

Nanoparticules d'or pour susciter des rencontres entre science et société

Résumé En raison de sa couleur et de ses propriétés de métal noble, l'or a depuis toujours été un élément de fascination et de convoitise. Des démonstrations avec des nanoparticules d'or se prêtent bien aux actions de formation et de dissémination des sciences. Des expériences faciles et ludiques peuvent montrer au grand public comment les propriétés changent à l'échelle nanométrique avec la taille et la forme et expliquer les applications des nanoparticules d'or dans plusieurs domaines. Différentes actions ont été menées par des scientifiques de la Société Chimique de France, de la Société Française de Physique, des C'Nano ou du GDR Or-Nano pour proposer des ateliers destinés à présenter les nanoparticules d'or et introduire les nanosciences au sein des lycées ou des universités, dans des expositions ou des musées. Ce partage de connaissances permet d'informer le grand public, de susciter des curiosités et parfois même des vocations chez les plus jeunes. Pour le chercheur, les actions de dissémination lui permettent à travers la communication et les échanges d'aller au-delà de ses propres recherches, et l'amènent parfois à de nouvelles interrogations.

Mots-clés Nanoparticules d'or, actions de formation, grand public, science et société.

Abstract Gold nanoparticles to favour meetings between science and society

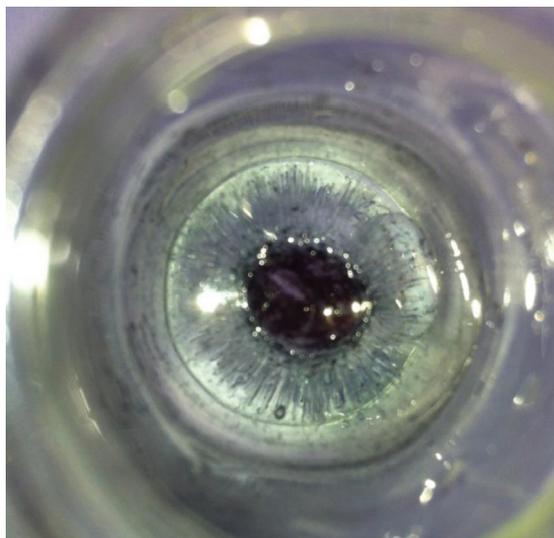
Because of the color and the noble properties of the gold metal, it has been for long an element of fascination and lust. Demonstrations with gold nanoparticles are a tool to promote education and dissemination of science. Easy and funny experiments are able to show to the general public how nanoscale properties change with size and shape and can explain the applications of gold nanoparticles in a number of areas. Various actions have been carried out by scientists from the Société Chimique de France, the Société Française de Physique, C'Nano and the Research Group on Gold Nanoparticles, abbreviated "GdR Or-Nano", to develop workshops to present the nanoparticles of gold and to introduce nanosciences in high schools, universities and museums during exhibitions and workshops. This sharing of knowledge participates to general public information, arouses curiosities and sometimes even creates vocations among young people. Dissemination actions, through communication and exchanges, allow the researcher to go beyond his (her) own research, and sometimes lead to new questions.

Keywords Gold nanoparticles, education, dissemination actions, science and society.

Exploiter de nos jours les propriétés extraordinaires de la matière à l'échelle nanométrique, voire atomique, n'est plus de la science-fiction. Les nanosciences et nanotechnologies sont désormais autour de nous. Les nanoparticules d'or touchent de nombreux secteurs d'activité [1-2]. Peuvent-elles rendre les sciences plus attractives, et de ce fait susciter la curiosité avec l'envie d'aller plus loin dans la compréhension des phénomènes impliqués ? Des initiatives originales illustrant des manipulations simples à l'échelle nanométrique et des ateliers auprès des élèves, des étudiants, des enseignants et du grand public participent à ces objectifs. De plus, le scientifique peut être amené à apporter son expertise avec parfois la satisfaction d'avoir contribué à l'orientation de certaines décisions politiques sur des enjeux sociétaux.

