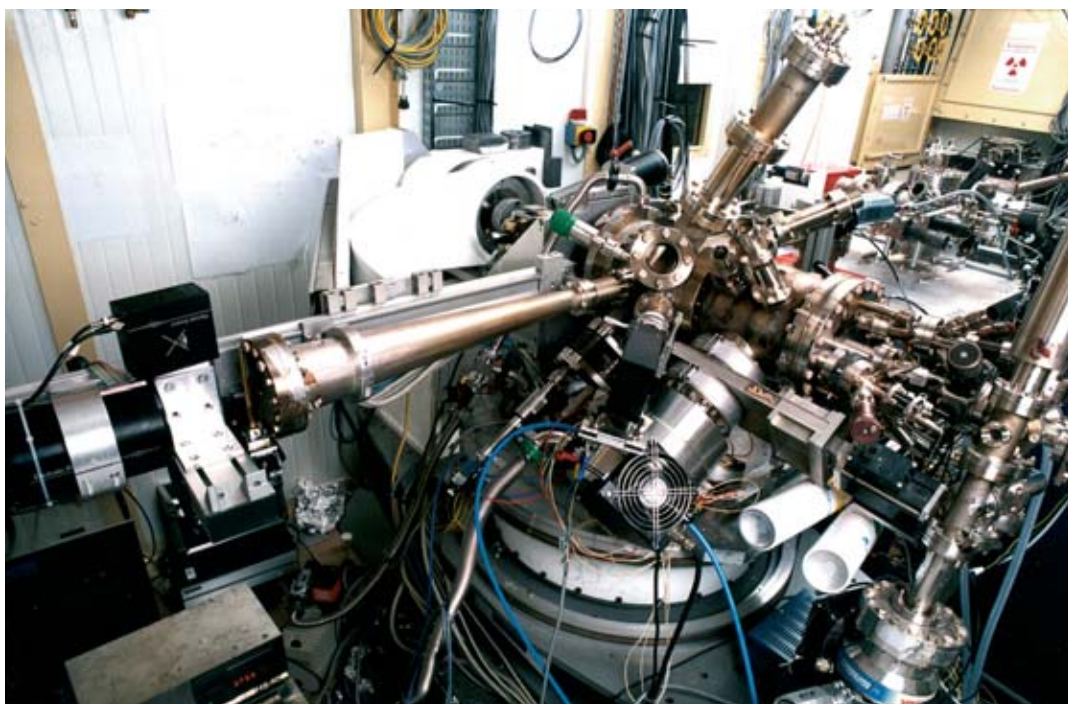


Observer la croissance des nanostructures

Outil complémentaire des mesures de microscopie, la méthode de diffusion du rayonnement synchrotron X aux petits angles en incidence rasante permet de suivre l'évolution de la taille, de la forme, des distributions de tailles et de l'arrangement spatial de nano-objets en train de croître, que ce soit sur ou sous une surface. Capable notamment d'analyser avec une grande sensibilité la morphologie et l'organisation de nanostructures enterrées sous une surface et de réaliser des mesures presque en temps réel dans divers environnements, cette technique ouvre de larges perspectives pour l'étude des nano-objets.

Dispositif expérimental permettant d'observer la croissance de nanostructures par la méthode GISAXS, installé à Grenoble à l'ESRF (European Synchrotron Radiation Facility).



Il est bien connu qu'un signal transportant de l'information dépendante du temps peut être décrit soit en fonction du temps, soit en fonction de la fréquence. Ces deux descriptions sont reliées par une transformation mathématique nommée *transformée de Fourier*. De façon analogue, la matière peut être observée soit directement, par exemple par microscopie électronique ou en champ proche, ou bien, ce qui est équivalent, dans l'espace dit *réciproque*. Les deux représentations sont encore reliées par une transformation de Fourier. Cette transformation est directement réalisée lors de la diffusion de la lumière par la matière. C'est pourquoi la diffusion des **rayons X** permet de remonter à la structure de la matière à l'échelle **atomique**. Il faut toutefois noter que l'information obtenue sur la structure par diffusion des rayons X est par nature incomplète, car seul le module de la transformée de Fourier est mesuré, et non sa phase. En utilisant une longueur d'onde des rayons X proche de l'**angström**, le physicien accède par diffusion de cette lumière près du faisceau direct

(ce qui est appelé "aux petits angles") à des dimensions structurales de l'ordre du **nanomètre**. Si, en outre, il envoie le faisceau en incidence rasante, il acquiert une sensibilité surfacique. C'est ainsi que la diffusion des rayons X aux petits angles en incidence rasante (GISAXS en anglais pour *Grazing Incidence Small Angle X-Ray Scattering*) se développe depuis une dizaine d'années pour caractériser la forme, la taille et l'organisation de **nanostructures** enterrées sous, ou déposées sur une surface.

