force atomique et l'assemblage à l'échelle nanométrique eux aussi. Le chimiste n'est désormais plus le seul à fabriquer son objet. Ce trait qui typait son identité disciplinaire est désormais partagé avec d'autres. Qu'est-ce qu'un chimiste ? La question est ré-ouverte, en partie à cause des nanos et des pratiques interdisciplinaires où chimistes et toxicologues s'allient pour créer de nouvelles substances.

Au dire des chimistes eux-mêmes, la chimie est, par définition, une nanoscience puisque ses objets (atomes, molécules et agrégats) ont des dimensions nanométriques. Sa place dans les nanosciences et nanotechnologies a toutefois évolué considérablement ces dernières années. Peu de temps après le surgissement de la révolution nano chez les physiciens, il est apparu que la chimie était un outil fondamental pour l'approche bottom-up (assemblage de nano-objets par association d'atomes, de molécules et de particules) et la conception de méthodes d'assemblage (synthèse, auto-assemblage ou organisation dirigée). La fabrication d'une part des nanobriques peut se faire au moyen de méthodes chimiques conventionnelles permettant l'accès à des objets de taille intermédiaire et/ou à organisation contrôlée. Les chimistes élaborent ainsi des matériaux nanostructurés originaux comme les hybrides organominéraux aux multiples applications (catalyse, électronique, énergie photovoltaïque, revêtements et renforcements de propriétés mécaniques, stockage de l'énergie, etc.). Les chimistes renouvellent toutefois aussi leurs outils en s'approchant des biologistes et en essayant de copier le vivant ; ils font alors appel aux biomolécules, aux interactions avec des molécules du vivant ou aux organismes vivants eux-mêmes. Ils élaborent des objets de plus en plus complexes (macromolécules, nanoparticules, matériaux nanostructurés, assemblages de biomolécules et de nanoparticules, etc.). Là aussi, les frontières disciplinaires semblent s'estomper.

Sur le front de la physique, le même questionnement épistémologique, méthodologique et identitaire se pose autour de la maîtrise de la sélectivité que les chimistes abordent en utilisant leurs méthodes coutumières (utilisation de catalyseurs, fixation de groupements protecteurs ou de copules chirales). Or, il est possible que les outils de la physique s'imposent (comme cela a déjà été le cas pour l'analyse : Rayons X, résonance magnétique nucléaire, spectrophotométrie...) pour manipuler une partie d'une molécule, créer un état de transition voulu ou orienter la stéréosélectivité. Ainsi, que ce soit sur le front de la biologie, celui de la physique, mais aussi celui de

l'informatique, les chimistes entrevoient le risque de se faire absorber dans des problématiques, des enjeux et des démarches qui ne sont pas les leurs, surtout avec la convergence engagée avec le passage aux nanos. Leur souci est de voir comment renverser la tendance et de replacer « *le chimiste au cœur de la conception d'outils stratégiques pour ses recherches.* » (Compain et al, 2006)

Enfin, l'industrie, qui a largement soutenu la chimie en tant que science dont l'industrie a, par ailleurs, beaucoup bénéficié, se montre particulièrement intéressée par les nanoparticules et nanomatériaux de toutes sortes, ainsi que par l'amélioration des processus (catalyseurs nanostructurés et nanotechnologiques). Les enjeux économiques et industriels sont considérables. Les chercheurs en chimie et sciences des matériaux sont fortement mobilisés et boustés par les nanos.

La discipline face au risque nano

Les nano-objets ne sont pas seulement des objets de curiosité scientifique et de compétition industrielle. Ils sont aussi des objets potentiellement problématiques pour l'humanité et pour l'environnement. Certains d'entre eux, affirment les rapports institutionnels de plus en plus nombreux sur ce sujet, peuvent présenter des nuisances nouvelles du fait d'une association différente entre la toxicité chimique usuelle et des effets de taille et de forme. Qu'en font les chimistes ?