Quand le chercheur « émerveille » son public

L'interaction du scientifique avec le public n'est pas sans rappeler un engouement d'un autre siècle : les « cabinets de curiosités » initiés au XVII^e siècle. Ces cabinets étaient installés par



Regard sur les nanoparticules d'or. © Hynd Remita.

des hommes éclairés qui rassemblaient des collections d'objets scientifiques intrigants, tel Bernard Palissy qui exposait des cristaux, des pétrifications et des fossiles à Paris. Il y invitait de manière informelle des nobles et des érudits pour y commenter ses objets et élaborer des théories. Un autre cabinet de curiosités qui a fait date est celui organisé à Blois par Gaston d'Orléans, frère du roi Louis XIII. Il y invitait les savants et leur proposait de conserver leurs propres minéraux, coquillages, etc. Il a ainsi initié un petit bouillonnement scientifique en marge des universitaires de la Sorbonne. Ces lieux ont joué un rôle clé pour populariser

la science expérimentale, en l'associant à un côté ludique et récréatif [3]. Avec les siècles, cet étonnement parfois candide face aux surprises de la science s'est amoindri et a souvent été masqué par beaucoup de technicité. Le chercheur contemporain n'est certes pas un amuseur public. Dans ses démonstrations, il est un « médiateur malicieux un peu magicien », chargé d'éveiller la curiosité et d'informer le public. Tant pis si tout ne peut pas être expliqué en détail, dans la mesure où l'excès de simplification ne mène pas aux contresens !

Les nanoparticules d'or sont des objets fascinants, notamment par leur coloration inattendue en raison de leur petite taille. Il est souvent arrivé au cours de démonstrations expérimentales de susciter des réactions d'émerveillement au moment où la solution légèrement jaune du chlorure d'or vire au rouge rubis parce que des nanoparticules se forment. Cet émoi survient pareillement qu'il s'agisse d'élèves ou de visiteurs participant à une fête de la science et à des actions de culture scientifique et technique dans des universités ou établissements de l'enseignement supérieur et de recherche. Un changement de couleur survenu en quelques secondes laisse inmanquablement les spectateurs perplexes. Une fois la curiosité éveillée, il est ensuite très aisé de commenter un cliché de microscopie électronique montrant la forme et la taille précise d'une nanoparticule.

Un jour, l'un des auteurs s'est vu proposé le défi suivant : il s'agissait d'expliquer au grand public un thème de recherche où les nanoparticules d'or interviennent en nanoélectronique pour contrôler un courant à l'électron près et donner lieu à un transistor à un électron. Le défi était de taille car il fallait produire une vidéo de deux minutes, diffusée sur les quais du métro parisien, vers des usagers peu intéressés par la physique quantique [4]. Un bilan après coup auprès de quelques-uns de ces spectateurs impromptus, questionnés au sortir du métro, a montré qu'aucun n'était capable évidemment de décrire le phénomène évoqué par la vidéo, mais tous avaient compris que le rôle central était joué par des nanoparticules d'or et désiraient en savoir plus. Cet exemple est certainement un peu extrême, car le contact avec le public est indirect, mais il illustre que l'esprit qui animait les visiteurs des cabinets de curiosité est encore présent.

Quand le chercheur « initie » au nanomonde

Le scientifique peut expliquer le nanomonde et ses applications aux élèves, étudiants, enseignants et au grand public et en illustrer quelques principes fondamentaux. Tout le monde imagine l'or avec sa belle couleur jaune. Pourtant, ce même matériau réduit à l'état de sphères de quelques dizaines de nanomètres de diamètre prend une couleur rouge profond. Des manipulations et des démonstrations avec des nanoparticules d'or se prêtent bien à ces objectifs. En effet, elles peuvent être facilement synthétisées en ajoutant du citrate de sodium (voire même un jus de citron filtré) à une solution de sels d'or en ébullition (synthèse connue sous le nom de synthèse de Türkovich [5]). On peut également montrer que les propriétés des particules métalliques d'or à l'échelle nanométrique diffèrent de celles du métal massif, notamment en raison de ses propriétés optiques liées à la résonance de plasmon localisé qui expliquent la couleur rouge de la solution [6] (voir encadré).