Analyser la morphologie en temps réel

Les chercheurs de la Direction des sciences de la matière (CEA/DSM) ont été les premiers à appliquer la technique de diffusion du **rayonnement synchrotron X** aux petits angles en incidence rasante (GISAXS) *in situ*, en ultravide, au cours de la croissance de nanostructures par **épitaxie par jets moléculaires**⁽¹⁾ (encadré C, *L'épitaxie par jets moléculaires*, p. 26). Cette méthode

a ainsi permis d'analyser la morphologie de ces nanostructures en temps réel, durant leur croissance, et donc d'envisager d'agir sur les conditions de croissance (typiquement, température du substrat et flux des sources d'évaporation) afin de les optimiser. Son principe, schématisé sur la figure 1, est très simple : un faisceau monochromatique de rayons X parallèle et de faible dimension est envoyé en incidence rasante sur une surface, et est diffusé par les inhomogénéités présentes dessus ou dessous la surface. L'intensité diffusée aux petits angles est recueillie sur un détecteur à deux dimensions. Un puits permet de cacher le faisceau incident avant le détecteur. Pour des objets très distants les uns des autres, l'image mesurée est directement la moyenne de la transformée de Fourier de la forme des objets, appelée *facteur de forme*. Si les objets sont proches, celle-ci est multipliée par une *fonction dite d'interférence*, prenant en compte leur arrangement spatial. La figure 2 montre un exemple typique d'image GISAXS obtenue lors d'une croissance de **nanoparticules** de métal sur une surface d'oxyde, pour laquelle les objets sont proches mais non ordonnés. Les dimensions dans l'espace de Fourier, c'est-à-dire sur l'image, sont inversement proportionnelles aux dimensions dans l'espace réel. Ainsi, l'extension de l'intensité parallèlement à la surface est inversement proportionnelle à la taille latérale moyenne des nano-objets, alors que l'extension perpendiculairement à la surface est inversement proportionnelle à leur hauteur. Plus précisément, l'observation d'oscillations de l'intensité dans la direction perpendiculaire signe l'existence de deux faces planes à la base et en haut des objets, séparées par une distance (c'est-à-dire la hauteur des objets) inversement proportionnelle à la période de ces oscillations. Il faut également noter la présence, de part et d'autre du puits, de deux maxima d'intensité parallèlement à la surface. Ceux-ci proviennent d'une *interférence constructive*⁽²⁾ entre les ondes diffusées par des nanoparticules voisines. Ils traduisent le fait que les objets ne sont pas répartis complètement aléatoirement mais sont séparés d'une distance moyenne, qui est l'inverse de la séparation entre les deux maxima dans l'espace de Fourier. Enfin, la présence d'une tige de diffusion à 57° de la normale à la surface révèle l'existence d'une facette (qui lui est perpendiculaire) dans l'espace réel. De ces observations, il est par conséquent possible de remonter à la forme moyenne des objets, ici une pyramide tronquée, ainsi qu'à leurs dimensions et à leur séparation moyenne. La réalité est un peu plus complexe car une analyse quantitative est nécessaire. Elle prend en compte les effets de **réfraction** de l'onde incidente et de sa réflexion sur la surface du substrat, ainsi que les distributions sur les tailles des objets et leurs éventuelles corrélations. Cependant, dans le cas d'objets assez semblables, leur forme peut être déduite d'une simple analyse qualitative, de même que leurs dimensions et séparations, à mieux que 30 % près.

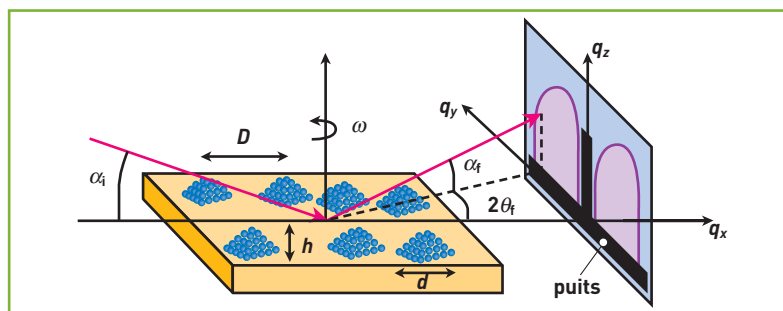


Figure 1. Représentation schématique du principe d'une mesure GISAXS. L'échantillon sur lequel sont en train de croître des **agrégats** nanométriques est illuminé sous incidence rasante par un faisceau synchrotron de rayons X. Le faisceau diffusé est collecté dans les directions $2\theta_f$ dans le plan et α_f hors du plan, correspondant respectivement aux axes q_y et q_z de l'espace réciproque (c'est-à-dire de l'image sur le détecteur), la coordonnée q_x étant le long du faisceau incident. L'orientation du faisceau incident parallèlement à la surface de l'échantillon est définie par une rotation ω autour de la normale à sa surface. Un puits en forme de T (en noir) permet d'arrêter le faisceau direct beaucoup plus intense. Les angles, de l'ordre du degré, ont été considérablement exagérés. D , h et d représentent respectivement la distance inter-îlots, la hauteur des agrégats et leur diamètre.

