Découvertes Récentes en physique : fabriquer et mesurer à l'échelle du nanomètre

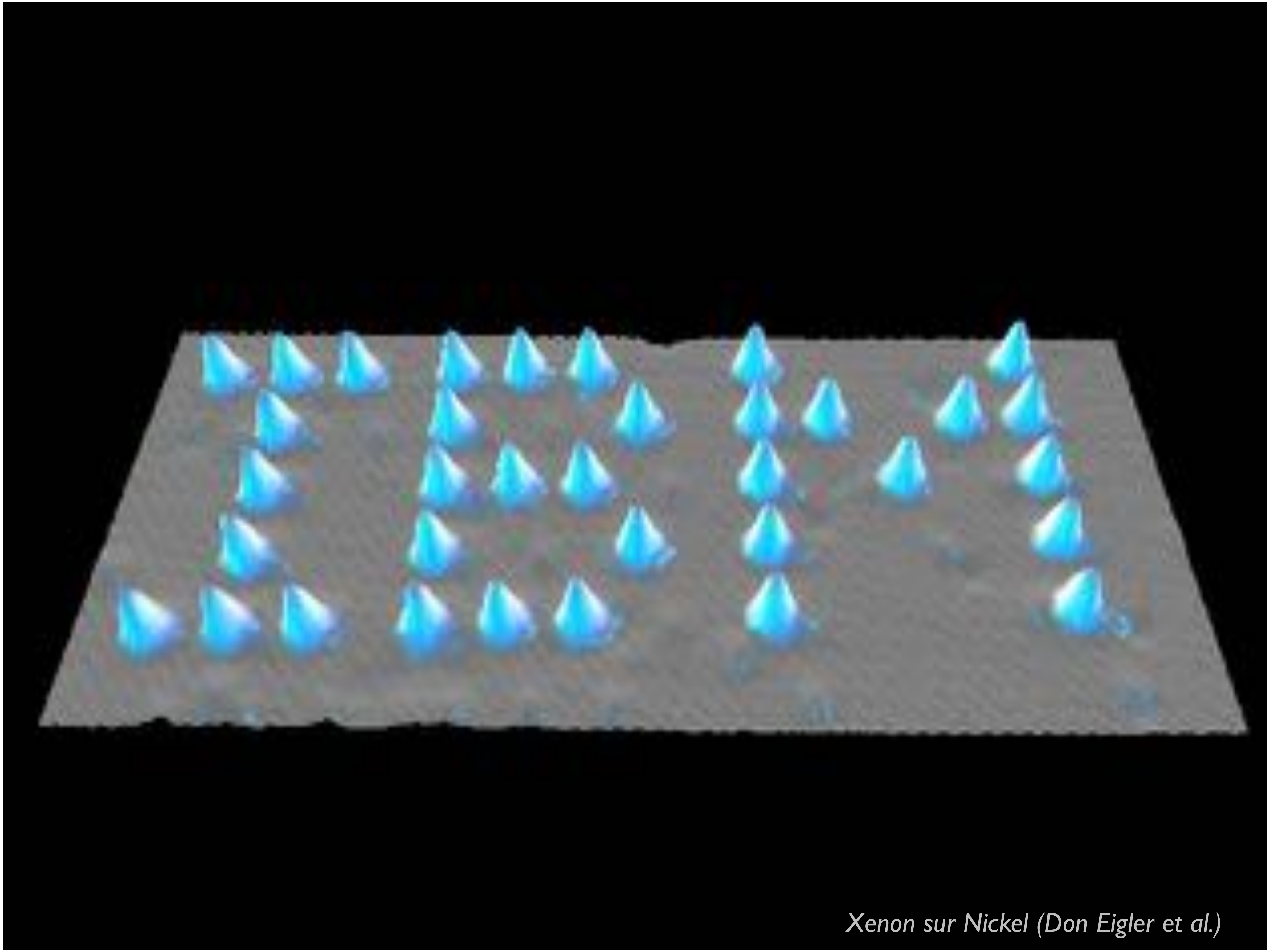
J. Bobroff, Univ. Paris-Sud

Comment fabriquer ?

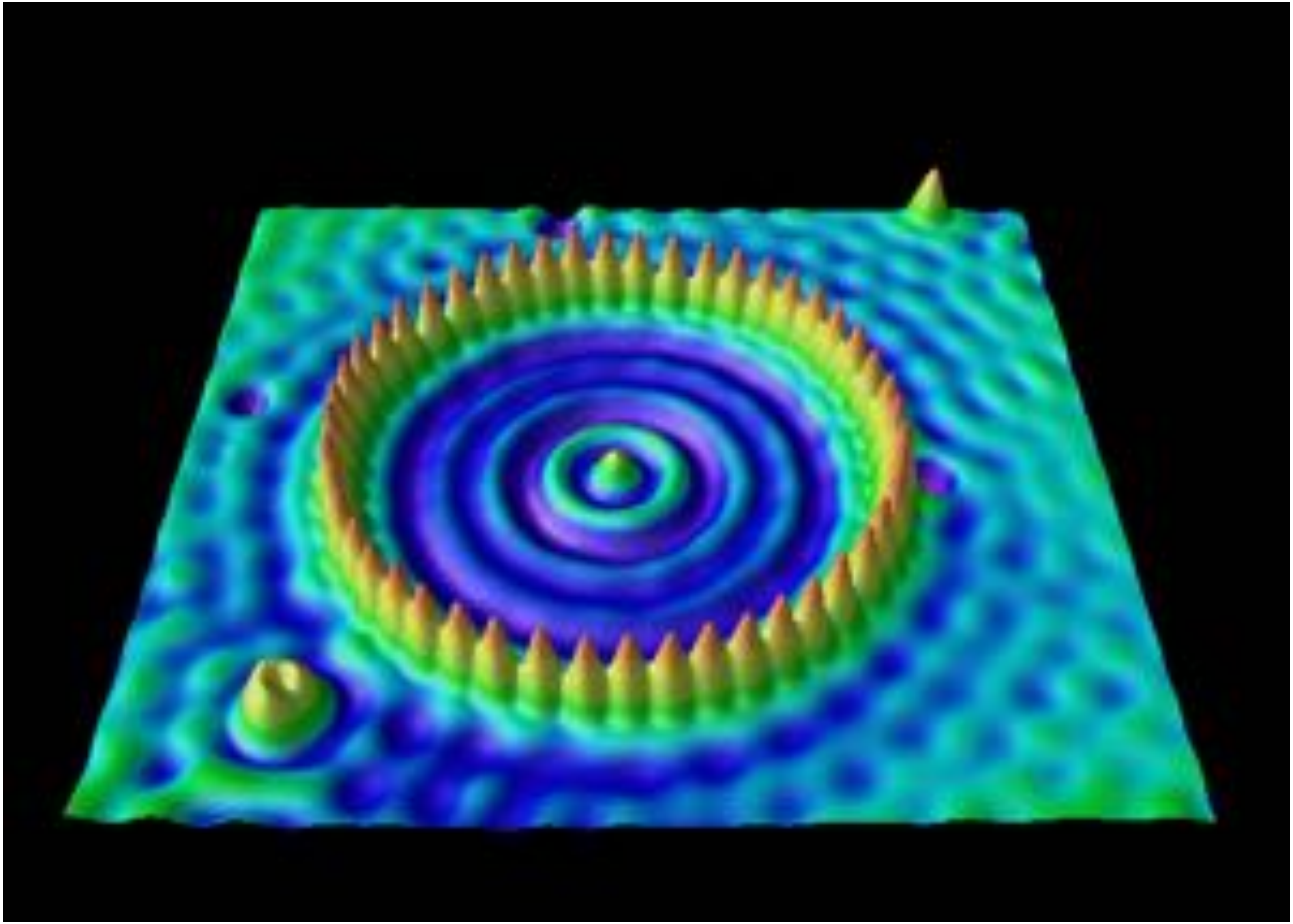
- atome par atome
- en gravant
- en évaporant
- à partir de matière existante

Fabriquer atome par atome

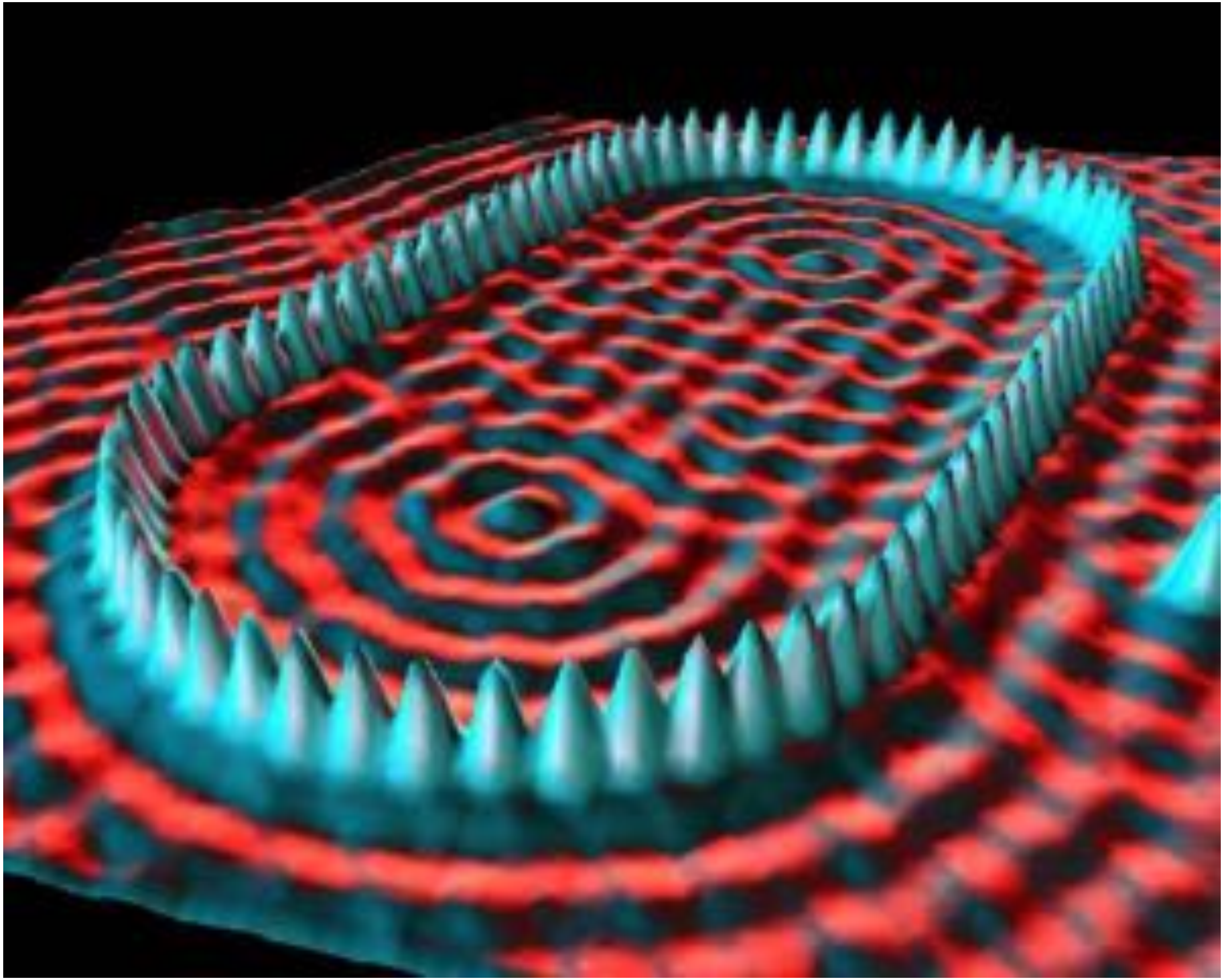
Avec un microscope à effet tunnel, on peut
déplacer des atomes,
donc fabriquer à l’échelle du nanomètre
des motifs et des structures



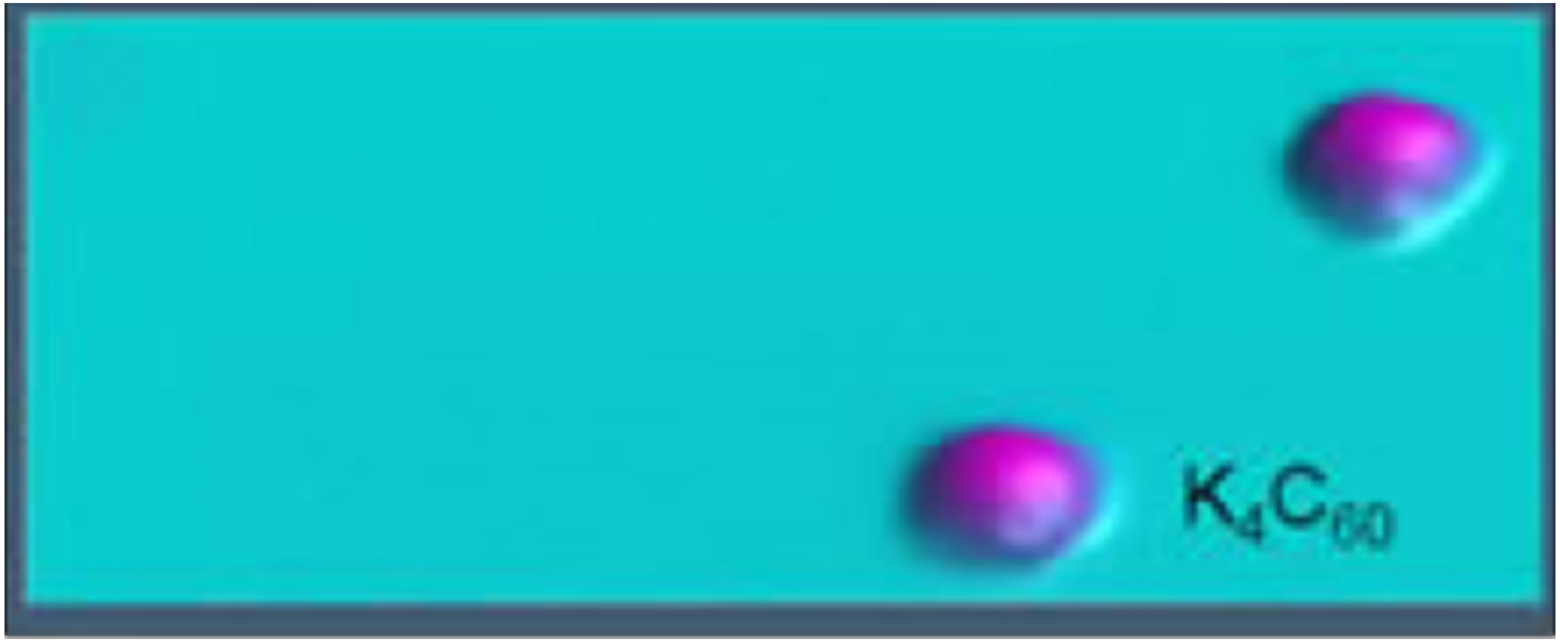
Xenon sur Nickel (Don Eigler et al.)