Le danger est une chose que connaissent les chimistes. Certains des produits qu'ils manipulent sont particulièrement nocifs. En principe, ils le savent, connaissent ces produits et ont appris à prendre des précautions appropriées, même s'ils ne les prennent pas nécessairement (non respect des consignes de sécurité comme le port d'équipements de protection individuel – gants, lunettes –, le travail sous hotte et le fait de ne pas de stocker les produits dans les bureaux). Ils ont aussi reçu l'enseignement des toxicologues et ont une idée des relations entre les doses et les effets. Habités à la question de la dangerosité, le fait que les particules ultrafines aient été rebaptisées sous le nom de nanoparticules n'est pas de nature à les effrayer. Beaucoup ne s'inquiètent donc guère ; ils font même preuve d'une certaine indifférence et d'un certain relativisme, d'autant plus qu'ils connaissent d'autres véritables dangers (contamination des nappes phréatiques, métaux lourds, etc.) pour lesquels des solutions adéquates ne sont pas encore apportées dans la société. Ceux qui fabriquent ou manipulent des nanoparticules eux-mêmes semblent plus se préoccuper par la manière de les manipuler efficacement que par les problèmes santé. Par ailleurs, de nombreux chimistes, de

toutes les manières, n'en fabriquent ni n'en manipulent, ou ne les manipulent que sous forme agrégée (non pulvérulente) ou incluses dans un support (liquide ou solide) quand ils les utilisent sous forme dispersée. Certains laboratoires sont ainsi moins concernés que ne le sont les chercheurs qui œuvrent dans la catalyse homogène, la chimie des polymères ou la biochimie. Dans certains laboratoires, le terme « nano » ne fait pas partie du vocabulaire, même s'il a tendance (effet de mode ou d'opportunité financière) à s'introduire partout.

Malgré cette relative indifférence, des chimistes de plus en plus nombreux se sentent concernés par le problème de la dangerosité des nanoparticules, soit parce qu'ils ont entendu des toxicologues ou des médecins du travail en parler, soit parce qu'ils sont déjà sensibilisés à un risque professionnel lié, par exemple, à la vétusté et à la dangerosité de leurs lieux de travail en rapport avec l'amiante. Globalement, le fait que des anti-nanos lancent des alertes sur d'éventuels risques de toxicités pour l'être humain et pour l'environnement n'a guère sensibilisé le chimiste de base. Par contre, ces lanceurs d'alerte ont inquiété les responsables de nombreuses institutions scientifiques (crainte d'une nouvelle affaire OGM) et les industriels (crainte d'un retournement des marchés). Si, durant quelques années, la tendance était au déni, aujourd'hui, il est évident que toutes les institutions prennent la chose au sérieux, même si elles concluent que certains dangers sont moindres que ce qui avait été imaginé. Dans certains laboratoires (par exemple, ceux qui travaillent avec des nanoparticules comme catalyseurs, beaucoup plus actifs que les grosses particules), les personnels de recherche s'interrogent et s'inquiètent pour leur santé, entre autres parce qu'ils manquent d'équipement de protection (de sorbonnes par exemple) ou manquent d'informations fiables. Aussi, les réunions d'informations et les campagnes de mesure (nanoparticules dans l'air, sur les surfaces ou dans des appareils) se multiplient. Quelques rares chercheurs font même valoir le droit de retrait. La chose est d'autant plus prise au sérieux dans la communauté que beaucoup veulent faire des nanoparticules parce qu'elles permettent une beaucoup plus grande réactivité.