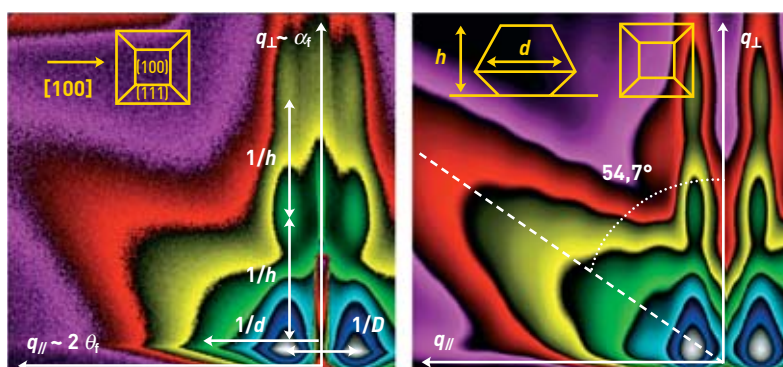


Figure 2. À gauche, image GISAXS obtenue lors de la croissance d'agrégats de palladium (Pd) sur une surface d'oxyde de magnésium MgO(100) à une température de 650 K. L'épaisseur moyenne du film est de 1,5 nm, soit environ 8 couches atomiques. L'échelle de couleur est logarithmique et chaque niveau correspond à peu près à un ordre de grandeur d'intensité. Le niveau de bruit est de l'ordre de 1 coup par seconde (cps) et par **pixel**, et le signal utile est fixé par la limite du détecteur à $6 \cdot 10^4$ cps/pixel. Des tiges de diffusion par les facettes (111) apparaissent lorsque le faisceau est envoyé dans l'azimut [110] de MgO. À droite, simulation de l'intensité diffusée, en **modélisant** les nanoparticules par un cubo-octaèdre tronqué, tenant compte d'une distribution de tailles. Les paramètres morphologiques sont : $d = 12,6$ nm, $h = 7,9$ nm, $D = 21$ nm, largeur à mi-hauteur des distributions de tailles $\sigma_d = 6$ nm, $\sigma_h = 0,8$ nm.

La force de l'approche développée au CEA est d'appliquer cette méthode *in situ* au cours de la croissance, comme l'illustre la figure 3. Au début de la croissance du palladium sur la surface d'oxyde de magnésium (001)⁽³⁾, la diffusion est très étalée et le maximum d'intensité parallèlement à la surface (pic d'interférence) est éloigné de l'origine. Cela correspond à la **nucléation** de petits îlots proches les uns des autres. Lorsque la quantité déposée augmente, le signal se concentre vers l'origine, montrant que les îlots grossissent. Néanmoins, le pic d'interférence ne bouge pas : c'est la phase de **croissance**. Elle est suivie d'une continuation de la concentration de l'intensité vers l'origine, mais avec un rapprochement concomitant du pic d'interférence, traduisant un grossissement et un éloignement des objets : c'est la phase de **coalescence**. Avec le dispositif expérimental mis au point au CEA, les temps de comptage sont faibles, de l'ordre de la seconde, permettant d'envisager des mesures en temps réel. De plus, le rapport signal sur bruit est très grand, ce qui autorise des analyses quantitatives poussées. Il est par conséquent possible de déduire les caractéristiques

(1) G. RENAUD, R. LAZZARI, C. REVENANT *et al.*, *Science*, 300 (5624), p. 1416, 2003.

(2) Interférence constructive : il y a *interférence constructive* entre deux ondes sinusoïdales lorsqu'elles sont en phase et une *interférence destructive* lorsque les ondes sont en opposition de phase (déphasage de 180° ou π).

(3) Les surfaces des monocristaux étudiées sont souvent parallèles à un plan d'atomes du cristal. Elles sont alors repérées par les *indices de Miller (hkl)* qui caractérisent ce plan en cristallographie.

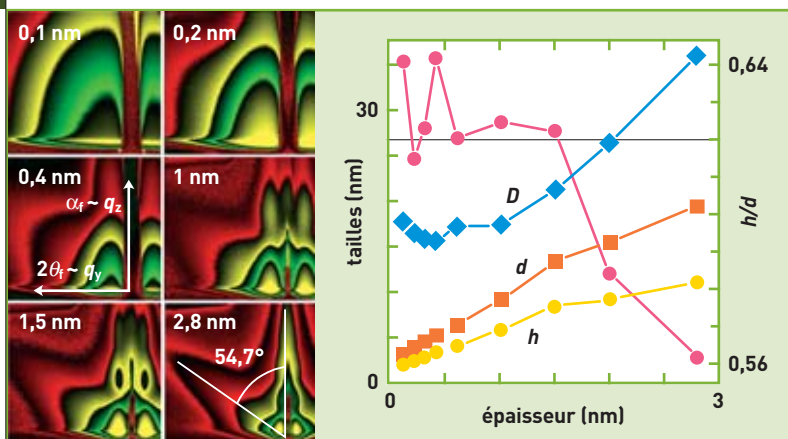
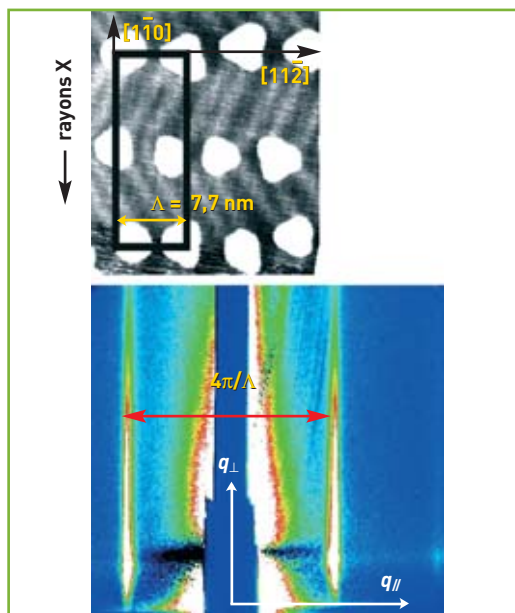