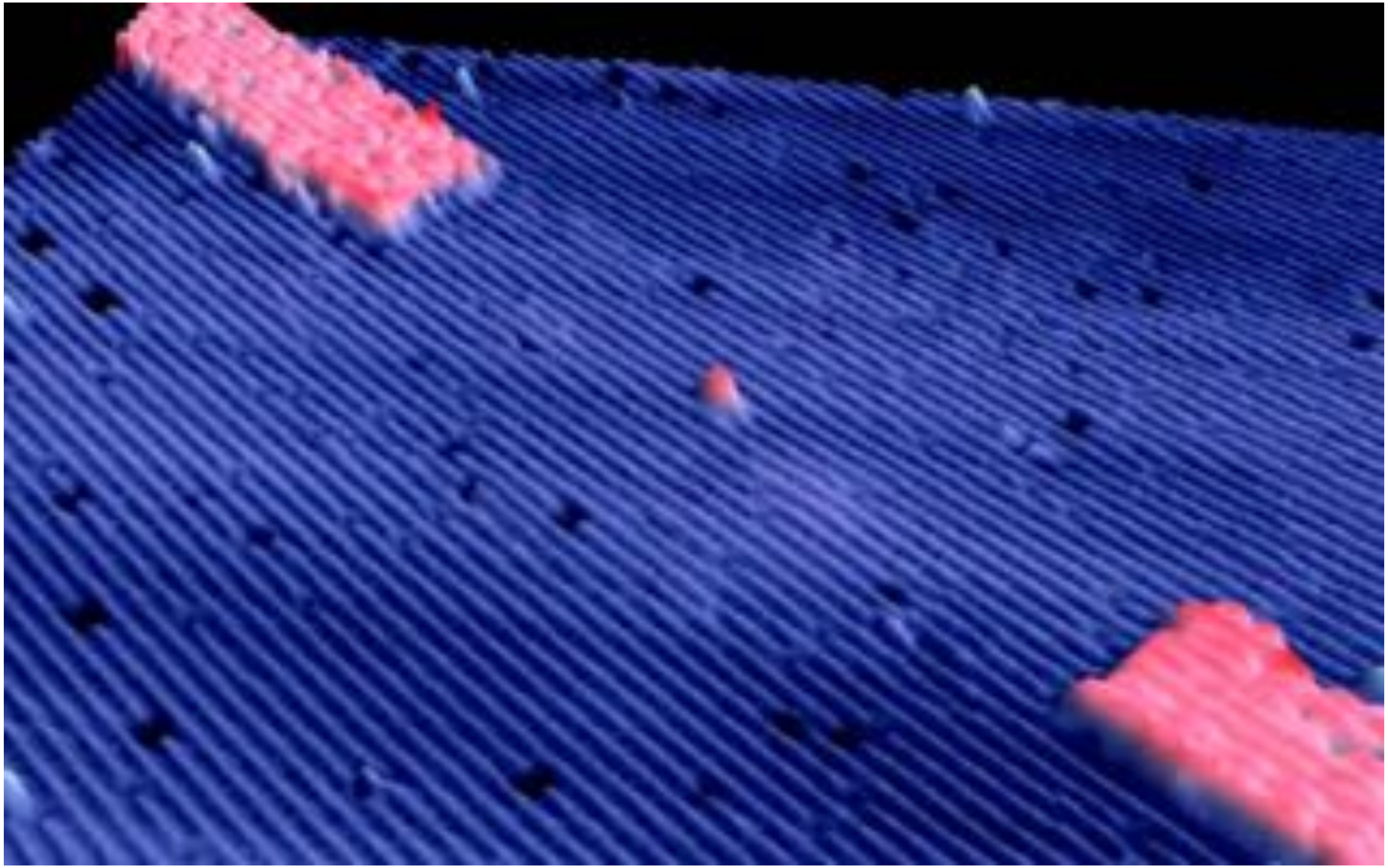
Fer sur cuivre (IBM)



Fer sur cuivre (IBM)



Michael Crommie, Berkeley



transistor à un atome

une recherche récente

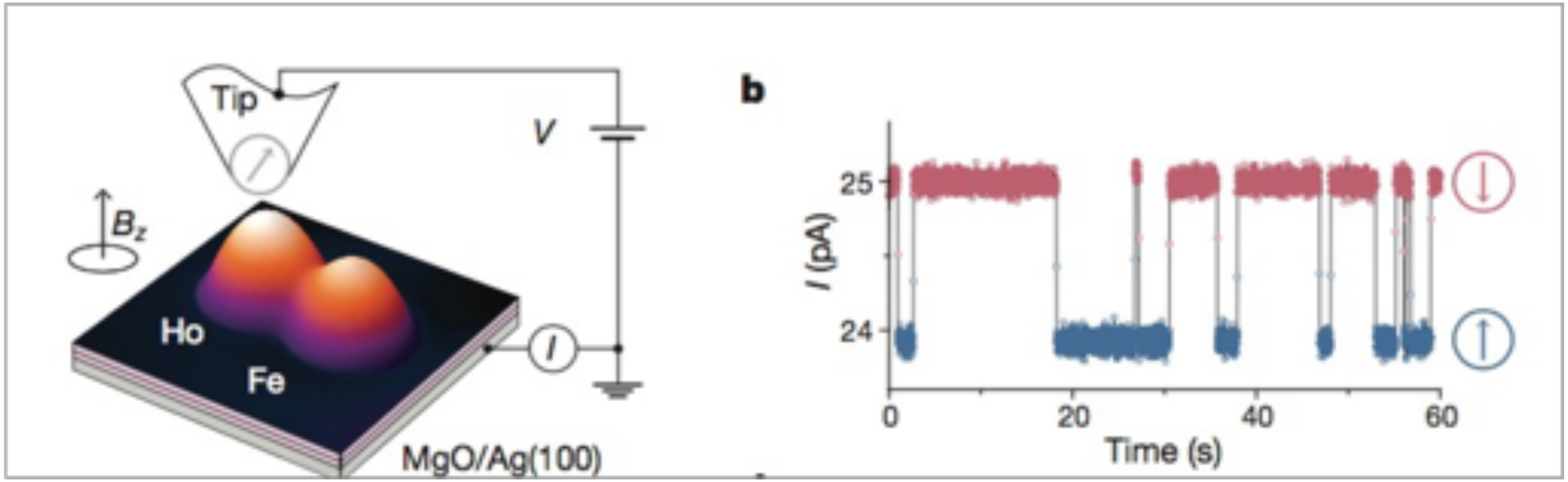
stocker et lire de l’information
sur un seul atome

LETTER

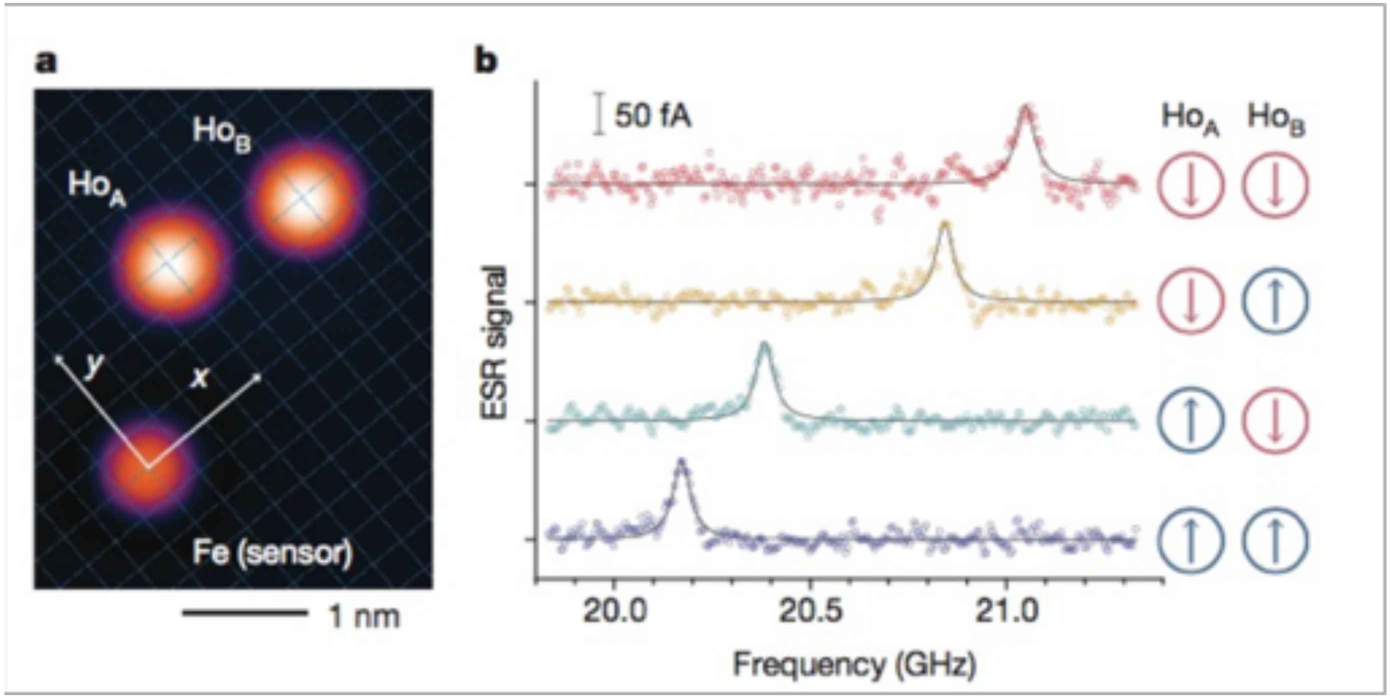
Reading and writing single-atom magnets

ARTICLE

On change l'aimantation de l'atome de Ho via un courant dans la pointe :



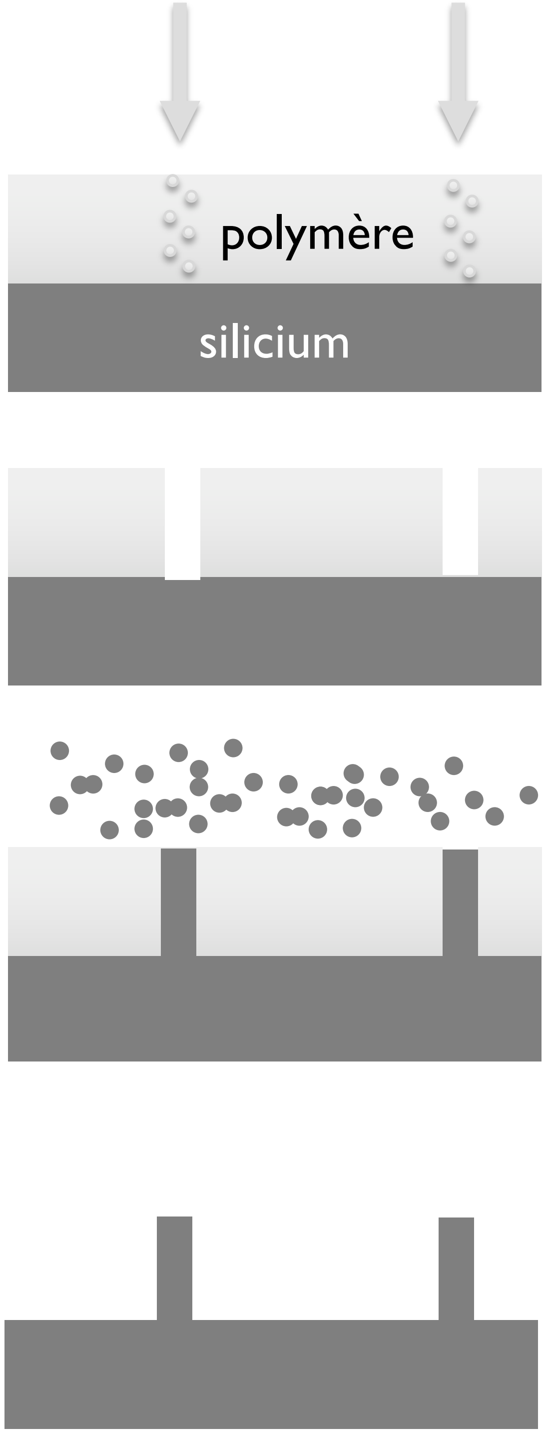
On lit l'aimantation de chaque atome de Ho via un atome de Fer voisin :



Comment fabriquer ?

- atome par atome
- en gravant
- en évaporant
- à partir de matière existante

la lithographie électronique

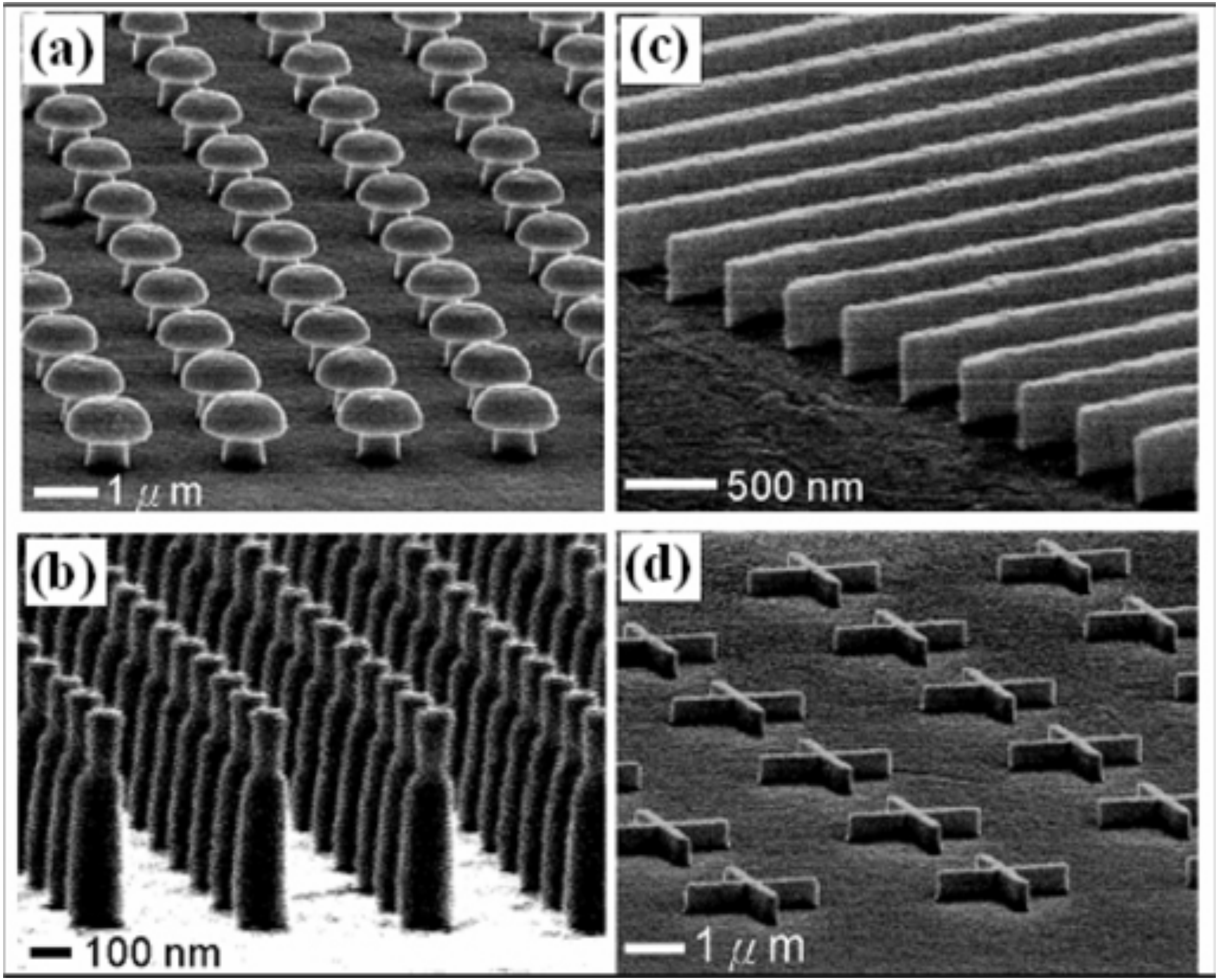


1) on grave avec un faisceau d'électrons une surface fine de polymère (résine). Ca casse les chaînes de polymères.

2) on applique un solvant qui enlève les régions irradiées seulement.

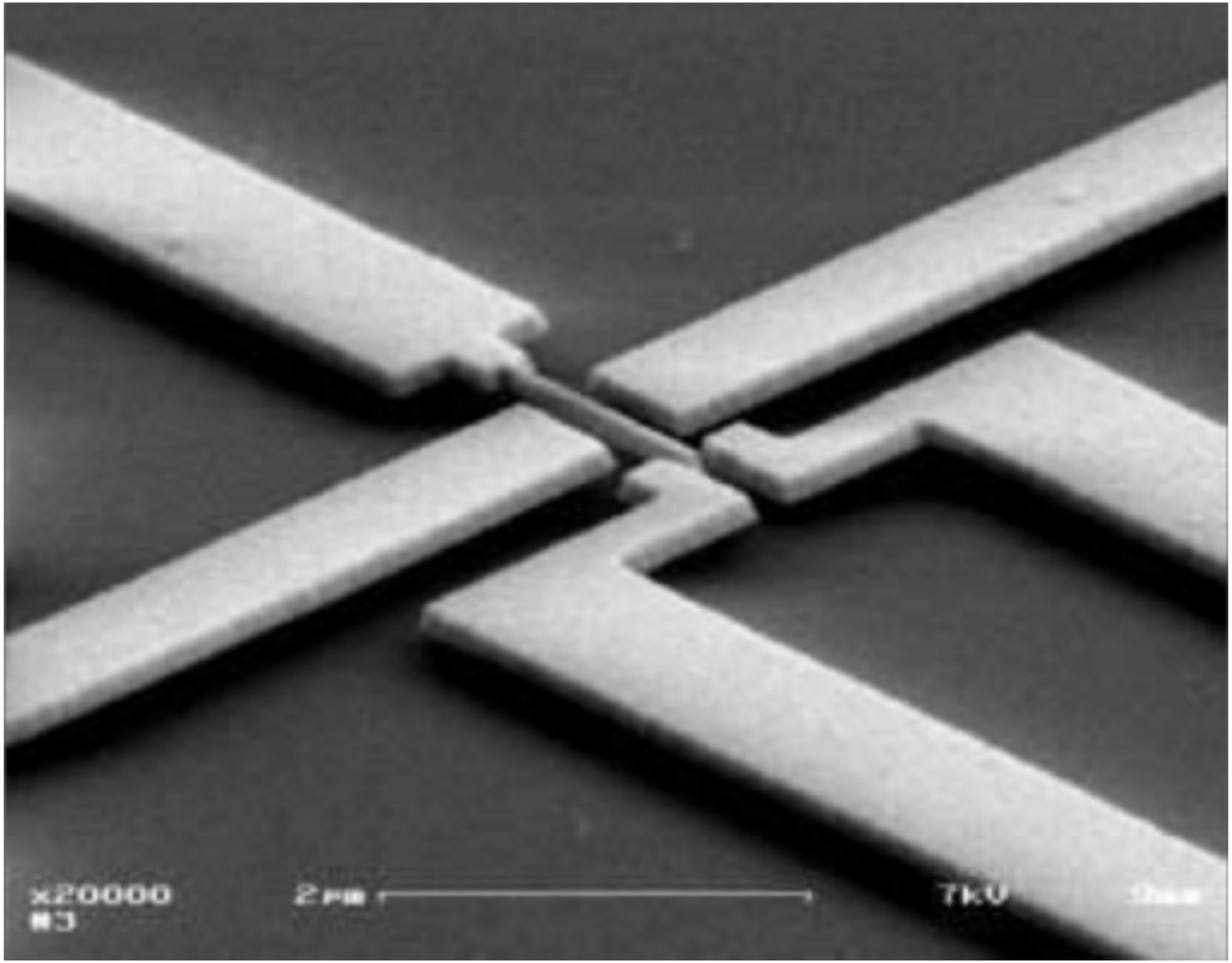
3) on évapore un métal sur le polymère gravé – ça remplit les trous.

