

# Des nanoparticules d'or pour optimiser nos ordinateurs, utopie ou réalité ?



**Olivier Pluchery**

*enseignant-chercheur  
INSP*

*Diminuer la consommation d'énergie de nos ordinateurs implique la conception de condensateurs si petits que l'on touche au domaine de l'électronique à une seule charge, basée sur les phénomènes de Coulomb. Des effets qui pourraient être optimisés par des nanoparticules d'or.*

## **Miniaturiser au maximum les systèmes d'information**

Afin de minimiser la consommation des ordinateurs et limiter leur échauffement, les scientifiques songent à la miniaturisation ultime : notamment en codant les bits d'information avec une seule charge élémentaire, c'est-à-dire un seul électron. Cela nécessite de concevoir un condensateur si petit qu'il ne puisse stocker qu'une ou deux charges. Utopie ? Des concepts ont donné naissance à l'électronique à une seule charge et ont été étudiés dès la fin des années 1980 (1). Il était question de prédire théoriquement quelle serait la caractéristique courant-tension<sup>1</sup> d'un *condensateur ultra compact*.

Les échelles impliquées dans ces phénomènes sont si petites que les grandeurs physiques deviennent discrètes, c'est-à-dire non continues, on découvre alors des comportements inédits, relevant des nanosciences. Dans le cas de ces condensateurs ultra compacts, le courant électrique évolue par paliers et cela donne lieu à ce que l'on appelle *les escaliers de Coulomb*. Chaque palier correspond à un nombre fini et très faible d'électrons. Si l'on parvient à contrôler ce nombre d'électrons, on peut l'utiliser pour coder de l'information sous forme binaire comme cela est fait dans les ordinateurs, mais avec des tailles nanométriques.

---

<sup>1</sup>**Caractéristique courant-tension** : le fonctionnement de tout composant électrique simple (comme un dipôle électrique) peut être complètement décrit par la mesure du courant électrique en fonction de la tension qu'on applique à ses bornes. Dans le cas du dipôle électrique le plus simple, une résistance, cette caractéristique courant-tension est simplement une droite passant par l'origine.

## La théorie *orthodoxe* des escaliers de Coulomb

Il faut détailler ces effets qui mêlent comportement quantique des électrons, forces électrostatiques de répulsion et agitation thermique au sein des matériaux. Imaginons une sphère métallique conductrice de très petite taille appelée *l'île*, que l'on place entre deux conducteurs plans A et B à une distance si petite que les électrons peuvent passer du conducteur A ou B vers l'île par *effet tunnel*<sup>2</sup>. Si l'on impose une différence de potentiel  $V_{AB} > 0$  entre les deux plaques A et B, les électrons vont avoir tendance à passer de B vers A via l'île (voir figure 1). Mais ce passage est régi par la physique quantique et a donc un caractère probabiliste. La probabilité de transfert d'un électron de B vers l'île est bien inférieure à 1, donc cet événement arrive de manière saccadée.

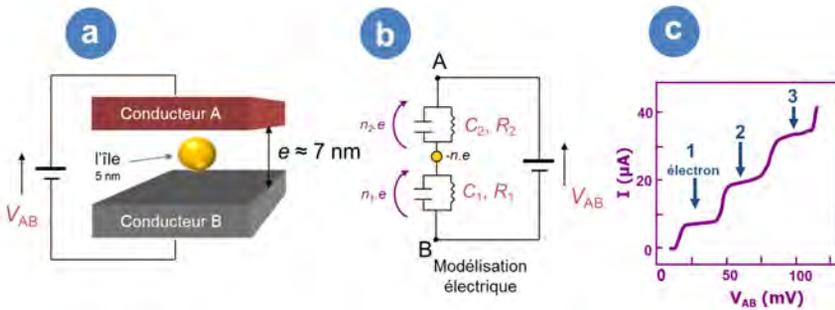


Figure 1.

Modèle pour réaliser un dispositif qui illustre le phénomène électrique des **escaliers de Coulomb** (a) : une nanoparticule métallique appelée *l'île*, est placée entre deux conducteurs de manière à ce que les électrons du conducteur B puissent passer vers l'île par effet tunnel. Le circuit électrique équivalent (b) est composé de deux condensateurs ultra compacts associés en série via deux résistances tunnel  $R_1$  et  $R_2$ . Dans le cas où  $R_1 \ll R_2$ , et si l'on applique une tension  $V_{AB} > 0$ , un électron passe facilement par effet tunnel du conducteur B à l'île et il y reste bloqué.

L'ajout d'un second électron exige que la polarisation  $V_{AB}$  soit augmentée d'une quantité  $\Delta V = e/C_2$ . De cette manière on parvient à imposer le nombre d'électrons présent dans la sphère métallique. En (c), la caractéristique prédite illustre clairement la présence d'un électron, puis deux puis trois dans l'île à mesure que la tension  $V_{AB}$  est augmentée.