Figure 3. À gauche, série d'images GISAXS obtenues en fonction de l'épaisseur massique lors de la croissance d'agrégats de palladium [Pd] sur une surface d'oxyde de magnésium MgO(001) à une température de 650 K. Un phénomène typique de nucléation, croissance et coalescence d'agrégats est observé. À droite, lois de croissance en fonction de l'épaisseur du film : distance interîlots D (en bleu), diamètre d (en orange), hauteur h (en jaune) et rapport d'aspect h/d (en rose).

Figure 4. Réseau bidimensionnel de plots de cobalt sur la surface reconstruite Au(111) obtenu par croissance auto-organisée. En haut, l'image par microscopie à effet tunnel fait apparaître que les îlots de cobalt croissent sur les nœuds de la reconstruction en chevrons de la surface Au(111). En bas, le super-réseau rectangulaire de plots conduit à des tiges de diffusion aux petits angles. À noter la sensibilité de la mesure à une épaisseur équivalente de 0,2 Å!



morphologiques en temps réel durant la croissance, et donc de décrire les lois de croissance, ainsi que d'accéder à la forme d'équilibre des **agrégats**.

Remonter à l'organisation des nanostructures

L'exemple présenté ci-dessus correspond à une croissance d'objets ayant une grande distribution de tailles et répartis de façon désordonnée. Or, en vue de leurs applications, il est souvent nécessaire d'élaborer des nano-objets aussi identiques que possible, ce qui passe généralement par leur croissance organisée. Le GISAXS est extrêmement sensible d'une part, à la dispersion en taille des objets et, d'autre part, à leur organisation. Ce

(4) Peigne de Dirac : réseau périodique de pics infiniment fins.

(5) Anomale : se dit d'une technique consistant à faire diffracter un cristal à plusieurs longueurs d'onde au voisinage du seuil d'absorption d'un de ses éléments afin d'obtenir une information sur la phase.

(6) G. RENAUD, *Surf. Sci. Rep.*, 32, N°s 1 et 2, pp. 1-90, 1998.

dernier point est illustré sur un système modèle : la croissance auto-organisée de plots de cobalt (Co) sur l'or (Au). En effet, la surface (111) de l'or possède naturellement un réseau ordonné de sites ayant un environnement atomique local perturbé, et constituant de ce fait des lieux privilégiés pour la nucléation puis la croissance de nanoparticules de cobalt. Sur un cliché GISAXS, le physicien observe la transformée de Fourier du réseau bidimensionnel de plots de cobalt, c'est-à-dire un réseau de tiges, ou *peigne de Dirac*⁽⁴⁾, à deux dimensions. La figure 4 montre une image obtenue au tout début de la croissance de cobalt sur Au(111). Elle présente des tiges très fines parallèlement à la surface, ce qui traduit la grande qualité de l'ordonnement des plots (la transformée de Fourier d'un **crystal** est faite de pics très étroits appelés *pics de Dirac*), et très allongées perpendiculairement, car elles proviennent de plots de très faible épaisseur (de deux monocouches atomiques).