4) on enlève le polymère : il reste un motif gravé.

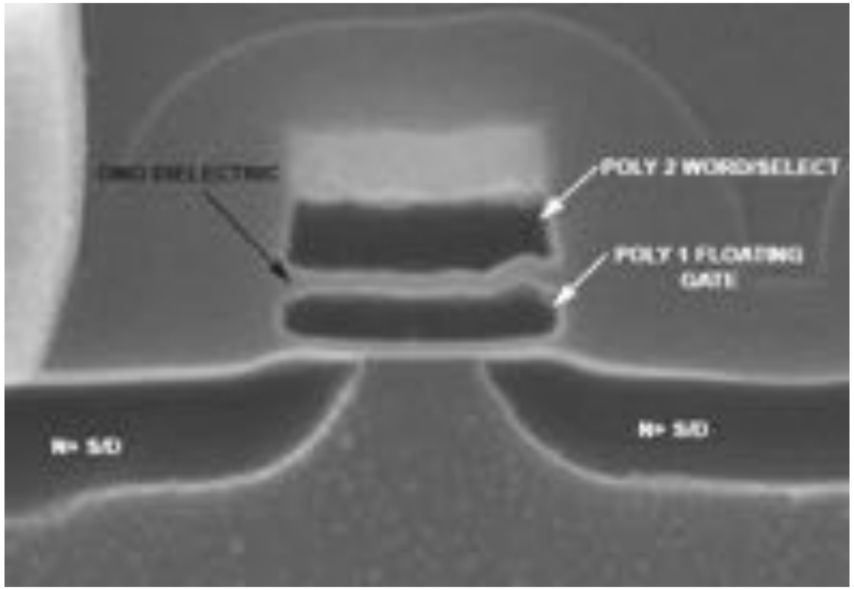

(a)
1 μm
(c)
500 nm
(b)
100 nm
(d)
1 μm

Utilisation principale :
des composants petits pour l’élecronique

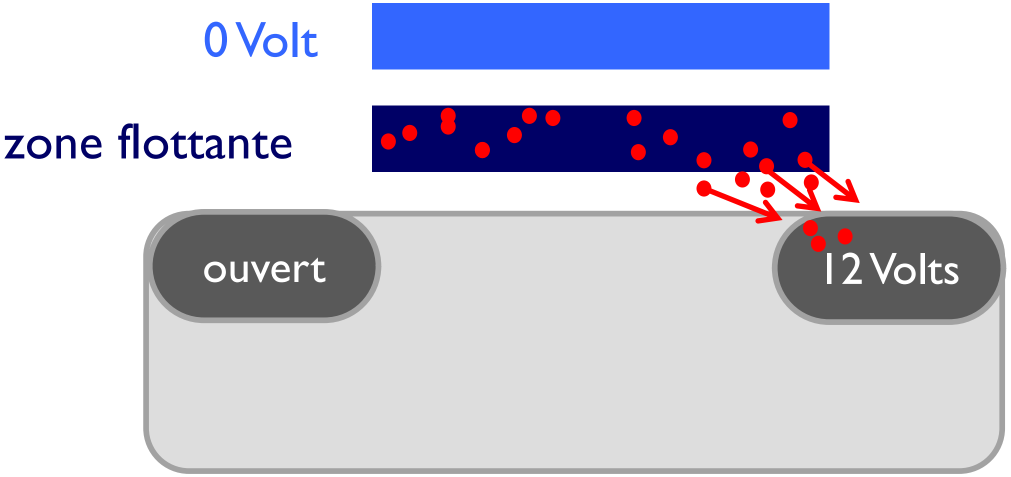
https://youtu.be/Fxv3JoS1uY8


x20000
#3
2 µm
7kV

Un exemple de composant nano :
la mémoire flash (par exple dans une clé USB)



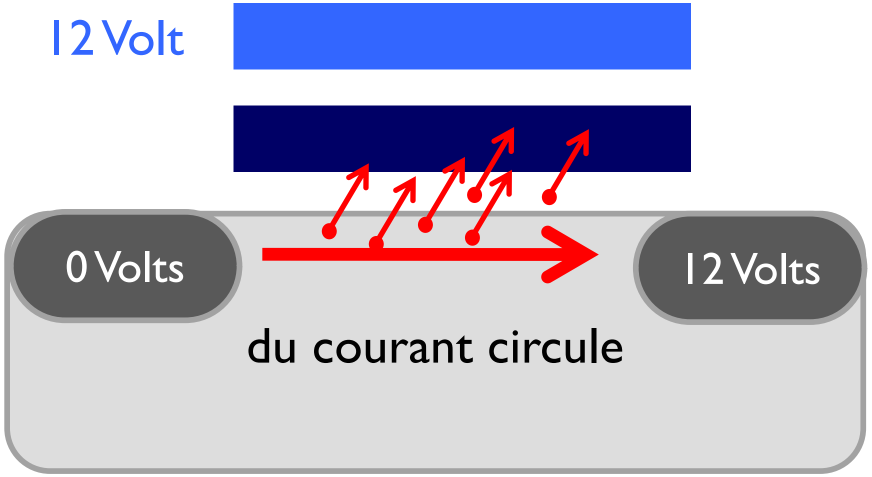
Ecriture : on peut arracher ou injecter des électrons par effet tunnel dans la zone flottante


0 Volt

zone flottante

ouvert

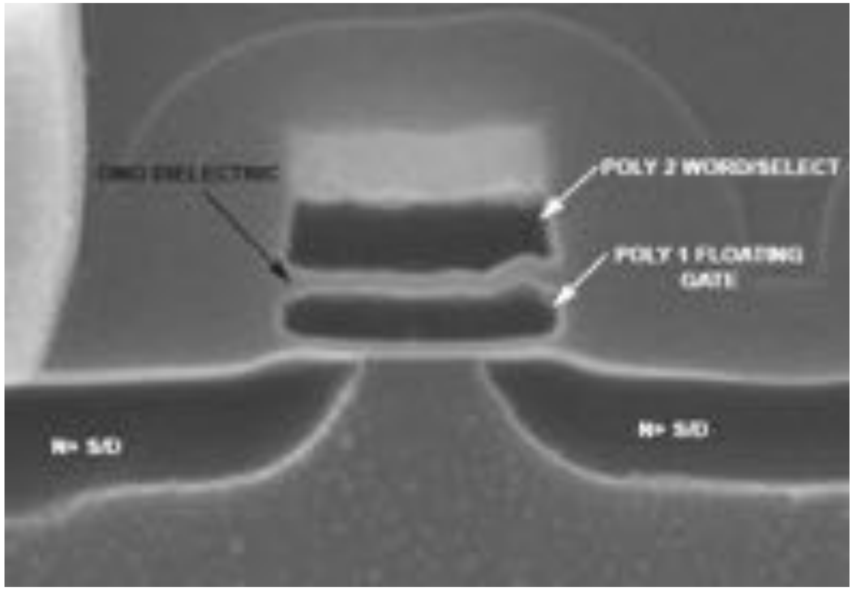
12 Volts


12 Volt

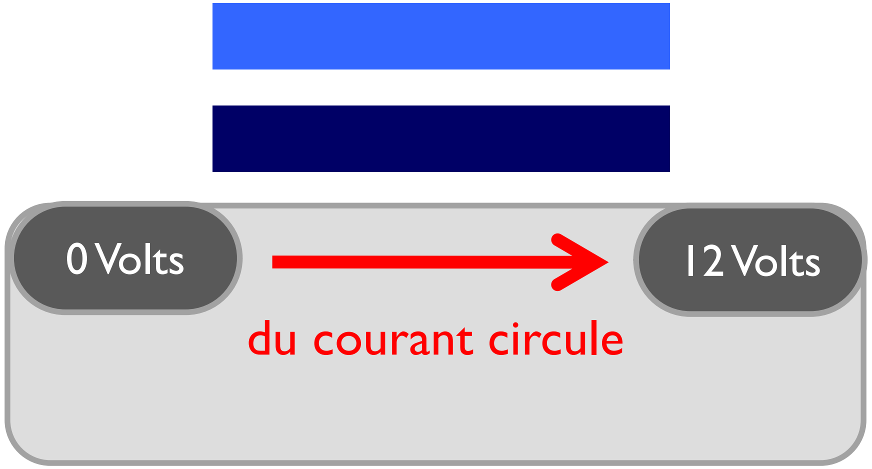
0 Volts

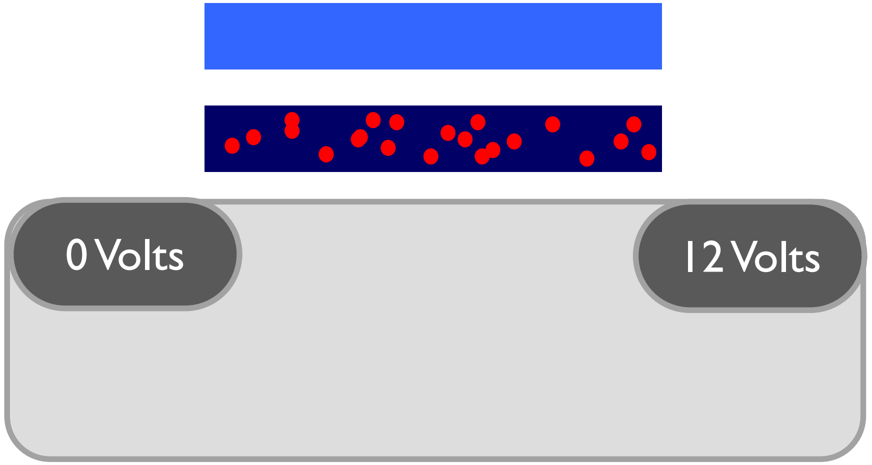
12 Volts

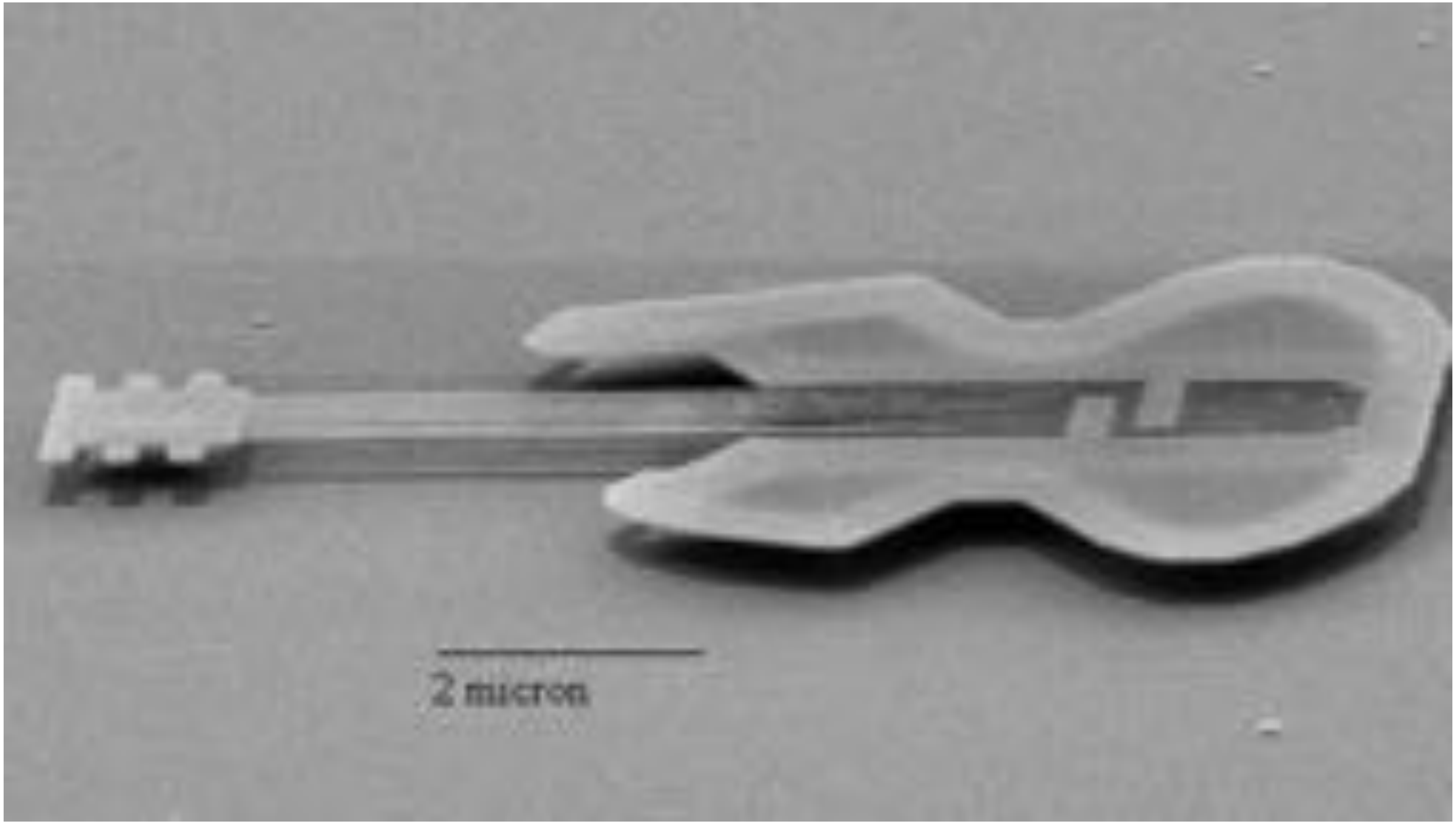
du courant circule



Lecture : si il y a des électrons stockés, ça bloque le courant électrique.





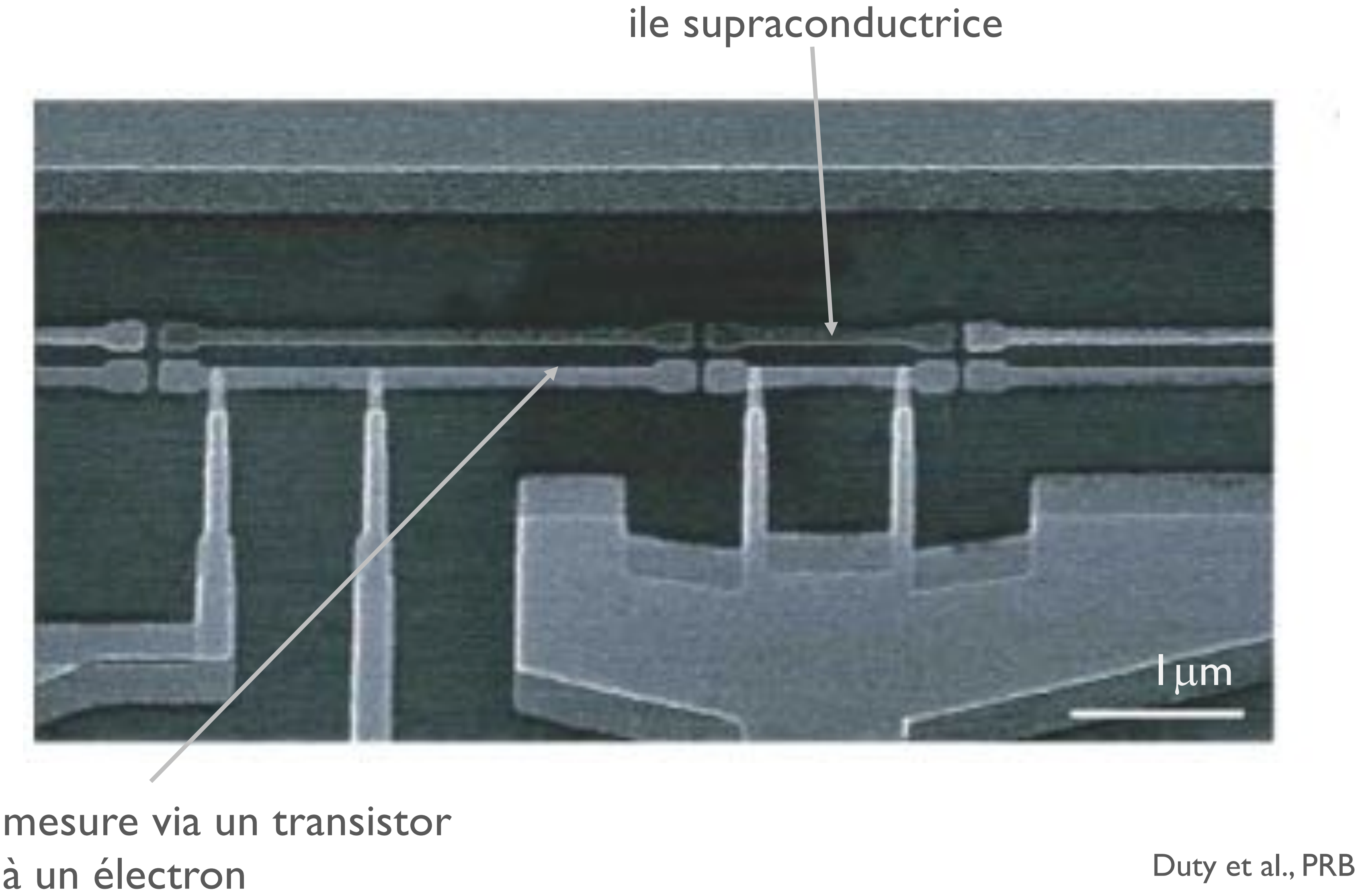


nanoguitare

une recherche récente:
graver des composants utilisant
des supraconducteurs
pour des ordinateurs quantiques

exemple : un qubit de charge supraconducteur

On peut placer N *et* N+1 paires d'électrons dans une île supraconductrice via des jonctions Josephson.