Quelques initiatives d'enseignement

Le projet national Nano-École

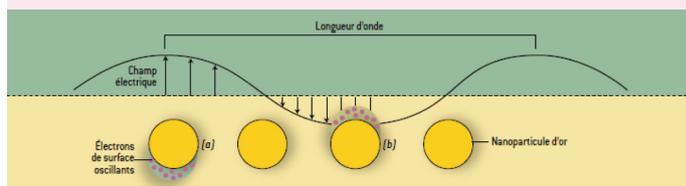
Le projet Nano-École, qui vise à expérimenter l'introduction des nanotechnologies à l'école, est un exemple remarquable présent sur quatre pôles [7]. L'idée principale consiste à associer enseignement scientifique et réflexion socio-scientifique. En Ile-de-France par exemple, la synthèse et l'étude de quelques propriétés des nanoparticules d'or ont été développées en collaboration avec le centre de compétences en nanosciences C'Nano IdF [8], le Labex NanoSaclay et des chercheurs des laboratoires de l'Université Paris-Sud [9], dont

La résonance plasmon localisée [2]

Tous les électrons libres d'une nanoparticule métallique éclairée par de la lumière visible (onde électromagnétique) subissent à chaque instant pratiquement le même champ électrique, puisque la particule mesure une centaine de nanomètres au plus. Ces électrons de conduction se mettent donc à osciller en phase avec le champ électrique de l'onde lumineuse (voir figure), c'est-à-dire à son rythme, qui est de l'ordre de 10^{15} hertz. Ils ne sont limités dans leurs mouvements que par les bords de la nanoparticule.

Comme tout système oscillant, cet ensemble d'électrons a une fréquence de résonance : la fréquence dite de résonance plasmon. Quand la fréquence lumineuse lui est égale, l'entrée en résonance du système constitué par les électrons oscillants de surface se traduit par une forte absorption de l'onde lumineuse incidente.

La fréquence de résonance dépend de la nature métallique de la nanoparticule, de sa forme et de sa taille. Dans le cas de nanoparticules d'or sphériques en suspension dans l'eau, la résonance d'absorption se produit pour des longueurs d'onde voisines de 520 nanomètres, soit du vert (ce qui correspond à $0,6 \times 10^{15}$ Hz), La couleur observée étant complémentaire de la couleur absorbée, les nanoparticules apparaissent rouges.



Une onde lumineuse est formée d'un champ magnétique et d'un champ électrique qui se propagent dans l'espace en oscillant. Comme tout champ électrique, celui d'une onde lumineuse repousse les charges électriques négatives quand il est positif (a), par exemple celles des électrons, ou les attire quand il est négatif (b). À la surface de nanoparticules métalliques éclairées par une onde lumineuse, les électrons oscillent au même rythme que le champ électrique associé à la lumière.

certain du Groupement de recherche GDR Or-Nano [10]. L'originalité de ce projet repose en partie sur des mallettes pédagogiques (développées par Nano-École) qui proposent la synthèse de nanoparticules d'or sphériques et quelques expériences ludiques avec des guides d'activité. Elles présentent des solutions de nanobâtonnets d'or de différentes couleurs et des tests de grosseur à base de nanoparticules d'or. Ces mallettes sont désormais commercialisées par la Société Jeulin.

Les TIPE et quelques autres exemples d'actions pédagogiques

L'objectif des travaux d'initiative personnelle encadrés (TIPE) est de permettre à l'étudiant de développer une ouverture d'esprit, un esprit critique, de l'initiative personnelle, et des capacités d'exigence, d'approfondissement et de rigueur. Il lui faut développer une aptitude à l'imagination expérimentale ainsi qu'une aptitude à collecter l'information, l'analyser, la communiquer... Cette activité a pour but de valoriser la curiosité intellectuelle et le travail en profondeur. Les étudiants peuvent alors aborder la réalité scientifique autrement que par un enseignement classique, puisqu'ils se trouvent directement confrontés à un problème de recherche à résoudre.