L'apport des rayons X à l'étude des nano-objets

L'utilisation d'une source de rayons X synchrotron de haute brillance, l'optimisation du montage expérimental au niveau du rapport signal sur bruit et l'emploi d'un détecteur à deux dimensions ont ainsi permis d'aborder l'étude *in situ* sous ultravide de la croissance de nano-objets sur des surfaces par diffusion centrale de rayons X. Grâce à une analyse quantitative précise du signal aux petits angles, la technique GISAXS est un outil complémentaire des mesures de microscopie pour obtenir, rapidement et de façon intégrée, l'évolution de la taille, de la forme, des distributions de tailles et de l'arrangement spatial de nanoparticules en train de croître, et ceci en particulier sur des substrats isolants. Obtenues en quelques heures sur une gamme variée de paramètres (flux, température, environnement gazeux), les lois de croissance, couvrant tous les stades, de la nucléation jusqu'à la coalescence des îlots, permettent d'accéder à une meilleure compréhension physique de la formation des nanoparticules. Grâce entre autres à sa sensibilité à des interfaces enterrées, à tout degré d'ordre latéral, et à sa capacité à réaliser des mesures quasiment en temps réel dans divers environnements, la technique GISAXS ouvre de nouvelles perspectives en terme de croissance cristalline : étude de la croissance en présence d'éléments **tensio-actifs**, franchissement du *gap* de pression dans le cas de réactions **catalytiques** ou de dépôts chimiques en phase vapeur, études des conditions d'auto-organisation... Toute la potentialité des rayons X pour l'étude des nano-objets est obtenue en conjuguant la technique de GISAXS avec les avantages offerts par le rayonnement synchrotron (mesure anormale⁽⁵⁾ en fonction de la longueur d'onde, diffraction magnétique) et par la diffraction aux grands angles⁽⁶⁾ (GIXS, *Grazing Incidence X-Ray Scattering*). Celle-ci permet de sonder la structure atomique interne des nano-objets, en particulier les orientations cristallographiques par rapport au substrat, la manière dont s'accommode la différence de paramètre de **maille** par exemple au travers d'un réseau de **dislocations**, la présence de défauts structuraux...

➤ Gilles Renaud

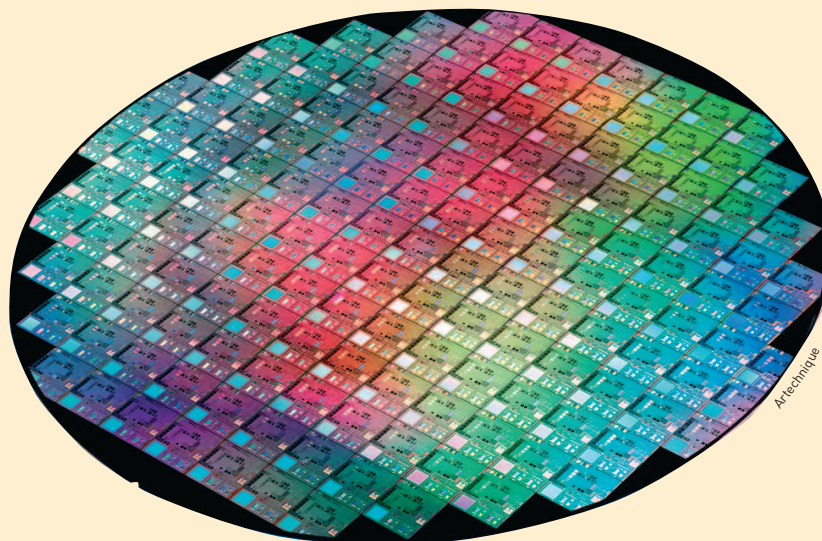
Direction des sciences de la matière
CEA centre de Grenoble

A Du monde macroscopique au nanomonde, ou l'inverse...

Afin de se représenter plus aisément les dimensions des objets micro et nanoscopiques*, il est pratique de procéder à des comparaisons et courant de faire correspondre différentes échelles, par exemple celle du monde du vivant, de la molécule à l'homme, et celle des objets manipulés ou fabriqués par lui (figure). Cette correspondance entre "artificiel" et "naturel" permet, par exemple, de voir que des **nanoparticules** fabriquées artificiellement sont plus petites que des globules rouges.

Un autre mérite de cette juxtaposition est d'illustrer les deux grandes façons

*Du grec *nano* qui signifie "tout petit" et est utilisé comme préfixe pour désigner le milliardième (10^{-9}) d'une unité. En l'occurrence, le **nanomètre** ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$, soit un milliardième de mètre) est l'unité reine du monde des nanosciences et des nanotechnologies.



Tranche de silicium de 300 mm réalisée par l'Alliance Crolles2, illustration de la démarche *top-down* actuelle de la microélectronique.

d'élaborer des objets ou des systèmes nanométriques : la voie descendante (*top-down*) et la voie ascendante (*bottom-up*). Deux chemins mènent en effet au nanomonde : la fabrication moléculaire, qui passe par la manipulation d'**atomes** individuels et la construction à partir de la base, et l'ultraminaturisation, qui produit des systèmes de plus en plus petits.

La voie descendante est celle du monde artificiel, qui part de matériaux macroscopiques, ciselés par la main de l'homme puis par ses instruments : c'est elle qu'a empruntée l'électronique depuis plusieurs dizaines d'années, principalement avec le **silicium** comme substrat, et ses "tranches" (*wafers*) comme entités manipulables. C'est d'ailleurs la microélectronique qui a largement contribué à donner à cette voie le nom anglais sous laquelle elle

est connue. Mais il ne s'agit plus seulement d'adapter la miniaturisation de la filière silicium actuelle, mais aussi de prendre en compte, pour s'en prémunir ou les utiliser, les phénomènes physiques, **quantiques** en particulier, qui apparaissent aux faibles dimensions.