Duty et al., PRB 2004

mais...

- problème de décohérence
- problème pour trouver le bon algorithme
- problème d’erreurs qui croît exponentiellement

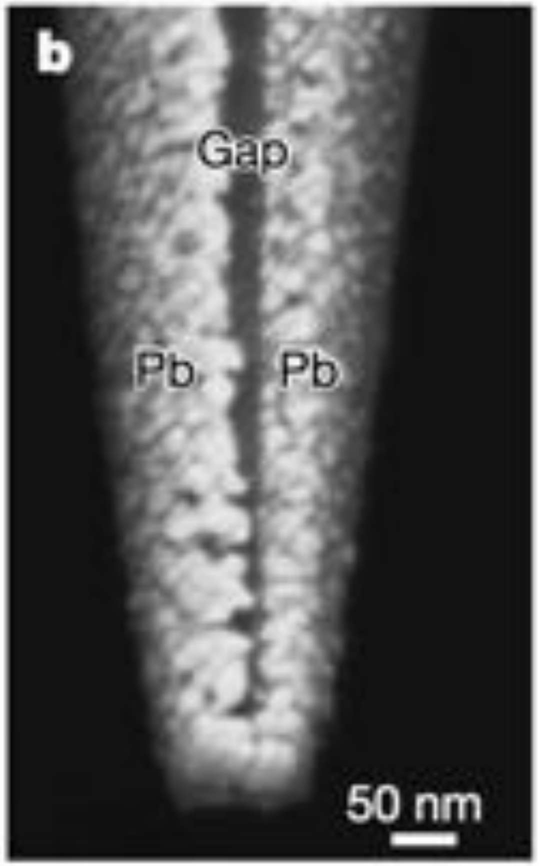
une recherche récente:
graver des composants utilisant
des supraconducteurs
pour un nano-thermomètre

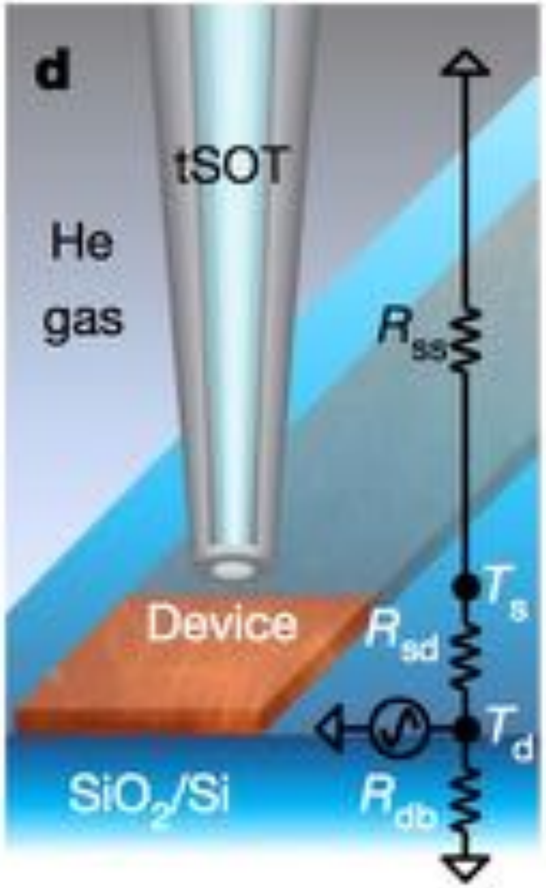
Nanoscale thermal imaging of dissipation in quantum systems

D. Halbertal[1], J. Cuppens[1,2], M. Ben Shalom[3,4], L. Embon[1]†, N. Shadmi[5], Y. Anahory[1], H. R. Naren[1], J. Sarkar[1], A. Uri[1], Y. Ronen[1], Y. Myasoedov[1], L. S. Levitov[6], E. Joselevich[5], A. K. Geim[3,4] & E. Zeldov[1]

ARTICLE

Composant SQUID (supraconducteur-isolant-supraconducteur) au bout d'une pipette.
Le courant critique du SQUID varie avec la température : $I_c(T) \approx I_0(1 - T/T_c)$.
→ Sensibilité : 1 $\mu K.Hz^{-1/2}$ et possibilité de déplacer le thermomètre





Nanoscale thermal imaging of dissipation in quantum systems

D. Halbertal[1], J. Cuppens[1,2], M. Ben Shalom[3,4], L. Embon[1]†, N. Shadmi[5], Y. Anahory[1], H. R. Naren[1], J. Sarkar[1], A. Uri[1], Y. Ronen[1],
Y. Myasoedov[1], L. S. Levitov[6], E. Joselevich[5], A. K. Geim[3,4] & E. Zeldov[1]

Nature 2016

on fait circuler 12 nA dans un nanotube : ça le chauffe et on le détecte.

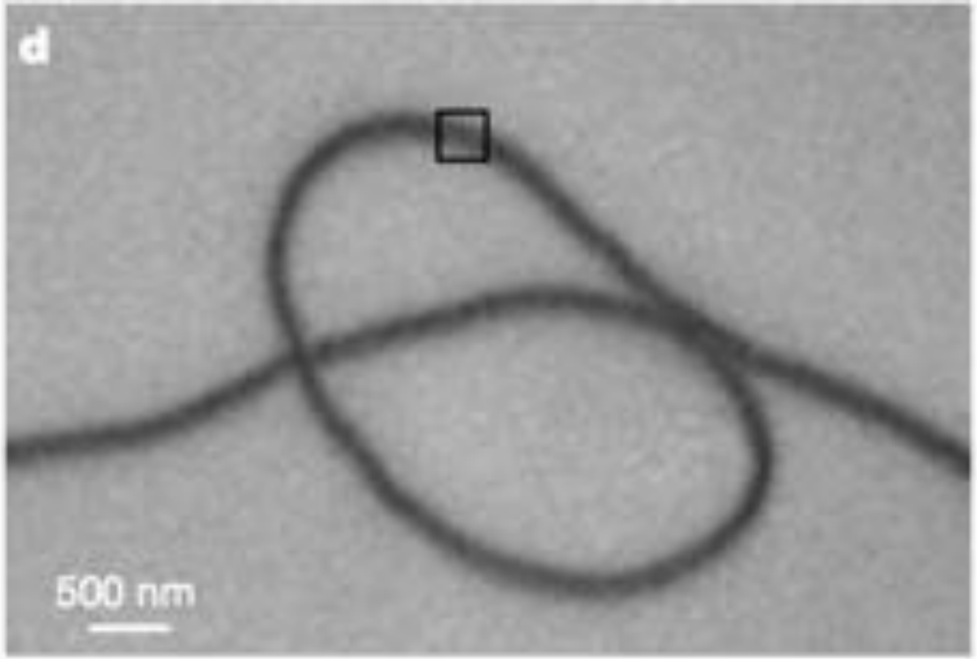


image par microscopie électronique

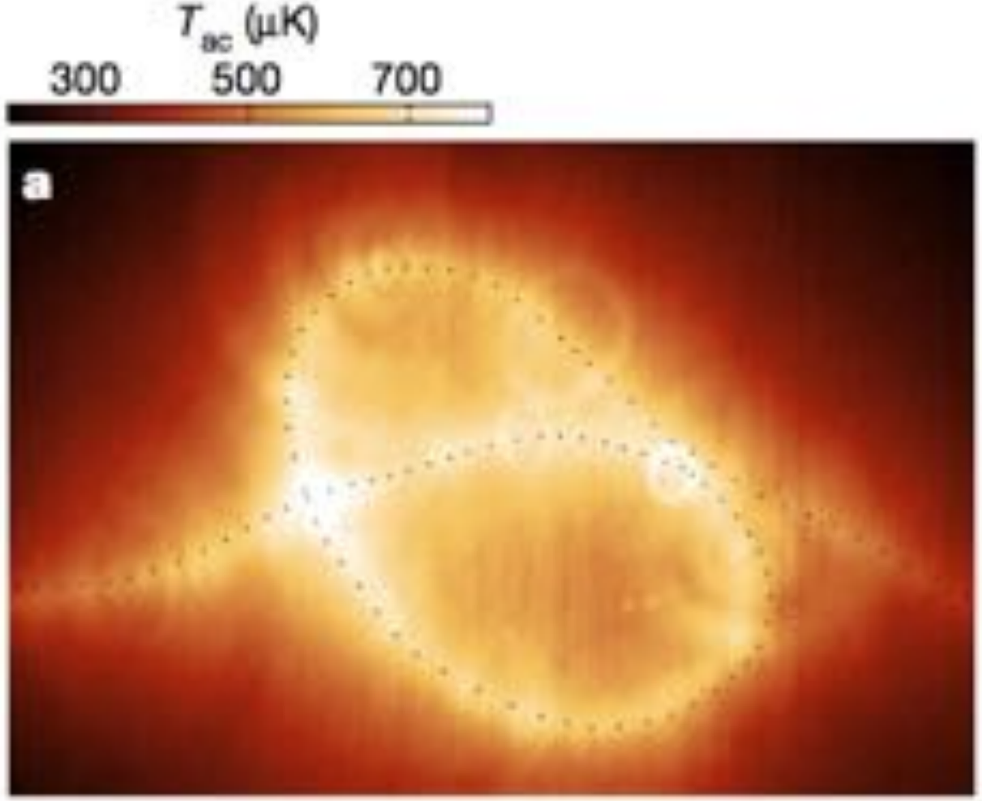


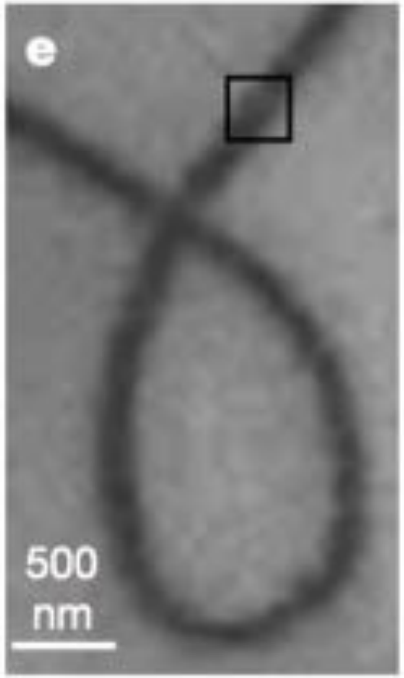
image thermique

Nanoscale thermal imaging of dissipation in quantum systems

D. Halbertal[1], J. Cuppens[1,2], M. Ben Shalom[3,4], L. Embon[1]†, N. Shadmi[5], Y. Anahory[1], H. R. Naren[1], J. Sarkar[1], A. Uri[1], Y. Ronen[1], Y. Myasoedov[1], L. S. Levitov[6], E. Joselevich[5], A. K. Geim[3,4] & E. Zeldov[1]

Nature 2016

expérience avec une autre boucle de nanotube et un courant de 3nA



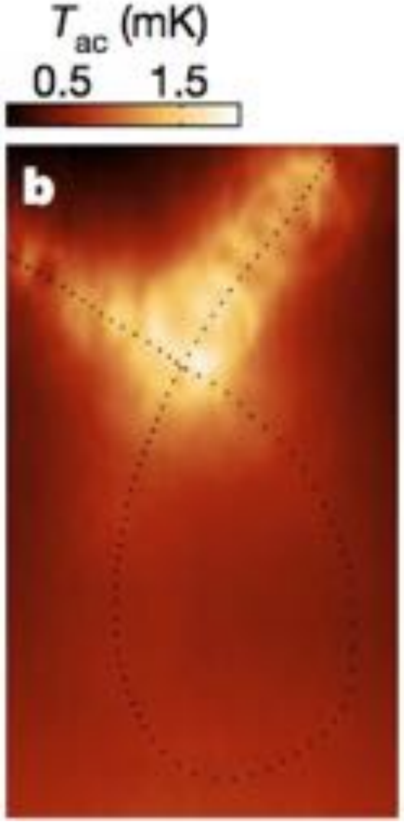


image par microscopie électronique

image thermique

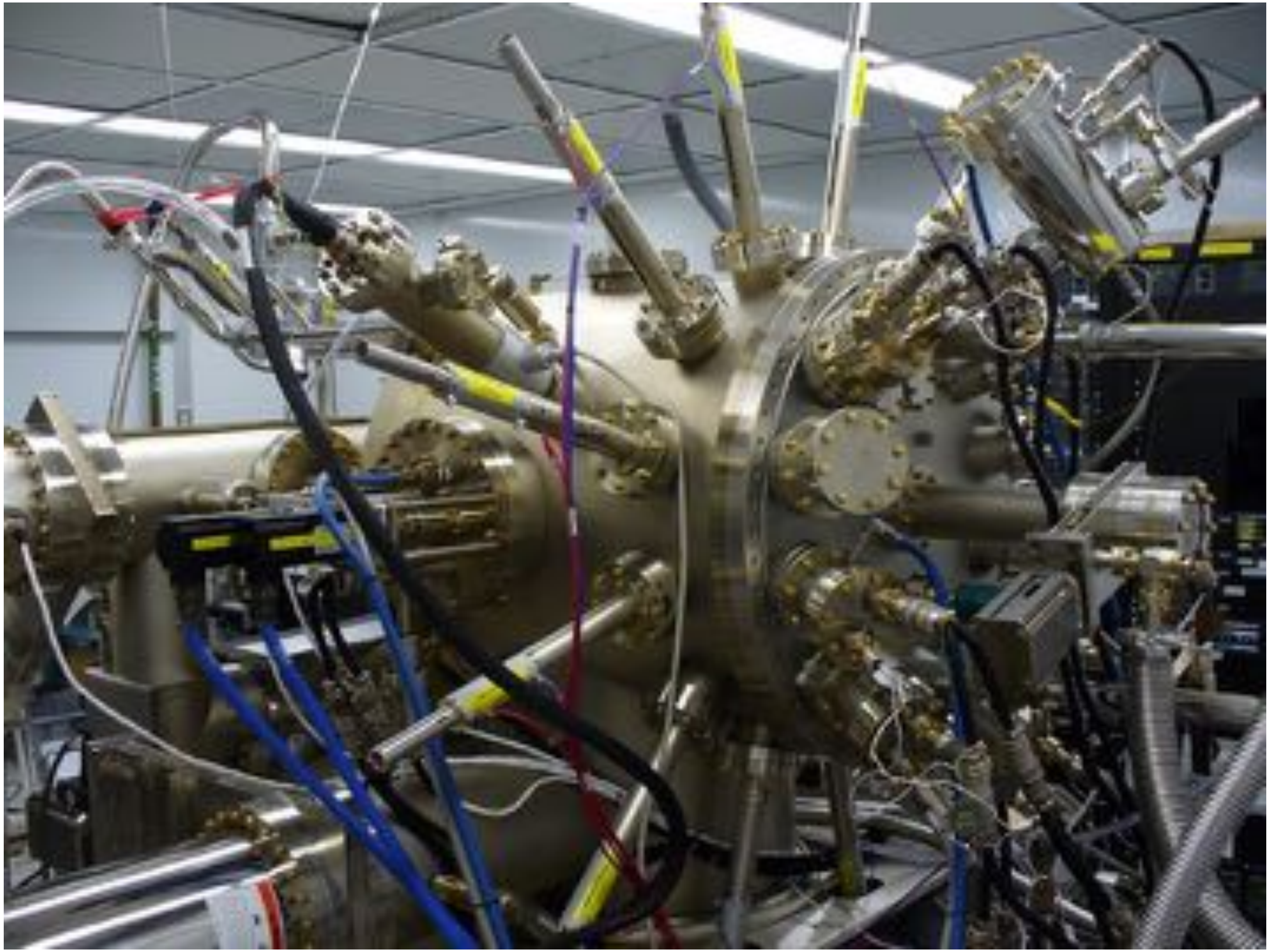
Il n’y a plus de courant dans la boucle
On vient de détecter un court-circuit

Comment fabriquer ?