Paramètres de cette simulation :  $C_1 \ll C_2$  et  $R_1 \ll R_2$ . Les marches ont un écart donné par  $\Delta V = e/C_2 = 32\text{mV}$  et une hauteur  $e\Delta I = e/R_2 / (C_1 + C_2) = 10,7\ \mu\text{A}$ . Les paramètres de la simulation sont :  $R_1 = 25\ \Omega$  ;  $R_2 = 2500\ \Omega$  ;  $C_1 = 0,001\ \text{fF}$  ( $1 \times 10^{-18}$  farad),  $C_2 = 0,005\ \text{fF}$  et  $T = 10\text{K}$ .

<sup>2</sup>**Effet tunnel** : l'effet tunnel est décrit par la physique quantique qui s'intéresse aux phénomènes nanométrique et il désigne la propriété que possède un électron de traverser une barrière de potentiel, c'est-à-dire de passer d'un conducteur A à un conducteur B même quand son énergie est inférieure à la hauteur de la barrière. En physique classique, c'est-à-dire aux échelles macroscopiques, un tel effet tunnel est impossible.

A cela il faut ajouter deux autres effets : celui de la répulsion coulombienne entre deux électrons et celui de la température. L'île peut être vue comme un condensateur ultra compact de capacité  $C$ . Pour ajouter une charge élémentaire, notée  $e$ , à ce condensateur, il faut fournir une énergie qui s'écrit  $E_e = e^2/2C$ . Cette énergie est à comparer à l'énergie thermique  $kT$  qui mesure l'agitation à laquelle est soumise toute particule. Du fait de cette agitation thermique l'électron a tendance à sauter hors de l'île ou à y revenir de manière aléatoire. Si  $kT > E_e$  alors l'agitation domine et les transferts aléatoires d'électrons depuis et vers l'île sont incessants si bien que le nombre d'électrons qui y sont stockés fluctue continuellement. Le courant électrique résultant obéit alors à une loi d'ohm très usuelle. Par contre si  $kT < E_e$  alors un électron piégé dans l'île ne s'en échappe pas spontanément. Et en augmentant progressivement  $V_{AB}$  on peut garder prisonnier un électron, puis deux, puis trois, etc. Le comportement n'est plus ohmique mais la caractéristique courant-tension prend une forme d'escaliers où chaque marche correspond à un électron supplémentaire comme cela apparaît dans la figure 1-c. Un tel comportement électrique peut être assez bien décrit par la théorie appelée *théorie orthodoxe*. Ces prédictions théoriques sont très excitantes car elles donnent accès à des comportements quantiques via des mesures électriques très "conventionnelles", avec un voltmètre et un ampèremètre.

Quelle est la taille de l'île pour que ces phénomènes apparaissent ? Un modèle simple basé sur le calcul de la capacité d'une sphère montre que cette dernière doit avoir un diamètre de l'ordre de 5 nm pour que les escaliers de Coulomb soient observables à température ambiante.

## Du modèle à l'expérience

Comme beaucoup de modèles, celui-ci présente la beauté de sa simplicité : une sphère métallique entre deux conducteurs permet de filtrer goutte à goutte les électrons... Mais de la théorie à la réalisation expérimentale, le pas n'est pas aisé à franchir car il faut atteindre des miniaturisations ultimes. Les prouesses de la lithographie ont permis de mesurer expérimentalement ces phénomènes de Coulomb. Par exemple en 2008, des chercheurs ont réussi à mettre au point une architecture très ingénieuse pour observer des escaliers de Coulomb (2). Sur un substrat de silicium, les chercheurs ont dégagé par attaque chimique un petit pilier rectangulaire au sein duquel est intercalée une couche isolante. Cela constitue deux électrodes (la source et le drain) isolées électriquement (voir figure 2) comme l'étaient les plaques A et B du modèle théorique décrit dans la figure 1. Ensuite ils ont déposé quelques nanoparticules d'or de 10 nm de diamètre qui viennent se fixer spécifiquement sur cette tranche isolante car ces dernières ont une affinité chimique particulière pour cette zone du

dispositif. Et en appliquant une tension entre la source et le drain, ils ont observé une caractéristique courant-tension comme celle prédite précédemment. Ils ont même réussi une prouesse supplémentaire en connectant les nanoparticules d'or à une troisième électrode, que l'on appelle la grille. En polarisant la grille, ils ont observés un décalage global des escaliers de Coulomb et c'est un prototype de transistor à un seul électron !

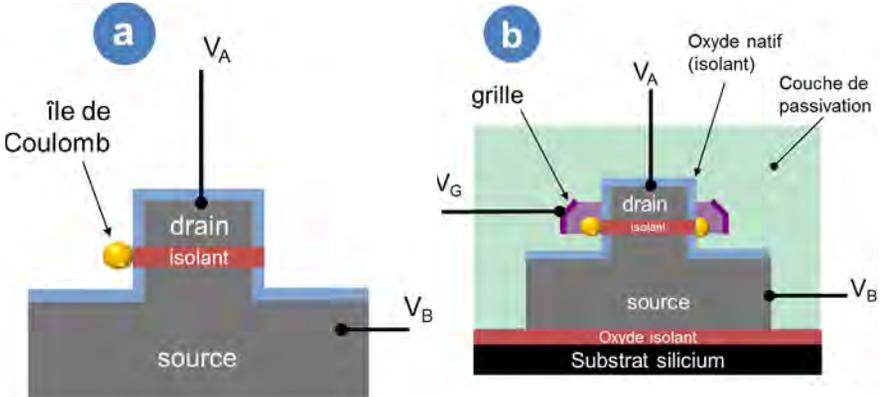


Figure 2.