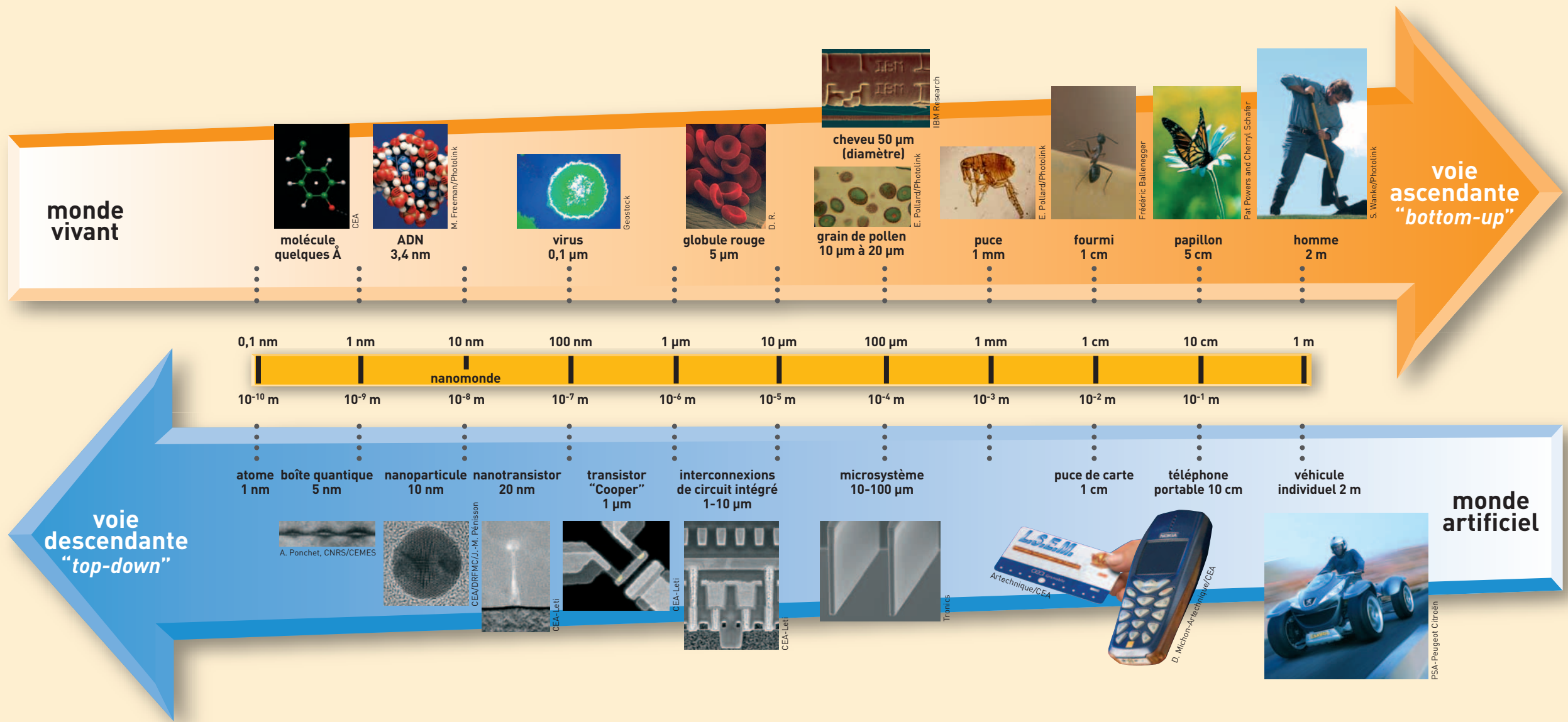
La voie ascendante peut permettre de passer outre ces limites physiques et aussi de réduire les coûts de fabrication, en utilisant notamment l'**auto-assemblage** des composants. C'est elle que suit la vie en pratiquant l'assemblage de molécules pour créer des **protéines**, enchaînement d'acides aminés que des super-molécules, les **acides nucléiques** (ADN, ARN), savent faire produire au sein de cellules pour former des organismes, les faire fonctionner et se reproduire tout en se complexifiant. Cette voie, dite "*bottom-up*", vise à orga-

niser la matière à partir de "briques de base", dont les atomes eux-mêmes sont les plus petits constituants, à l'instar du monde vivant. La nanoélectronique du futur cherche à emprunter cette voie d'assemblage pour aboutir à moindre coût à la fabrication d'éléments fonctionnels.

Les **nanosciences** peuvent ainsi être définies comme l'ensemble des recherches visant à la compréhension des propriétés (physiques, chimiques et biologiques) des nano-objets ainsi qu'à leur fabrication et à leur assemblage par auto-organisation.

Les **nanotechnologies** regroupent l'ensemble des savoir-faire qui permettent de travailler à l'échelle moléculaire pour organiser la matière afin de réaliser ces objets et matériaux, éventuellement jusqu'à l'échelle macroscopique.