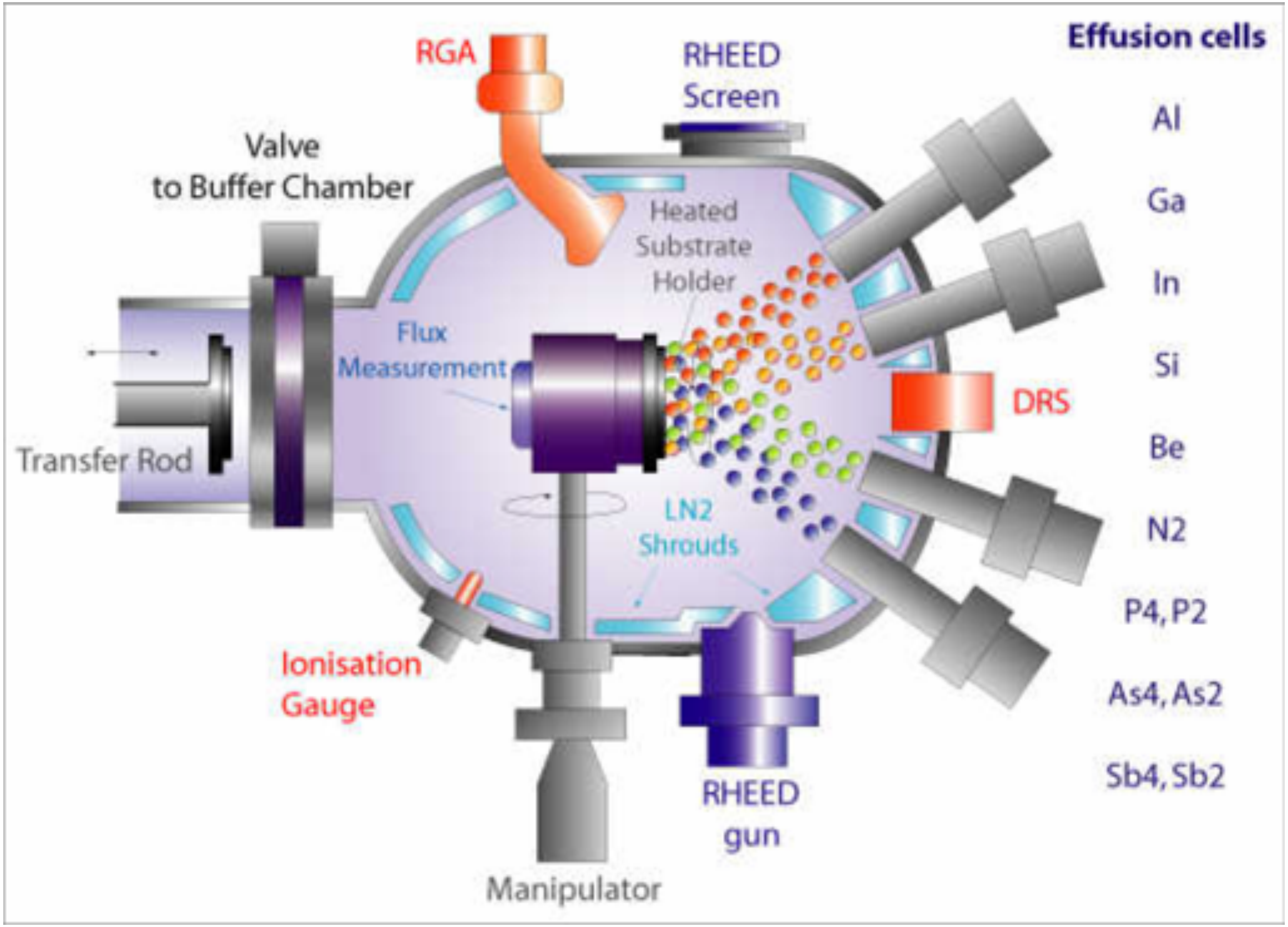
- atome par atome
- en gravant
- en évaporant
- à partir de matière existante

Fabriquer en évaporant

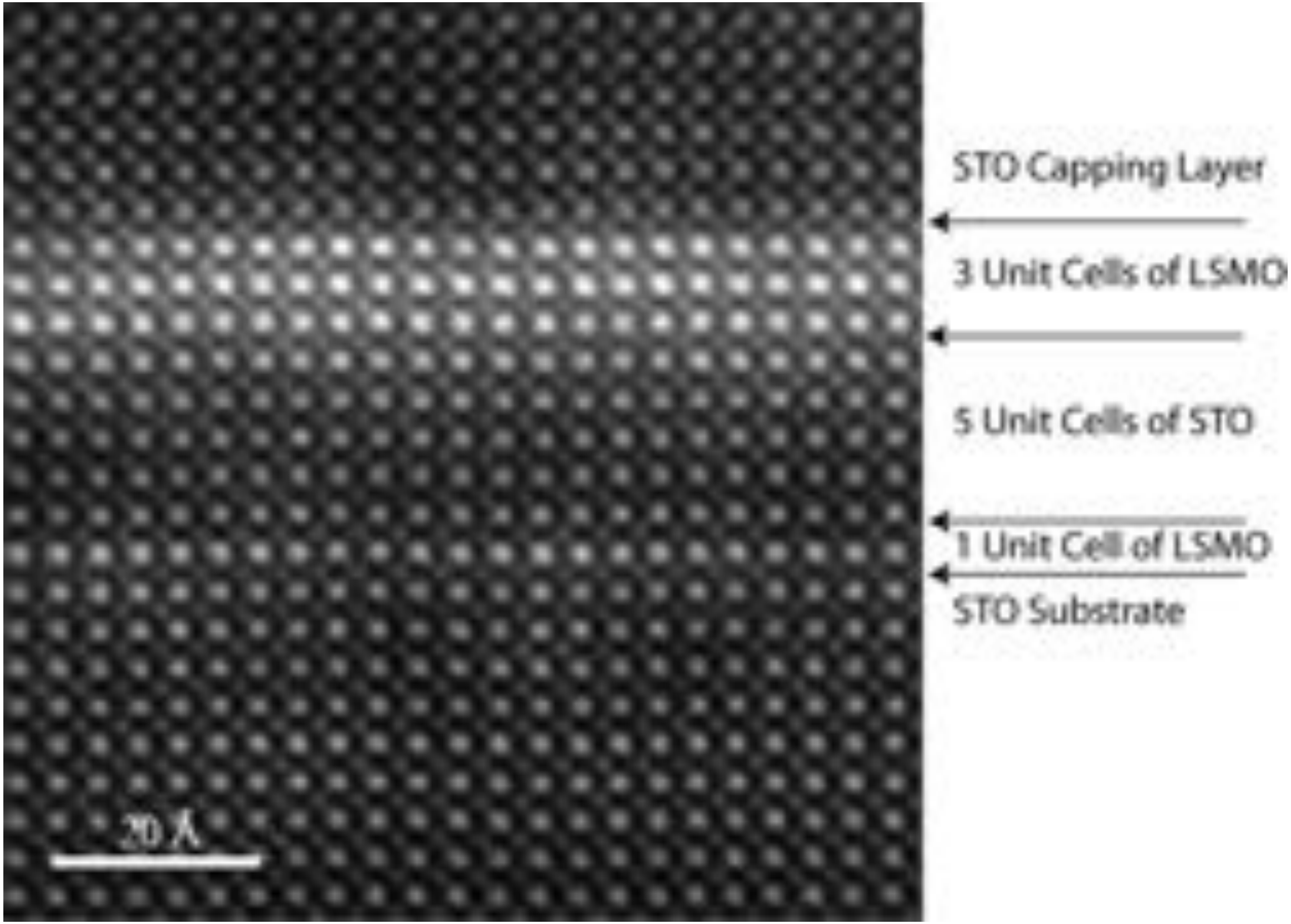
on évapore des vapeurs contrôlées sur une surface pour qu’elles s’y déposent couche par couche



Epitaxie par jets moléculaires



Epitaxie par jets moléculaires

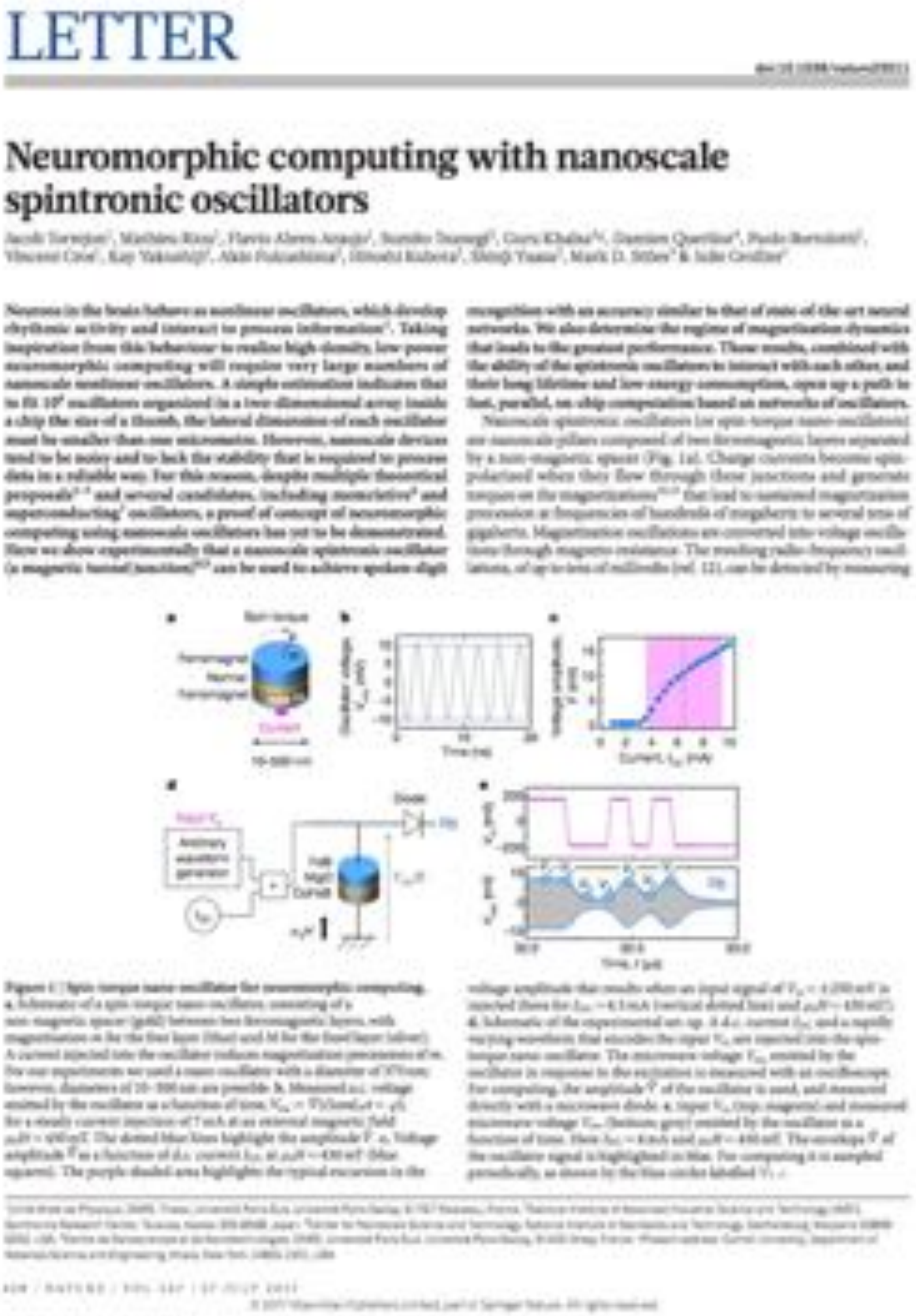

STO Capping Layer
3 Unit Cells of LSMO
5 Unit Cells of STO
1 Unit Cell of LSMO
STO Substrate
20 Å

des multicouches magnétiques

P. Grunberg, A. Fert

une recherche récente:

simuler un neurone
avec des couches minces
magnétiques



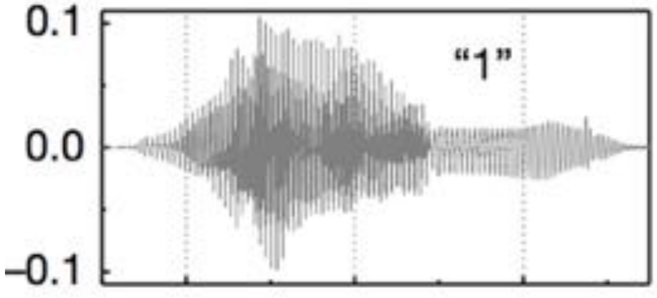
LETTER

Neuromorphic computing with nanoscale spintronic oscillators

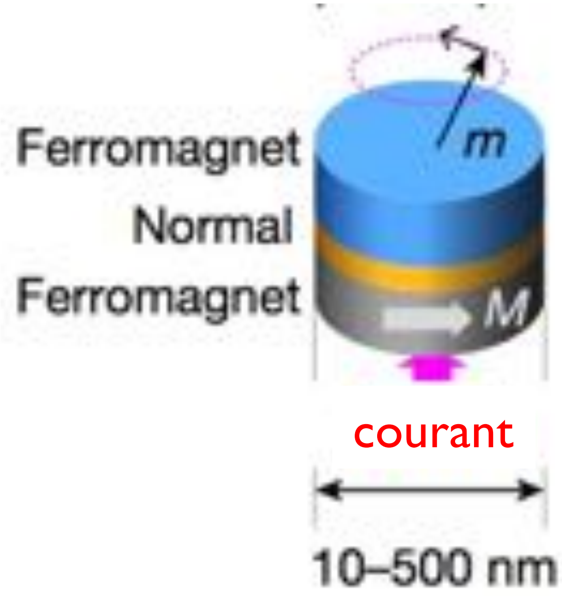
ARTICLE

le son pour «1 », « 2 », « 3 »...

le courant fait tourner l'aimantation qui fait osciller la magnétoresistance



courant



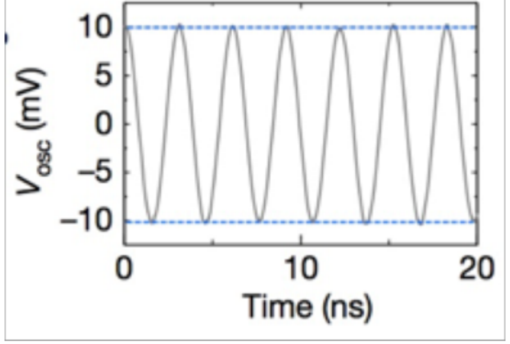
FeB

MgO

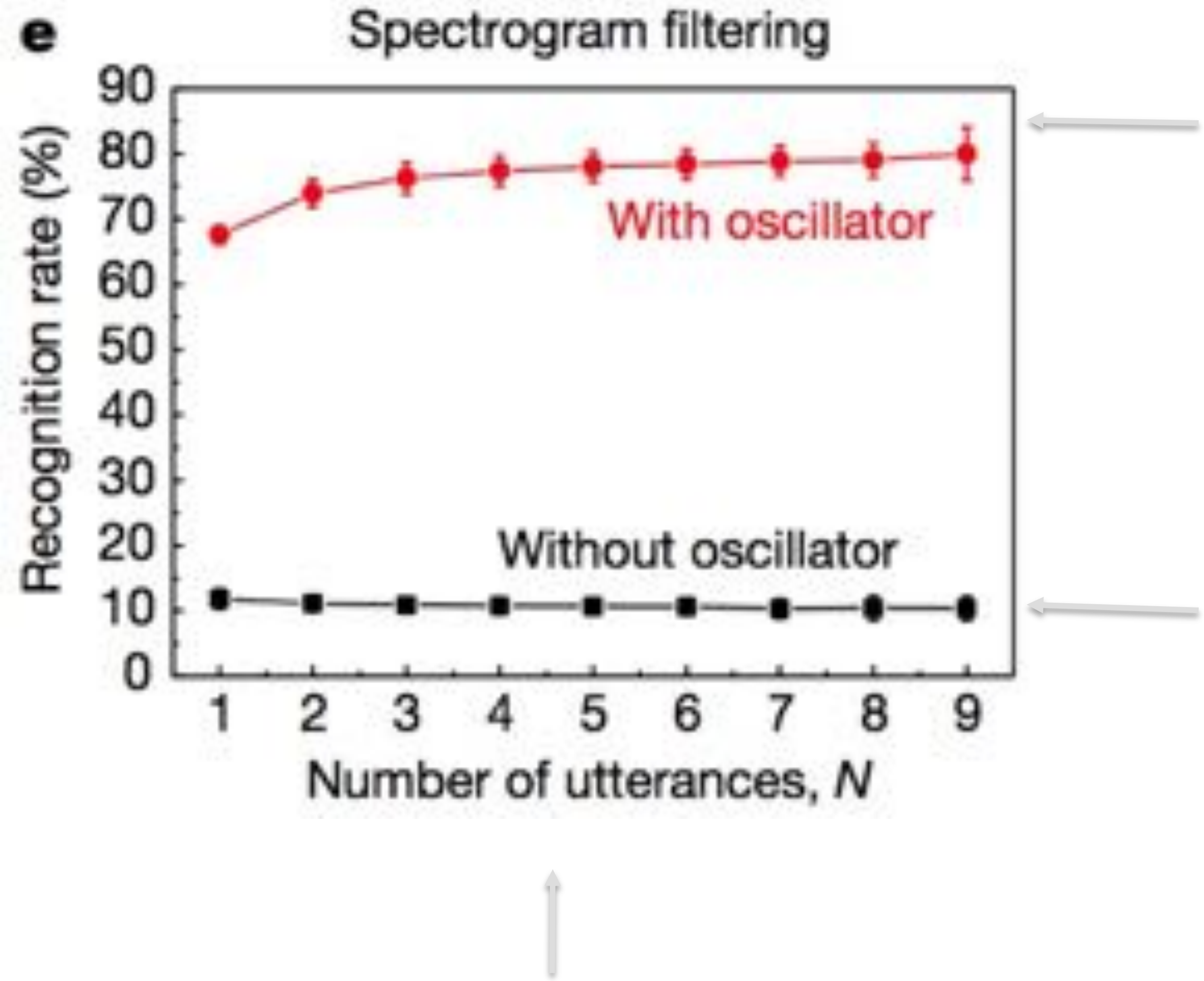
CoFeB

courant

tension oscillante



machine learning



reconnaissance des sons
avec le « spin torque oscillator »