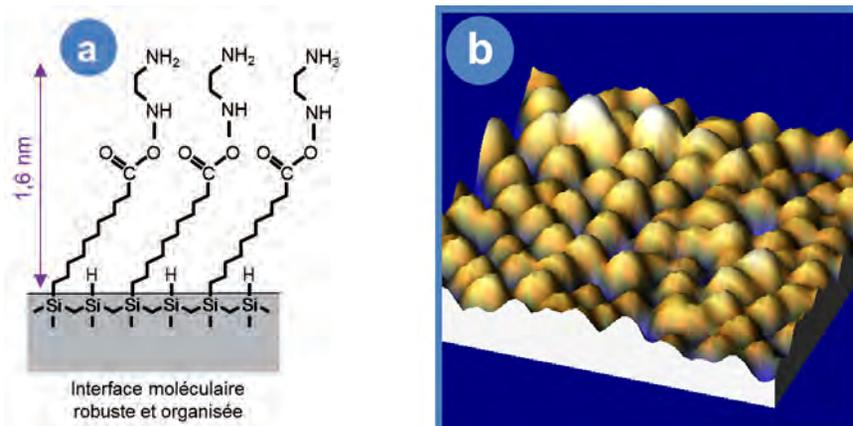
- (a) Réalisation d'un dispositif présentant une caractéristique I-V en escaliers de Coulomb. Quand on impose une tension  $V_{AB}$  positive les électrons tentent de passer de la source au drain via l'île de Coulomb constituée d'une nanoparticule d'or de 10 nm de diamètre.
- (b) Développement du dispositif précédent pour réaliser un transistor à un seul électron en ajoutant une électrode supplémentaire appelée la grille.

### Auto-organisation, la chimie à la rescousse

Cependant de telles architectures sont très délicates à fabriquer. Elles fournissent une démonstration probante des effets de Coulomb mais il paraît difficile d'envisager une production à grande échelle avec suffisamment de fiabilité.

Une autre voie se profile néanmoins, qui s'appuie sur l'auto-organisation et une très bonne maîtrise de la chimie de surface du silicium. Un dispositif tel que celui décrit dans la figure 1, se modélise par quatre composants : deux résistances tunnel et deux capacités ultra compactes. L'apparition des effets de Coulomb recherchés est conditionnée par le contrôle de la valeur de ces quatre composants. Les résistances tunnel dépendent de la distance entre la nanoparticule et le substrat, et la valeur des capacités dépend de la taille de la nanoparticule. Il faut donc imaginer des processus chimiques qui permettent de fabriquer des couches isolantes sur le silicium reproductibles à la fraction de nanomètre près. L'oxyde de silicium utilisé dans la technologie des transistors actuelle produit des couches isolantes trop instables. D'où l'idée de s'appuyer sur des réactions chimiques très finement contrôlées pour déposer une couche moléculaire

isolante sur le silicium(3). De l'hydrogène a d'abord été greffé sur une surface de silicium Si(111) par des procédés de chimie aqueuse, puis substitué par une molécule constituée d'une longue chaîne carbonée dans des conditions très bien contrôlées (suppression totale de toute trace de vapeur d'eau).



Le succès d'un tel greffage s'appuie sur une très bonne connaissance de la chimie de la surface du silicium : un atome d'hydrogène sur deux a été spontanément substitué par la molécule organique constituée d'une chaîne de onze atomes de carbone via une réaction d'hydrosilylation. Cette interface a été ensuite modifiée chimiquement par estérification pour la rendre capable de fixer des nanoparticules d'or, toujours sans altérer la qualité de l'interface. La figure ci-dessus présente une telle surface, partiellement couverte par des nanoparticules d'or. La chaîne moléculaire assure un écartement homogène de 1,6 nm des nanoparticules d'or vis-à-vis du substrat de silicium. Un tel dépôt d'une couche compacte de nanoparticules d'or ouvre une nouvelle voie pour réaliser des dispositifs pour l'électronique à une seule charge.

**O. P.**

### *Pour en savoir (un peu) plus*

- (1) K Mullen, E Benjacob, RC Jaklevic, Z Schuss : *I-V Characteristics of Coupled Ultrasmall-Capacitance Normal Tunnel-Junctions*. Phys. Rev. B 37 (1988) 98-105.
- (2) V Ray, R Subramanian, P Bhadrachalam, Liang-Chieh Ma, C-U Kim, SJ Koh : *CMOS-compatible fabrication of room temperature single-electron devices*. Nature Nanotechnology 3 (2008) 603-08.
- (3) D Aureau, Y Varin, K Roodenko, O Seitz, O Pluchery, YJ Chabal : *Controlled deposition of gold nanoparticles on well-defined organic monolayer grafted on silicon*. The Journal of Physical Chemistry C 114 (2010) 14180-86.