A (Suite)



monde vivant

voie ascendante
"bottom-up"

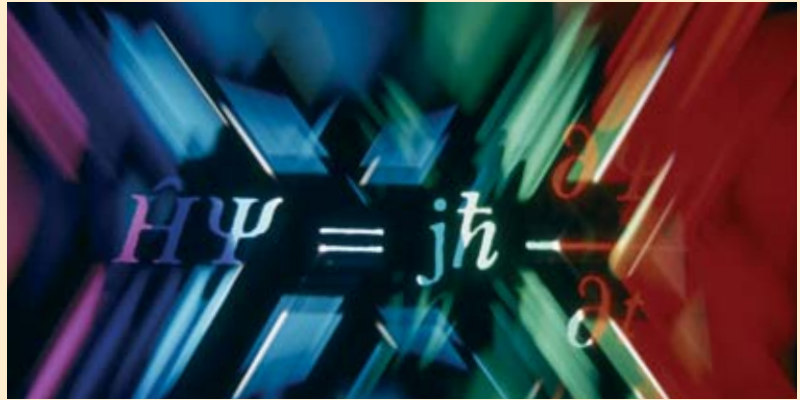
voie descendante
"top-down"

monde artificiel

B Quelques repères de physique quantique

La **physique quantique** (historiquement dénommée mécanique quantique) est l'ensemble des lois physiques qui s'appliquent à l'échelle microscopique. Fondamentalement différentes de la plupart de celles qui semblent s'appliquer à notre propre échelle, elles n'en constituent pas moins le socle global de la physique à toutes ses échelles. Mais à l'échelle macroscopique, ses manifestations ne nous apparaissent pas étranges, à l'exception d'un certain nombre de phénomènes *a priori* curieux, comme la **supraconductivité** ou la superfluidité, qui justement ne s'expliquent que par les lois de la physique quantique. Au demeurant, le passage du domaine de validité des lois paradoxales de cette physique à celui des lois, plus simples à imaginer, de la physique classique peut s'expliquer d'une façon très générale, comme cela sera évoqué plus loin.

La physique quantique tire son nom d'une caractéristique essentielle des objets quantiques : des caractéristiques comme le moment angulaire (**spin**) des particules sont des quantités **discrètes** ou discontinues appelées **quanta**, qui ne peuvent prendre que des valeurs multiples d'un *quantum* élémentaire. Il existe de même un **quantum d'action** (produit d'une énergie par une durée)



D. Sarrault/CEA

“Vue d’artiste” de l’équation de Schrödinger.

appelé **constante de Planck** (h), dont la valeur est de $6,626 \cdot 10^{-34}$ joule-seconde. Alors que la physique classique distingue *ondes* et *corpuscules*, la physique quantique englobe en quelque sorte ces deux concepts dans un troisième, qui dépasse la simple dualité onde-corpuscule entrevue par Louis de Broglie, et qui, quand nous tentons de l’appréhender, semble tantôt proche du premier et tantôt du deuxième. L’objet quantique constitue une entité inséparable de ses conditions d’observation, sans attribut propre. Et cela, qu’il s’agisse d’une particule – en aucun cas assimilable à une bille minuscule qui suivrait une quelconque trajectoire – de lumière

(**photon**) ou de matière (**électron, proton, neutron, atome...**).

Cette caractéristique donne toute sa force au **principe d’incertitude d’Heisenberg**, autre base de la physique quantique. Selon ce principe [d’*indétermination* plutôt que d’*incertitude*], il est impossible de définir avec précision à un instant donné à *la fois* la position d’une particule et sa vitesse. La mesure, qui reste possible, n’aura jamais une précision meilleure que h , la constante de Planck. Ces grandeurs n’ayant pas de réalité intrinsèque en dehors du processus d’observation, cette détermination simultanée de la position et de la vitesse est simplement impossible.

B (Suite)

C'est qu'à tout instant l'objet quantique présente la caractéristique de *superposer* plusieurs états, comme une onde peut être le résultat de l'*addition* de plusieurs autres. Dans le domaine quantique, la hauteur d'une onde (assimilable à celle d'une vague par exemple) a pour équivalent une **amplitude de probabilité** (ou onde de probabilité), nombre complexe associé à chacun des états possibles d'un système qualifié ainsi de quantique. Mathématiquement, un état physique d'un tel système est représenté par un **vecteur d'état**, fonction qui, en vertu du principe de superposition, peut s'ajouter à d'autres. Autrement dit, la somme de deux vecteurs d'état possibles d'un système est *aussi* un vecteur d'état possible du système. De plus, le produit de deux espaces vectoriels est aussi la somme de produits de vecteurs, ce qui traduit l'**intrication** : un vecteur d'état étant généralement étalé dans l'espace, l'idée de localité des objets ne va plus de soi. Dans une paire de particules intriquées, c'est-à-dire créées ensemble ou ayant déjà interagi l'une sur l'autre, décrite par le *produit* et non par la *somme* de deux vecteurs d'état individuels, le destin de chacune est lié à celui de l'autre, quelle que soit la distance qui pourra les séparer. Cette caractéristique, également appelée *l'enchevêtrement quantique d'états*, a

des implications vertigineuses, sans parler des applications imaginables, de la cryptographie quantique à – pourquoi ne pas rêver ? – la téléportation.