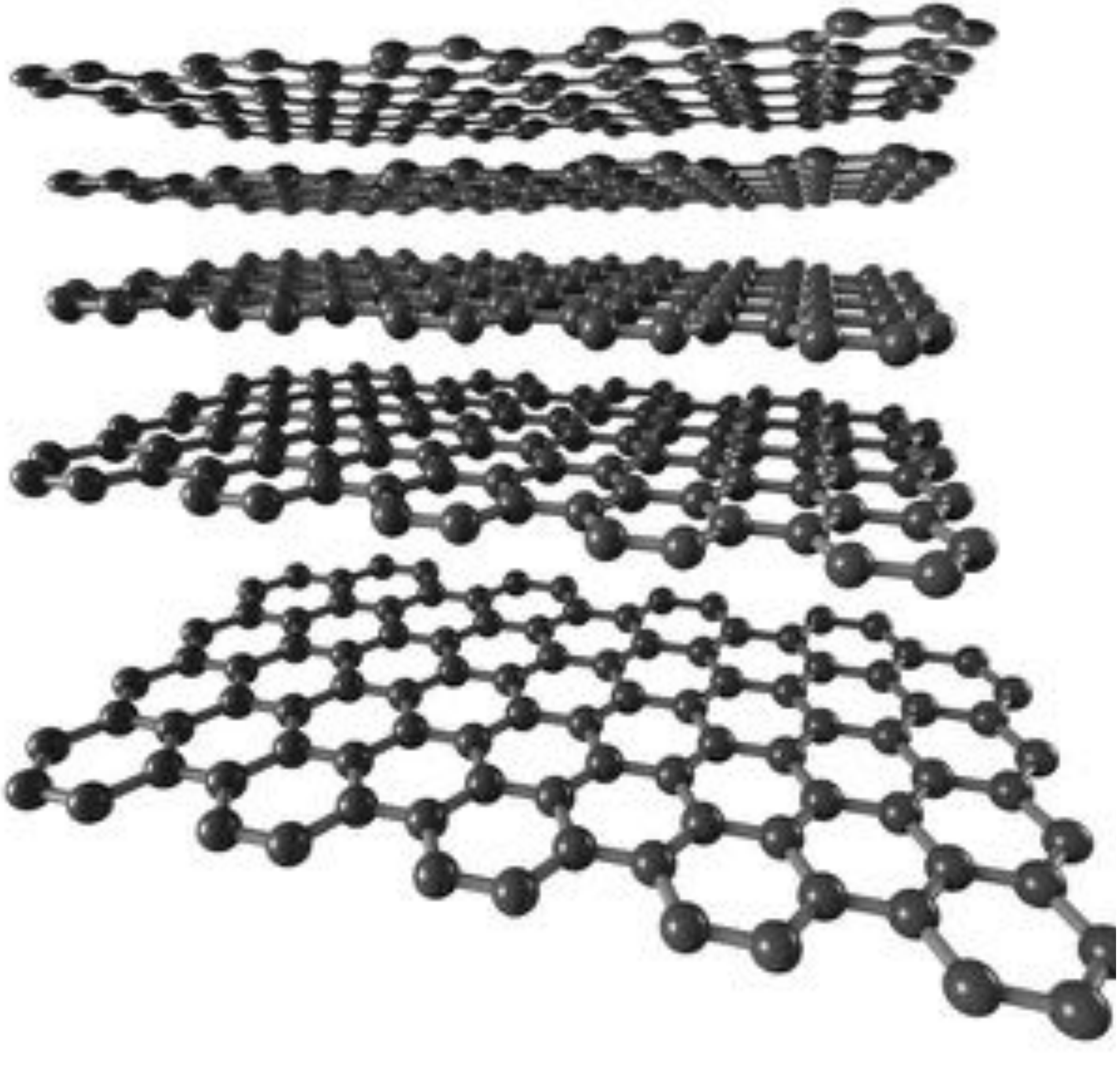
sans le « spin torque oscillator »

nombre d’itérations d’apprentissage

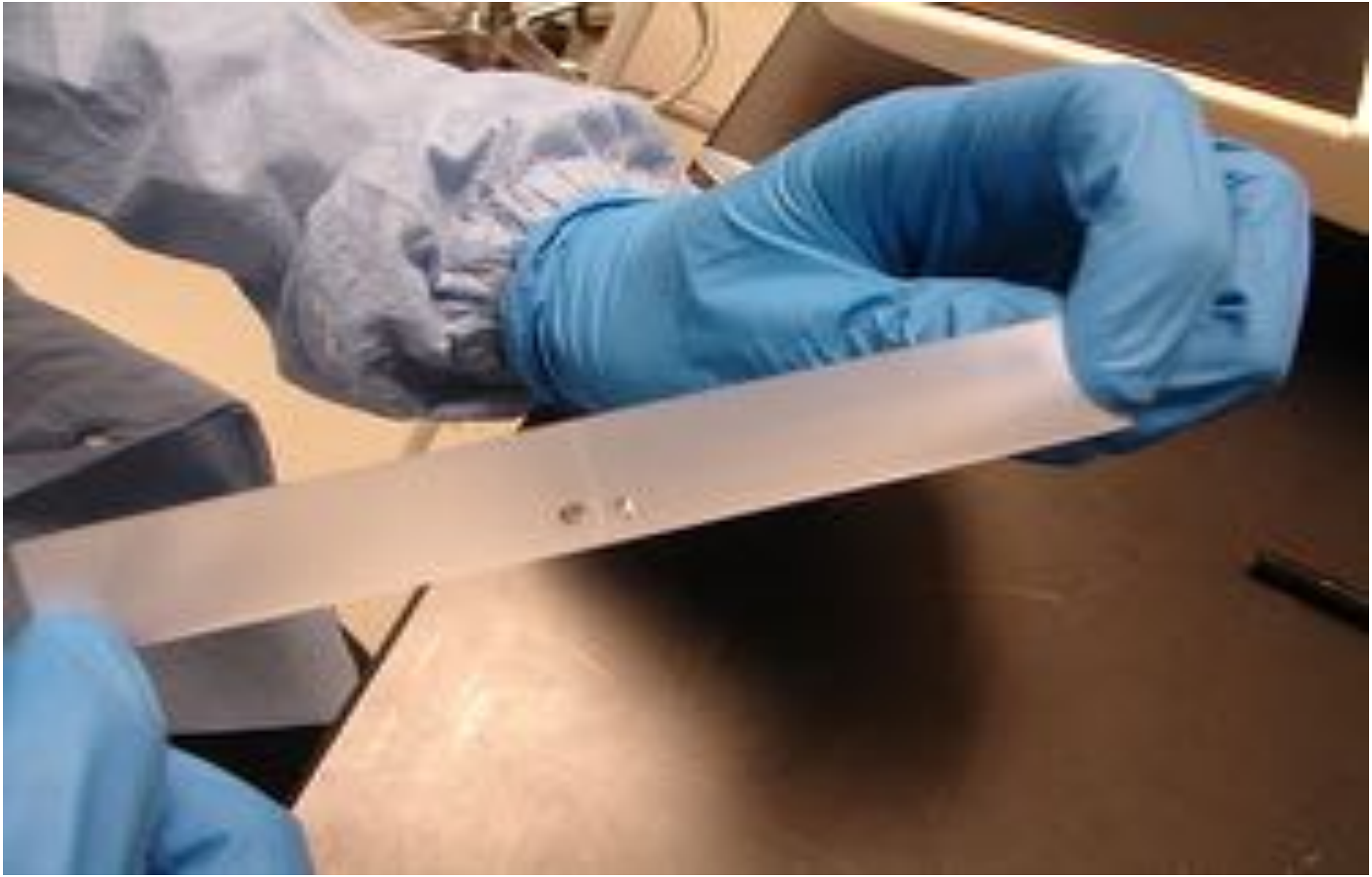
Comment fabriquer ?

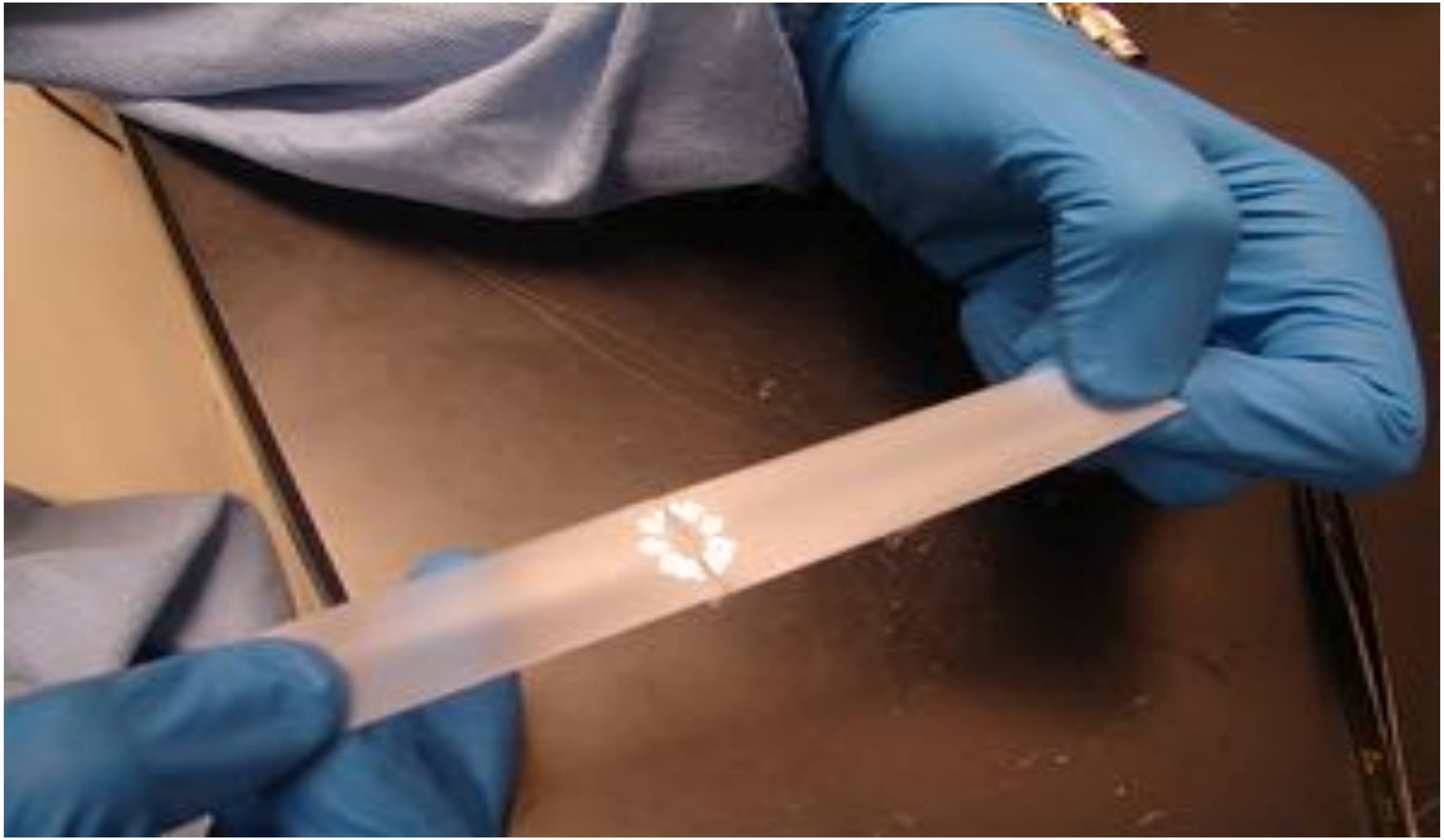
- atome par atome
- en gravant
- en évaporant
- à partir de matière existante

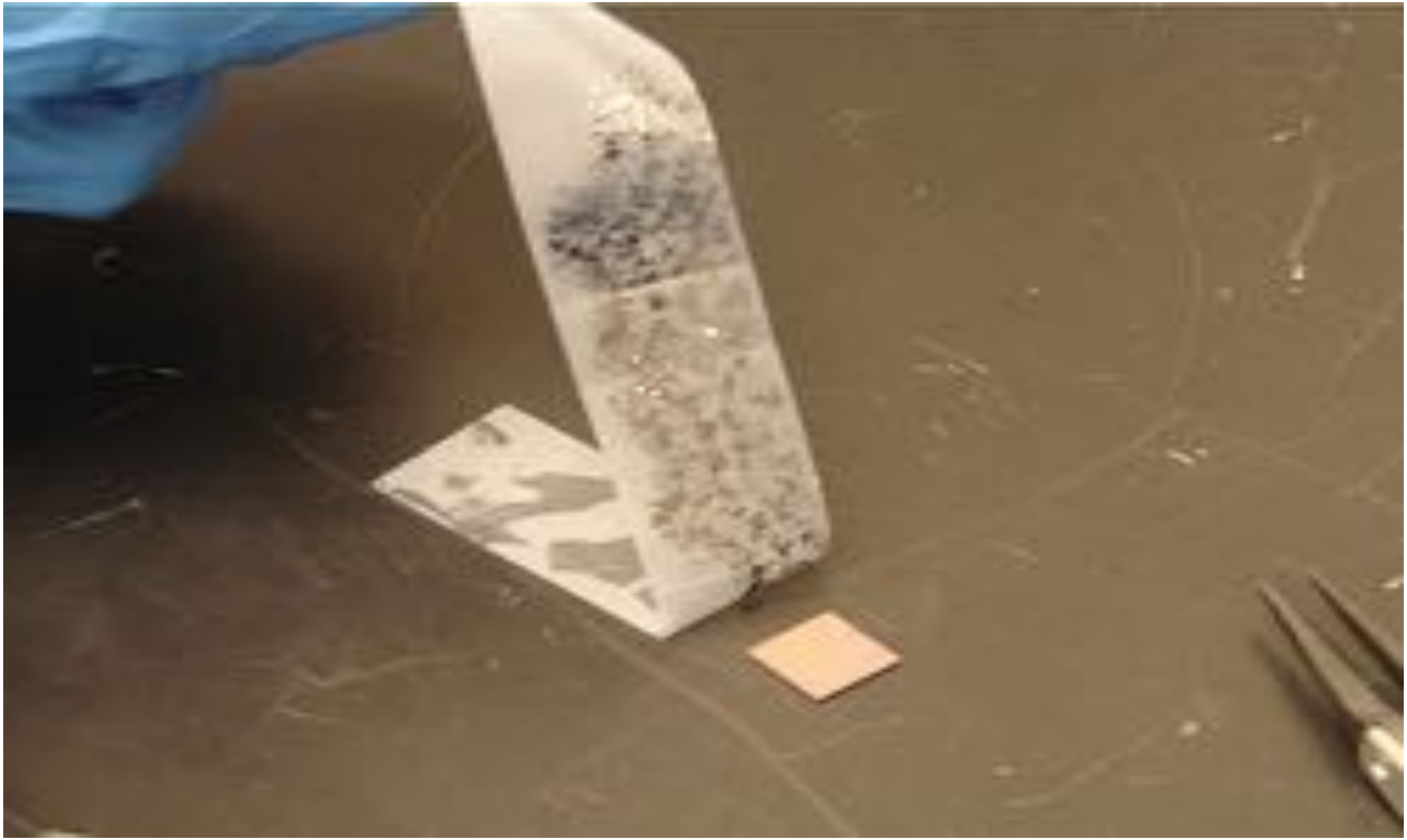
du charbon (le graphite) :