La discipline se transforme-t-elle à cause des nanos, de leurs dangers potentiels et des débats qui les entourent ? Un tel phénomène s'est produit en toxicologie. Au 20^{ème} siècle, la toxicologie est devenue une science tournée vers l'élaboration et la mise en œuvre de réglementations protectrices. Elle est une science qui aide à la décision publique. Avec le développement des nanotechnologies, la toxicologie et écotoxicologie (auxquelles s'associent des chimistes, des physiciens, des juristes et des chercheurs en sciences sociales) sont convoquées pour jouer le même rôle en vue de participer à l'élaboration d'une réglementation

appropriée. Or, les nanoparticules mettent en cause leur paradigme fondamental « dose – effet ». La toxicité ne serait plus seulement une question de nature chimique du composé et de quantité mais aussi une question de taille et de forme des particules. Cela implique de reprendre l'étude d'innombrables substances qu'on pensait déjà bien connues, à commencer par le carbone (nanotubes notamment). Il s'agit aussi de prendre en compte les nouvelles formes créées par les chimistes et par les physiciens. Comme la communauté scientifique a pris conscience qu'elle est en train d'inventer de nouveaux objets dont certains pourraient être dangereux, la toxicologie se trouve dès lors mobilisée en amont de cette ingénierie des particules. Il s'ensuit un important changement pour la toxicologie (Kurath, 2010), classiquement en position d'analyser les effets de substances qui existent déjà, et désormais partie prenante de la recherche et au développement de matériaux bio-compatibles.

La chimie, inversement, va-t-elle intégrer, dans sa recherche fondamentale et dans sa recherche technologique, de telles préoccupations ? Le fait n'est pas encore manifeste mais divers indices le laissent à penser, en particulier l'engouement croissant des chercheurs vis-à-vis de l'articulation entre nanotechnologies et *chimie verte*. Ils s'enorgueillissent de jouer sur la grande réactivité de nanoparticules pour proposer des contributions au développement durable, par exemple, en remplaçant le platine par des nanoparticules de cobalt dans les piles à combustibles ou en réduisant l'utilisation de métaux lourds grâce à une technologie nanomagnétique et éviter l'utilisation de solvants toxiques. Des chercheurs se préoccupent de développer des problématiques de recherche d'autant plus « responsables » que la chimie fournit des produits dans tous les secteurs de l'existence. Fort des nouvelles possibilités offertes par le travail à l'échelle nanométrique, certains proposent de développer de nouvelles articulations avec l'écologie chimique, l'ingénierie écologique, les matériaux biosourcés et de contribuer ainsi à faire émerger une chimie verte pour le développement durable (cf. la liste des douze principes fondateurs de la chimie verte, dans laquelle le terme nano n'apparaît toutefois pas). La prise de conscience récente de l'étendue et des effets de la pollution a conduit à l'idée de changer le mode de développement de l'industrie chimique. Le développement des nanosciences et nanotechnologies est en voie d'être repris par la communauté chimiste pour verdir encore un peu plus la discipline : la chimie verte grâce à la nano-catalyse (Polshettiwar and Varma, 2010) et à la création de « substances bénignes par design. »

Conclusion

L'émergence des programmes de recherche et développement relevant des nanosciences et des nanotechnologies touche les chimistes à la fois sur le plan de leur identité disciplinaire (désormais d'autres disciplines se lancent dans la conception et dans la synthèse de nouvelles substances ou matériaux) et dans leurs responsabilités (en particulier au regard de la dangerosité des nouvelles substances). Des réagencements sont en train de s'opérer, lesquels esquissent une nouvelle réalité pour la chimie, plus proche d'une ingénierie socialement responsable que de l'analyse. Les problématiques des risques liés aux nanoparticules et des « substances bénignes par conception » conduisent au développement de nouvelles alliances avec toxicologues et écotoxicologues qui participent du verdissement de la discipline.

Bibliographie

Compain, P., et al (2006), Alchimies futures : compte rendu de l'expérience ESYOP, *C.R.Chimie*, 9, 127-140.

Fürstner, A. (2001), Organic synthesis: the enabling science, *Chem. Eng. News*, 79, 180.

Kurath M. (2010), Negotiating Nano: From Assessing Risks to Disciplinary Transformations, in Maasen S., Kaiser M. (eds), *Assessment Regime of Technology*, Sociology of the Sciences Yearbook, Dordrecht: Springer.

Polshettiwar V., Varma R. (2010), Green chemistry by nano-catalysis, *Green Chem.*, 12, 743-754.