Le thème sur les nanoparticules d'or a permis d'atteindre ces objectifs et aussi de rassembler plusieurs acteurs, c'est-à-dire enseignants-chercheurs, étudiants et enseignants de classes préparatoires aux grandes écoles (équivalentes à la 2^e année de licence); ce fut le cas des TIPE sur le thème « Variabilité, limite et stabilité » à travers l'exemple de la synthèse de Türkovich dans diverses conditions expérimentales [11]. La synthèse et les propriétés des nanoparticules d'or ont également fait l'objet respectivement d'activités expérimentales proposées à des enseignants du secondaire de l'Académie de Versailles dans le cadre d'un plan académie formation (PAF) et de la réalisation d'un MOOC [8].

Les JIREC

Les Journées de l'innovation et de la recherche pour l'enseignement de la chimie (JIREC) – portées par la division Enseignement-Formation de la Société Chimique de France –, désormais inscrites au plan national de formation (PNF) et au plan académique formation (PAF), ont notamment pour objectif de favoriser les transitions lycée/université et privilégient les interactions entre les inspecteurs, les formateurs, les enseignants de lycée et de l'enseignement supérieur. À cet effet, une pratique expérimentale destinée aux Terminales S a été proposée, intitulée « Nanoparticules d'or et détection des polluants dans les eaux » [12]. Pour illustrer cette démarche, des activités expérimentales centrées sur « La couleur nanostructurée » ont été co-réalisées aux JIREC 2014 entre un professeur de physique-chimie de l'Académie de Versailles et une enseignante-chercheuse de l'Université de Toulouse. Cette activité a permis d'échanger autour de plusieurs notions (cristallographie, oxydo-réduction, ondes électromagnétiques, spectroscopies), et en particulier sur les nanoparticules d'or [13].

Les nanoparticules, objets fascinants pour le grand public

Dans le cadre de « Un chercheur, une manip » au Palais de la découverte (Paris) et des ateliers pour la Fête de la science ou la Nuit des chercheurs, des activités expérimentales ont été réalisées par des chercheurs du GDR Or-Nano, des C'Nano et de laboratoires de recherche. Des manipulations simples et ludiques permettent d'obtenir des solutions de nanoparticules d'or sphériques de différentes tailles de façon répétable et contrôlée, donnant des couleurs allant du rose pâle pour les solutions de plus petites nanoparticules au rouge grenat pour les solutions de plus grandes nanoparticules. Des solutions de nanobâtonnets d'or de différents rapports d'aspect correspondant à différentes couleurs (rouge, violet, bleu, vert, marron) sont montrées au public. Ces ateliers permettent de se familiariser avec les nanosciences et la nanotechnologie. Expliquer simplement les propriétés catalytiques des nanoparticules d'or dans le domaine de la dépollution environnementale tel que la conversion du monoxyde de carbone (CO, qui est un gaz toxique) en dioxyde de carbone (CO₂), ou encore leur utilisation comme filtres catalytiques dans les capteurs de gaz [14] captive le public. D'autres applications utilisant des nanoparticules d'or dans les capteurs (tests de grossesse), en nanomédecine (thérapie cancéreuse : radiothérapie ou thérapie thermique) ou dans le domaine de l'imagerie médicale (agents de contraste) font l'objet d'échanges très riches entre les scientifiques et le public [2].

Diverses actions sur ce thème ont aussi été animées sur des stands dans des supermarchés (actions C'Nano IdF).



Suspensions dans l'eau de nanobâtonnets d'or dont la couleur dépend du rapport d'aspect (longueur sur diamètre). © S. Lagache.

Le « modèle du déficit » : l'inquiétude s'installe

Le chercheur a un rôle social et il est parfois appelé à prendre position dans les orientations politiques de la société.