LIQUID HELIUM

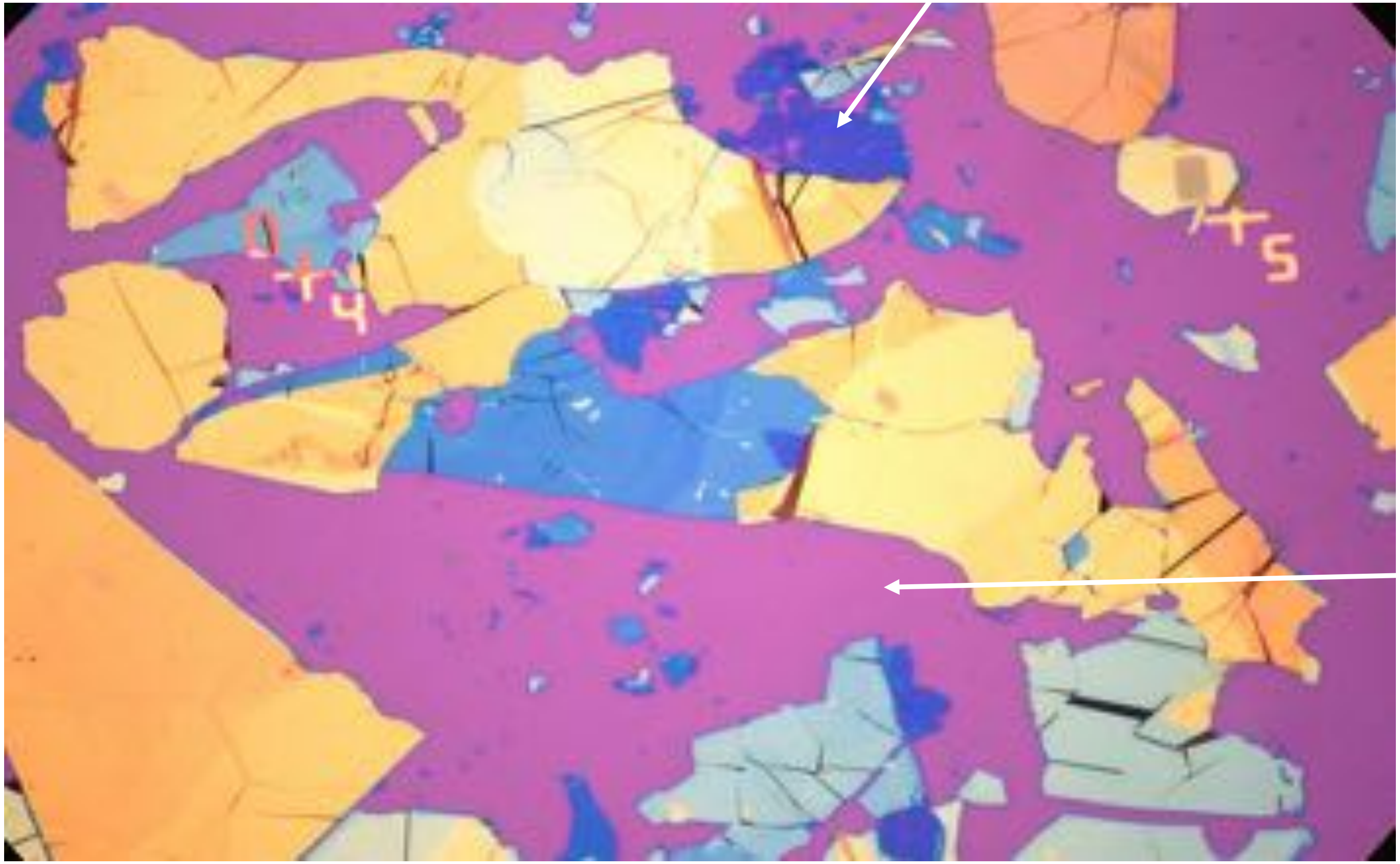






Faire du graphène et le reconnaître

Repérer le graphène par sa couleur, grâce aux interférences optiques fonction de l'épaisseur

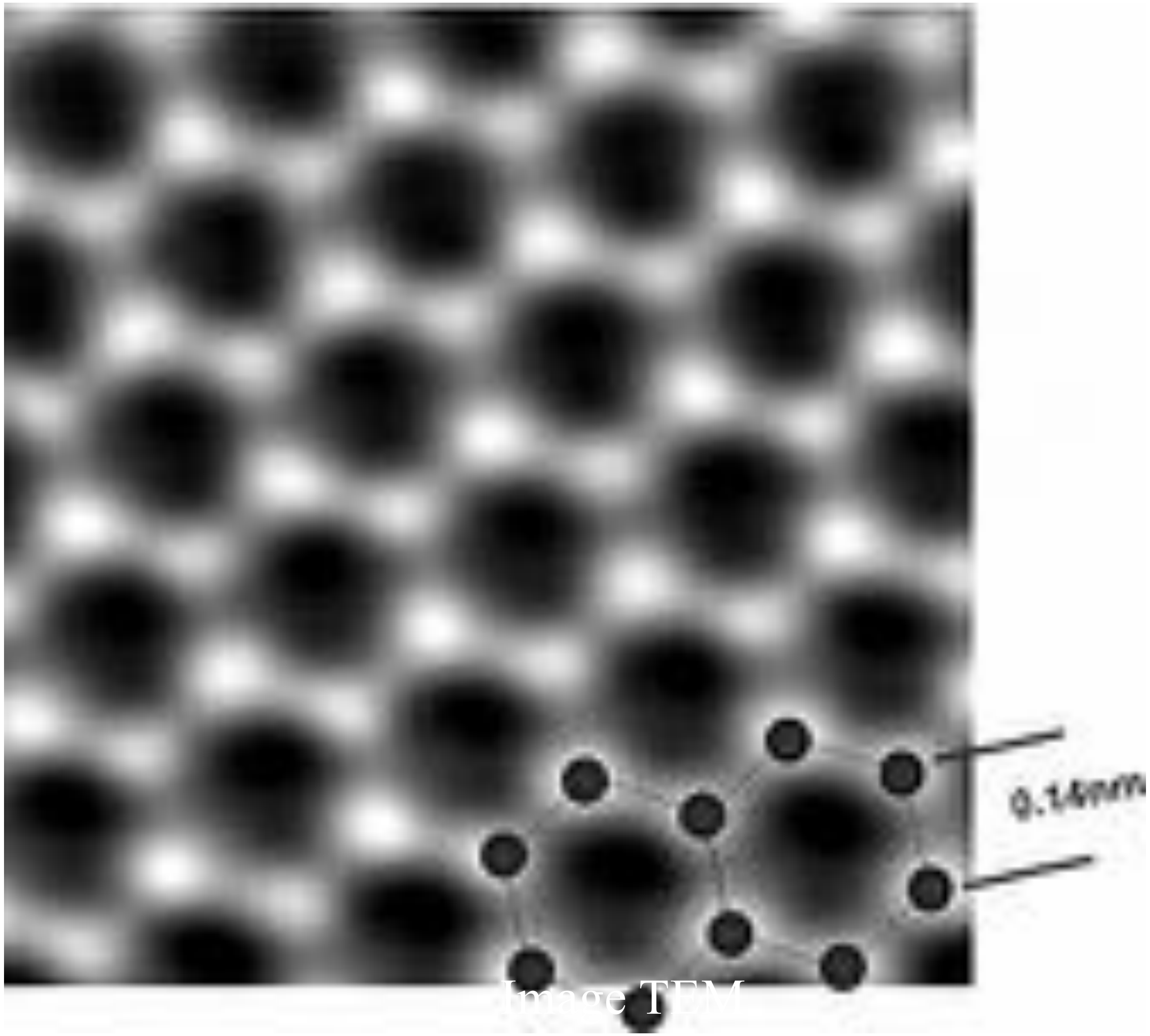


Couleur très claire légèrement teintée = graphène
Couleur brillante = graphite (métal)

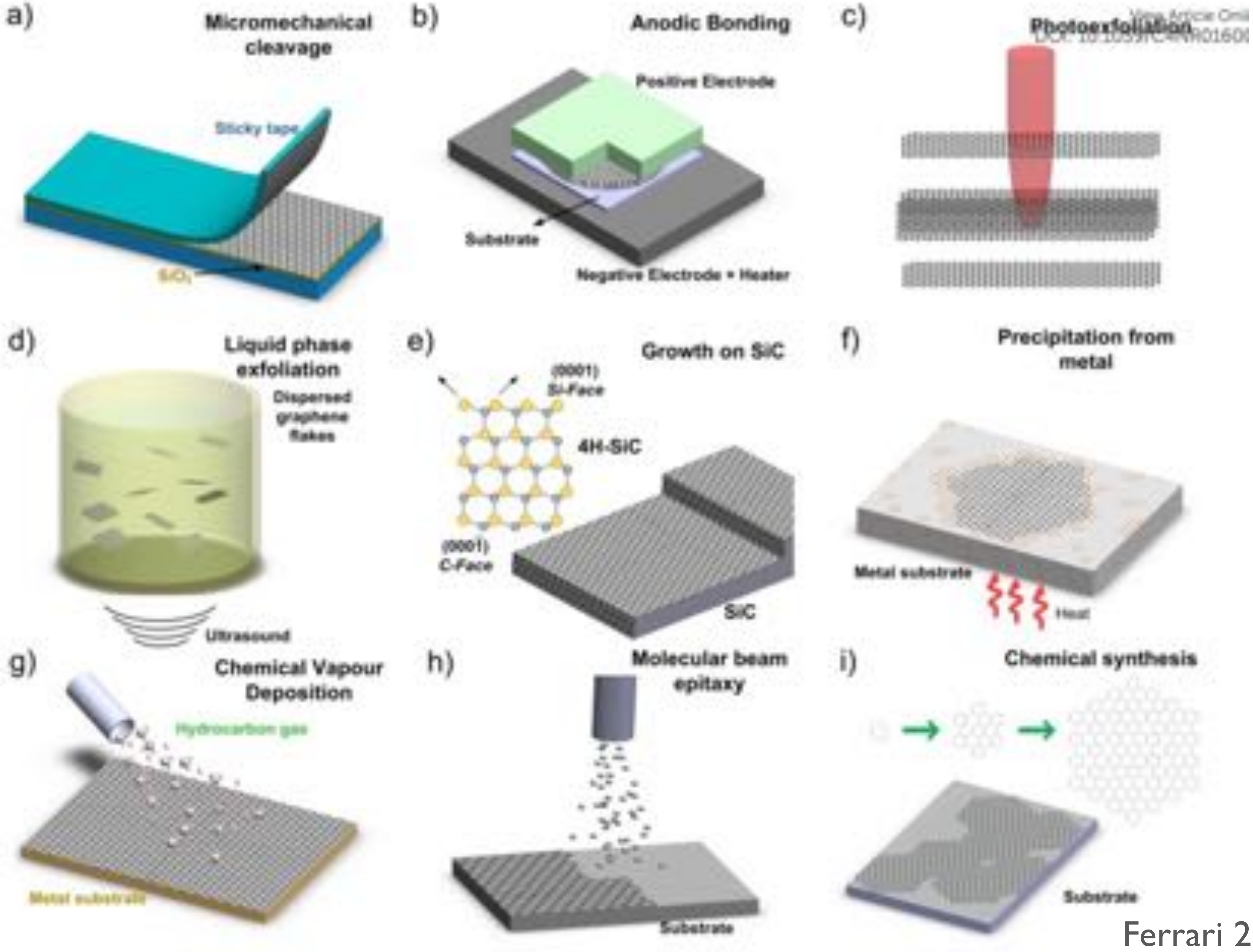
SiO_2
(285nm = rose)
sur Si

Geim et coll. 2004
Image optique

graphène mesuré par microscope à effet tunnel



Autres moyens de production du graphène



Ferrari 2015

Propriétés mécaniques du graphène

le graphène est très dur et stable et 2D
–> utilisable comme outil de choix à l’échelle du nanomètre.

Module d’Young = 1 TeraPa :

matériau le plus solide jamais mesuré

(200 fois plus que l’acier)

Mais mesure sur des surfaces de qq μm donc pas de défauts

donc pas de rupture facile –

pas pareil pour de grandes surfaces

recherche récente :
plier et découper du graphène

LETTER

Graphene kirigami

ARTICLE

kirigami :
couper + papier

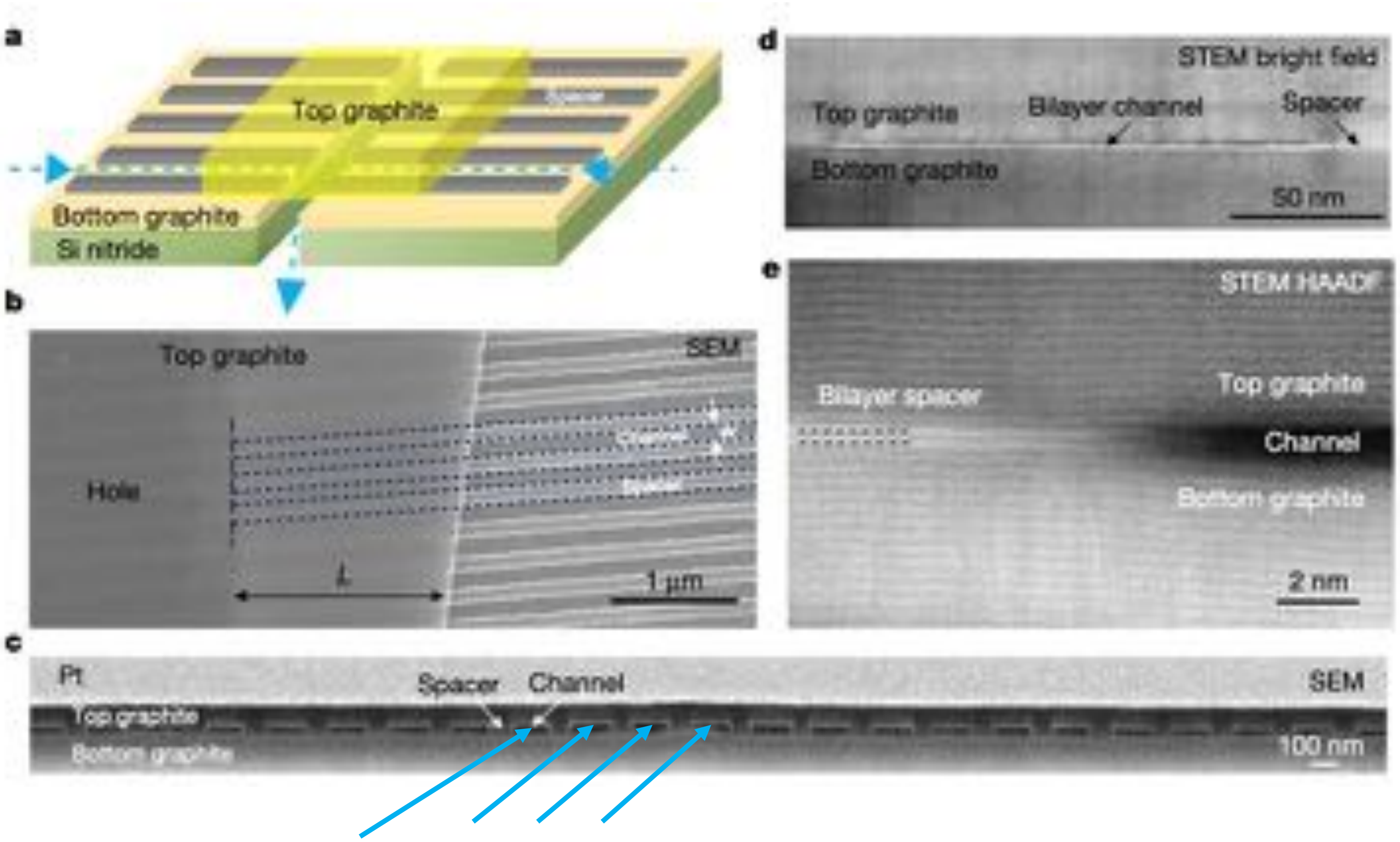
https://youtu.be/PsIqicBrsQQ

recherche récente :
filtrer l’eau

le graphène comme tamis

Molecular transport through capillaries made with atomic-scale precision

B. Radha[1], A. Esfandiar[1], F. C. Wang[2], A. P. Rooney[3], K. Gopinadhan[1], A. Keerthi[1], A. Mishchenko[1], A. Janardanan[1], P. Blake[4], L. Fumagalli[1,4], M. Lozada-Hidalgo[1], S. Garaj[5], S. J. Haigh[3], I. V. Grigorieva[1], H. A. Wu[2] & A. K. Geim[1]