Dès lors, la possibilité de prévoir le comportement d'un système quantique n'est qu'une prédictibilité probabiliste et statistique. L'objet quantique est en quelque sorte une "juxtaposition de possibles". Tant que la mesure sur lui n'est pas faite, la grandeur censée quantifier la propriété physique recherchée n'est pas strictement définie. Mais dès que cette mesure est engagée, elle détruit la **superposition quantique**, par *réduction du paquet d'ondes*, comme Werner Heisenberg l'énonçait en 1927.

Toutes les propriétés d'un système quantique peuvent être déduites à partir de l'équation proposée l'année précédente par Erwin Schrödinger. La résolution de cette **équation de Schrödinger** permet de déterminer l'énergie du système ainsi que la **fonction d'onde**, notion qui a donc tendance à être remplacée par celle d'amplitude de probabilité.

Selon un autre grand principe de la physique quantique, le **principe (d'exclusion) de Pauli**, deux particules identiques de spin $\frac{1}{2}$ (c'est-à-dire des **fermions**, en particulier les électrons) ne peuvent avoir à la fois la même position, le même spin et la même vitesse (dans les limites

posées par le principe d'incertitude), c'est-à-dire se trouver dans le même *état quantique*. Les **bosons** (en particulier les photons), ne suivent pas ce principe et peuvent se trouver dans le même état quantique.

La coexistence des **états superposés** donne sa **cohérence** au système quantique. Dès lors, la théorie de la **décohérence quantique** peut expliquer pourquoi les objets macroscopiques ont un comportement "classique" tandis que les objets microscopiques, atomes et autres particules, ont un comportement quantique. Plus sûrement encore qu'un dispositif de mesure pointu, "l'environnement" (l'air, le rayonnement ambiant, etc.) exerce son influence, éliminant radicalement toutes les *superpositions d'état* à cette échelle. Plus le système considéré est gros, plus il est en effet couplé à un grand nombre de degrés de liberté de cet environnement. Et donc moins il a de "chances" – pour rester dans la logique probabiliste – de sauvegarder une quelconque cohérence quantique.

POUR EN SAVOIR PLUS

Étienne KLEIN, *Petit voyage dans le monde des quanta*, Champs, Flammarion, 2004.

C L'épitaxie par jets moléculaires

La fabrication des **puits quantiques** utilise la technique d'**épitaxie** (du grec *taxi* (ordre) et *epi* (dessus) par jets moléculaires (en anglais MBE, pour *Molecular Beam Epitaxy*). Le principe de cette technique de dépôt physique, développée initialement pour la croissance **crystalline** des **semi-conducteurs** de la famille III-V, est fondé sur l'évaporation des différents constituants purs du matériau à élaborer dans une enceinte où est maintenu un vide poussé (pression pouvant être de l'ordre de $5 \cdot 10^{-11}$ mbar) afin d'éviter toute pollution de la surface. Un ou des jets thermiques d'**atomes** ou de **molécules** réagissent sur la surface propre d'un substrat monocristallin, placé sur un support maintenu à haute température (quelques centaines de °C), qui sert de trame pour former un film dit épitaxique. Il est ainsi possible de fabriquer des empilements de couches aussi fines que le millièème de millimètre, c'est-à-dire composées de seulement quelques plans d'atomes.

Les éléments sont évaporés ou sublimés à partir d'une source de haute pureté, placée dans une **cellule à effusion** (chambre dans laquelle un flux moléculaire passe d'une région où règne une pression donnée à une région de plus basse pression) chauffée par **effet Joule**.

La croissance du film peut être suivie *in situ* et en temps réel en utilisant diverses sondes structurales et analytiques, en particulier des techniques d'étude de la qualité des surfaces et de leurs transitions de phase par diffraction électronique en incidence rasante, LEED (pour *Low energy electron diffraction*) ou RHEED (pour *Reflection high-energy electron diffraction*) et diverses méthodes **spectroscopiques** (spectroscopie d'**électrons** Auger, SIMS (spectrométrie de masse d'**ions** secondaires), spectrométrie de photoélectrons XPS par **rayons X** et UPS (*Ultraviolet photoelectron spectroscopy*).

La technique d'épitaxie par jets moléculaires s'est étendue à d'autres semi-

conducteurs que les III-V, à des métaux et à des isolants, se développant avec les progrès des techniques d'*ultravide*. Le vide régnant dans la chambre de croissance, dont la conception varie en fonction de la nature du matériau à déposer, doit en effet être meilleure que 10^{-11} mbar pour permettre la croissance d'un film de haute pureté et d'excellente qualité cristalline à des températures de substrat relativement basses. Il s'agit de qualité de vide lorsque le bâti est au repos. Pour la croissance d'arséniures, par exemple, le vide résiduel est de l'ordre de 10^{-8} mbar dès que la cellule d'arsenic est portée à sa température de consigne pour la croissance. Le pompage pour atteindre ces performances fait appel à plusieurs techniques (pompage ionique, cryopompage, sublimation de titane, pompes à diffusion ou turbomoléculaires). Les principales impuretés (H_2 , H_2O , CO et CO_2) peuvent présenter des pressions partielles inférieures à 10^{-13} mbar.