Les actions Art et Sciences ont un fort impact de vulgarisation scientifique. Par exemple, des chercheurs du réseau C'Nano IdF et du GDR Or-Nano ont collaboré avec une artiste « désigneuse de verre », Thomasine Giesecke [15]. Le projet était soutenu par la Diagonale Paris-Saclay (Université Paris-Saclay) et le Labex LASIPS. Le but était de développer une sculpture en verre coloré par des nanoparticules d'or pour des effets visuels inédits. La curiosité est sollicitée ici par le biais de l'art. Les concepts scientifiques peuvent alors être mieux compris et par la suite mémorisés. Les prémisses de l'œuvre et les premières étapes de sa réalisation ont été présentés à l'exposition annuelle Curiositas (exposition organisée par la Diagonale Paris-Saclay).

Il apparaît donc clairement que le chercheur est un être passionné qui s'efforce de comprendre les lois de la nature et du monde qui nous entoure, et souvent prêt à les transmettre au grand public curieux. À force d'interroger les phénomènes, il propose des hypothèses sur les mécanismes et la causalité des choses. De ce fait, la société et le monde politique viennent parfois lui poser des questions pour éclairer leurs décisions, principalement sur des enjeux sociétaux tels que la réalité des changements climatiques, les risques liés aux nouveaux matériaux, les dangers liés à l'exploitation de l'énergie nucléaire ou aux organismes génétiquement modifiés (OGM), etc. Le scientifique doit donc exploiter à fond le potentiel prévisionnel de la science afin de répondre aux besoins et enjeux sociaux et sociétaux tout en étant bien conscient des limites prévisionnelles.

Face à ces questions, le scientifique tend par conséquent à calculer des facteurs de risques, à proposer diverses recommandations et préconisations. Cependant, cette approche rationnelle ne répond pas systématiquement aux craintes d'une population, comme ce fut le cas à l'occasion du débat public sur le développement et la régulation des nanotechnologies en 2009-2010. Ce débat avait été commandé par sept ministères français : Écologie et Développement durable, Économie et Industrie, Travail, Agriculture, Recherche, Défense et Santé [16].

L'organisateur du débat reconnaît que cette initiative fut décevante : la mobilisation du public a été très limitée dans les dix-sept villes où les débats eurent lieu. De plus, beaucoup de participants ont remis en cause le bien-fondé même d'un

débat public, reprochant à l'État de soumettre une question sur la pertinence des « nanos » alors que ce même État avait déjà donné une réponse en soutenant la recherche et les nanotechnologies. On attendait du débat que les avis éclairés des experts scientifiques viendraient apaiser les doutes et les craintes du public. En fait, les échanges ont suscité surtout beaucoup d'inquiétudes et de contestations. Cet exemple de situation, connue des sociologues sous le vocable du « modèle du déficit » [17], est révélateur du fossé qui existe entre les scientifiques et la société civile. Peut-il seulement être comblé ?

Quel peut en être le ressenti pour le chercheur ? Assurément, il court le risque d'être déçu s'il ne parvient pas à partager ses conclusions scientifiques avec la société. Il doit surtout accepter que la technologie n'ait pas le dernier mot sur les décisions politiques d'une société. C'est aussi une incitation à l'humilité et à la modestie, tout en conservant sa passion et sa détermination pour faire entendre sa voix dans les débats publics.

Les maquettes pédagogiques ont été réalisées avec l'équipe de Nano-École IdF de l'Université Paris-Sud avec le soutien du Labex NanoSaclay et de C'Nano IdF, en collaboration avec des chercheurs et scientifiques. Certaines actions ont pu être menées grâce à la division Enseignement-Formation de la Société Chimique de France (DEF-SCF).

Les auteurs remercient la Diagonale Paris-Saclay et le Labex LASIPS pour leur soutien aux projets Art et Science, en particulier le projet « L'or se sculpte en Nanos ». Certaines expériences sont directement issues des travaux de recherche, comme par exemple l'apport des filtres catalytiques dans le domaine des capteurs de gaz menés par l'équipe « Nanochimie, organisation et capteurs » du Laboratoire de Chimie de Coordination de Toulouse.

- [1] Shaming D., Remita H., Nanotechnology: from the ancient time to nowadays, *Found. Chem.*, **2015**, 17, p. 187.
 [2] Schaming D., Pluchery O., Remita H., La ruée vers les nanoparticules d'or, *Pour la Science*, **2014**, 444, p. 32.
 [3] Raichvarg D., *Sciences pour tous*, Gallimard, **2005**.
 [4] L'électronique goutte à goutte, vidéo réalisée par le CNRS, **2011**, www.cnrs.fr/fr/multimedia/expo/or2011/videos_pages/or_electronique.htm
 [5] Türkevich J., Colloidal gold, Parts I et II, *Gold Bull.*, **1985**, 18, p. 125.

- [6] Pluchery O., Remita H., Schaming D., Demonstrative experiments about gold nanoparticles and nanofilms: an introduction to nanoscience, *Gold Bull.*, **2013**, 46, p. 319.
 [7] www.nano-ecole.fr
 [8] <http://cnanoidf.org>
 [9] Session 2 du MOOC nano à partir du 7 mars 2018 : <https://www.fun-mooc.fr/courses/course-v1:UPSUD+42003+session02/about>
 [10] www.insp.upmc.fr/webornano
 [11] Fajerweg K., Lalande J., Zhu S., Les nanoparticules d'or, un sujet pour les travaux d'initiative personnelle encadrés (TIPE), *L'Act. Chim.*, **2009**, 335, p. 39.
 [12] Vigneron M., Zoom sur la pratique expérimentale autour des nanoparticules, *L'Act. Chim.*, **2013**, 375, p. XI.
 [13] Paulhac C., Fajerweg K., JIREC 2014: La couleur, Les ateliers expérimentaux, *L'Act. Chim.*, **2015**, 396, p. 19.
 [14] Jońca J., Harmel J., Joanny L., Ryzhikov A., Kahn M.L., Fau P., Chaudret B., Fajerweg K., Au/MOx (M= Zn, Ti) nanocomposites as highly efficient catalytic filters for chemical gas sensing at room temperature and in humid atmosphere, *Sens. Actuator B-Chem.*, **2017**, 249, p. 357.
 [15] www.thomasinegiesecke.com
 [16] Compte rendu du débat public du 9 avril 2010 : http://cpdp.debatpublic.fr/cdpd-nano/informer/bilan_debat.html
 [17] Dickson D., The case for a "deficit model" of science communication, **2005**, www.scidev.net/global/communication/editorials/the-case-for-a-deficit-model-of-science-communic.html

Katia FAJERWERG¹,

maître de conférences de physique-chimie à l'Université Toulouse III-Paul Sabatier, Laboratoire de Chimie de Coordination.

Hynd REMITA²,

directrice de recherche du CNRS au Laboratoire de Chimie Physique, Université Paris-Sud, Université Paris-Saclay, Orsay.

Olivier PLUCHERY³,

professeur de physique à l'Université Pierre et Marie Curie-Sorbonne Universités.

¹ katia.fajerweg@lcc-toulouse.fr

² hynd.remita@u-psud.fr

³ olivier.pluchery@insp.jussieu.fr

45
Sc
 21

**Culture
sciencesChimie**



ENS



MINISTÈRE
DE L'ÉDUCATION
NATIONALE, DE
L'ENSEIGNEMENT
SUPÉRIEUR ET DE
LA RECHERCHE

Mis à disposition
**CAPES et
AGRÉGATION**
 aux épreuves orales

Site de ressources en Chimie pour les enseignants

Thèmes en lien avec les

PROGRAMMES
D'ENSEIGNEMENT

Contenu validé par des

CHERCHEURS

Articles, Vidéos, Diaporamas

AGENDA, ACTUALITÉS

événements, conférences, parutions
scientifiques...

http://culturesciences.chimie.ens.fr