graphite
----
qq plans de graphene
----
graphite

ça peut passer par là: largeur 130 nm

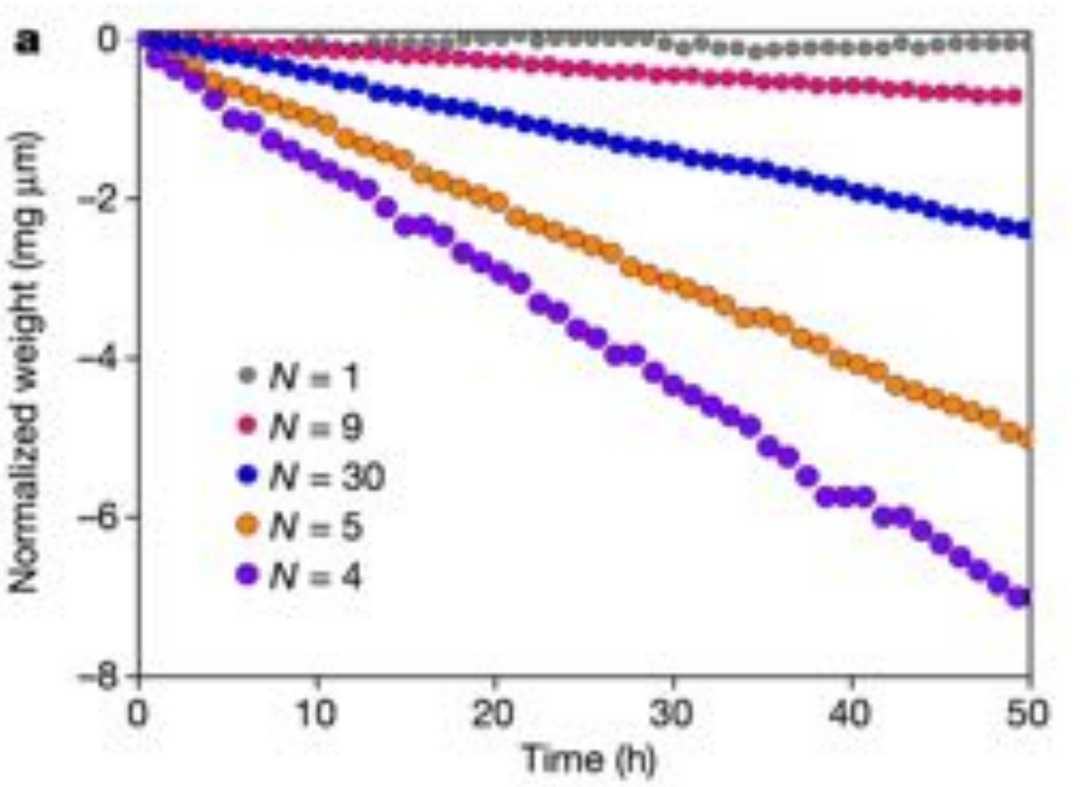


Figure 3 | Water flow through channels of different height. a, Examples of gravimetric measurements for various N (the number of graphene layers used as spacers). They were carried out at 21 °C in near zero humidity, and the curves are normalized for the effective length of the devices, $\tilde{L}$.

largeur du capilaire : N x 0.34 nm

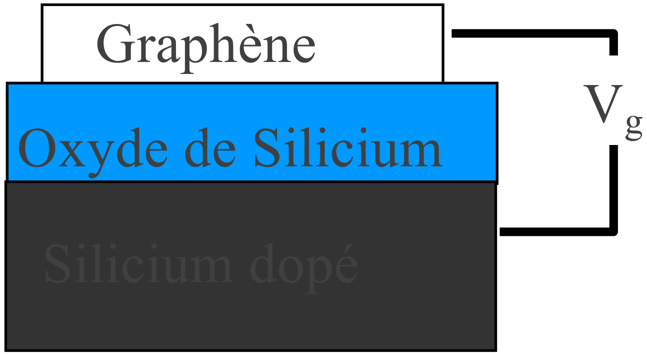
vitesse d’écoulement jq 1 m/sec

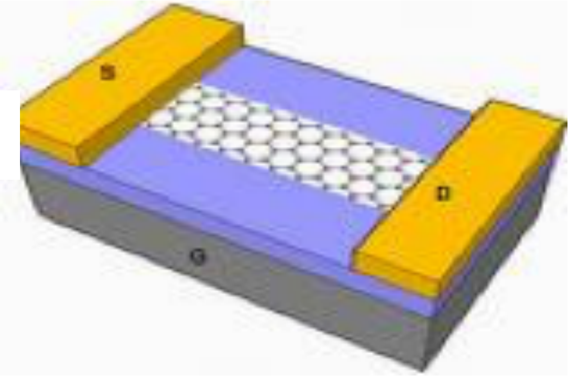
Ouvre la voie au contrôle de capilaires de diamètres nanométriques pour filtrer des molécules selon leur taille

Radha et al., Nature 2016

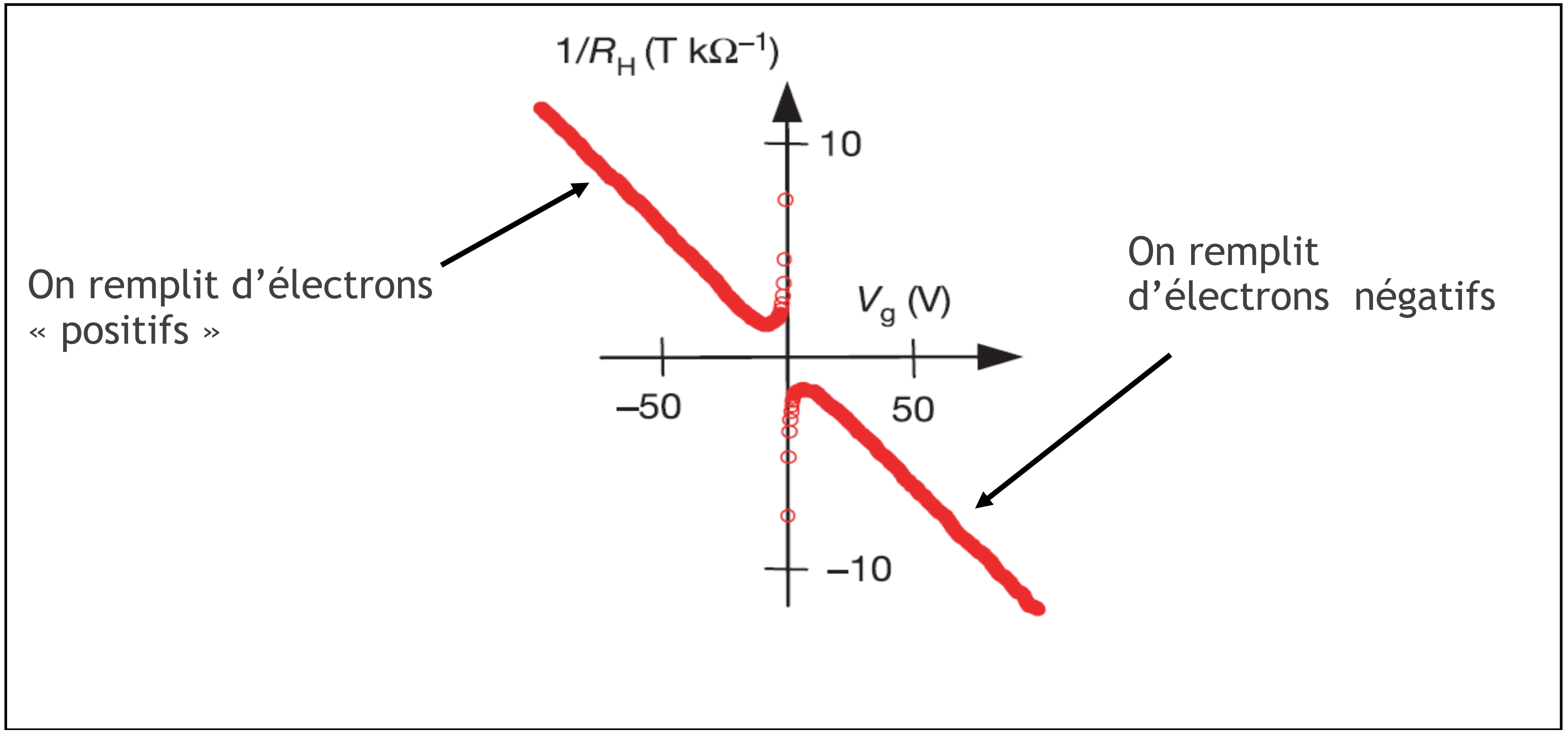
Propriétés électriques du graphène

On peut contrôler son nombre d'électrons et le doper énormément: on introduit ou on arrache des électrons via une grille et une tension





Effet Hall : R_H=B/(nb porteur * charge)



On remplit d'électrons « positifs »

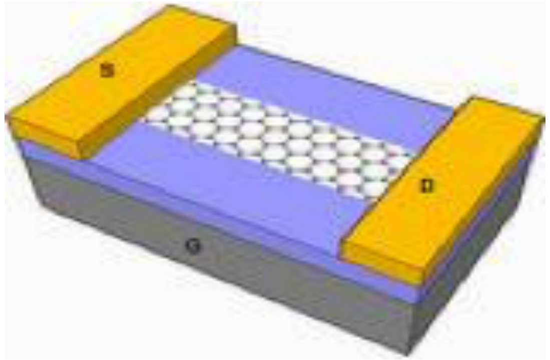
On remplit d'électrons négatifs

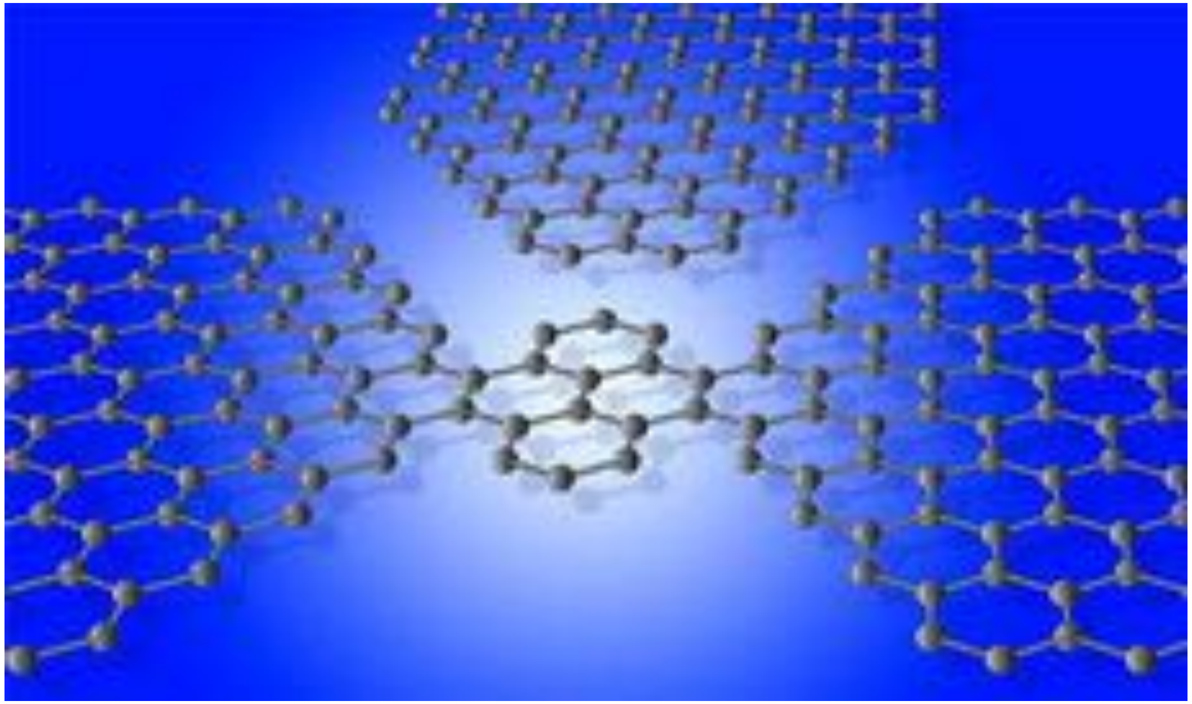
Propriétés électriques du graphène

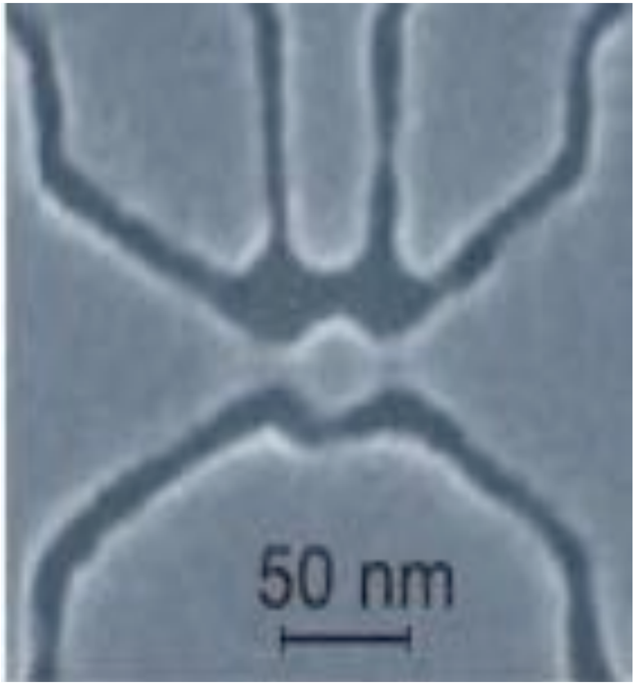
Très bonne mobilité des électrons, contrôle de leur charge, et miniaturisation : possibilité de faire des transistors de 10 nm (limite pour les transistors actuels = 50nm)

Possibilité de lignes très fines

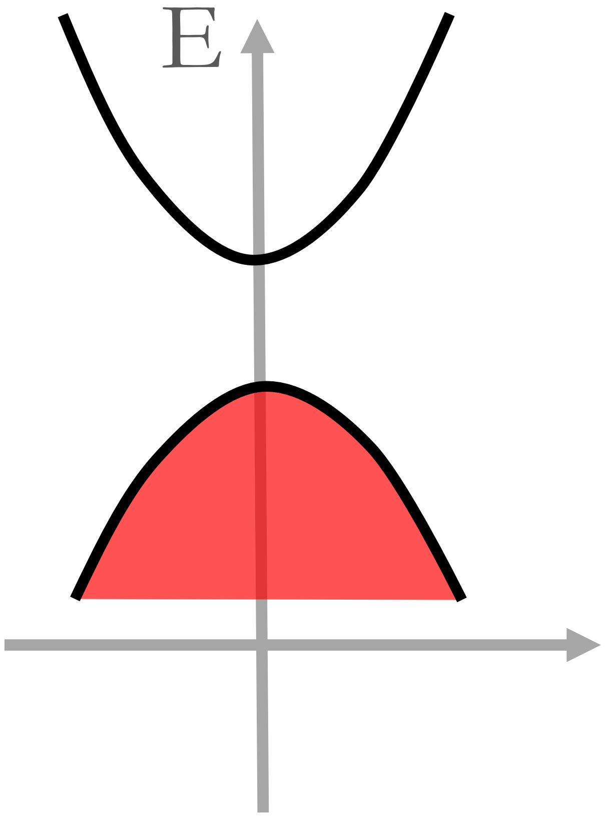
(mais comment bien couper les bords ?)



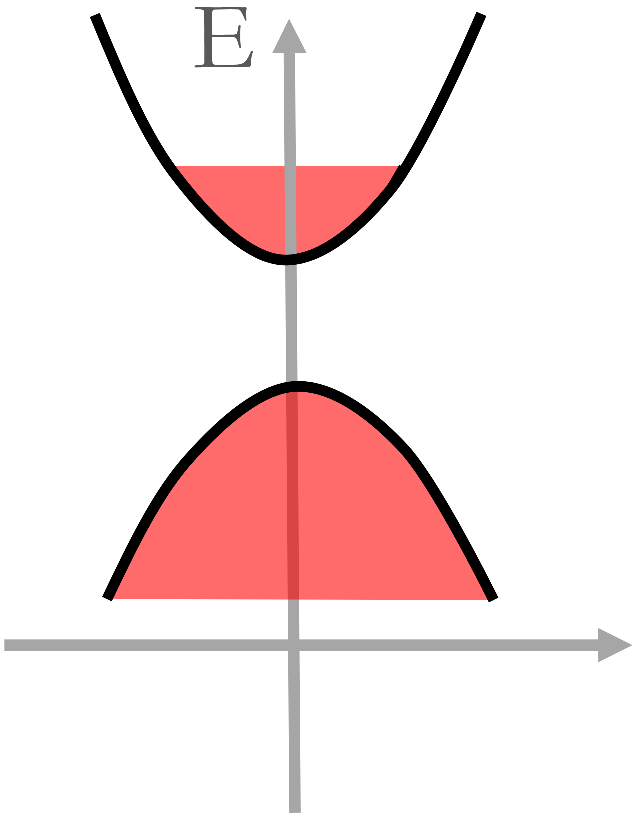




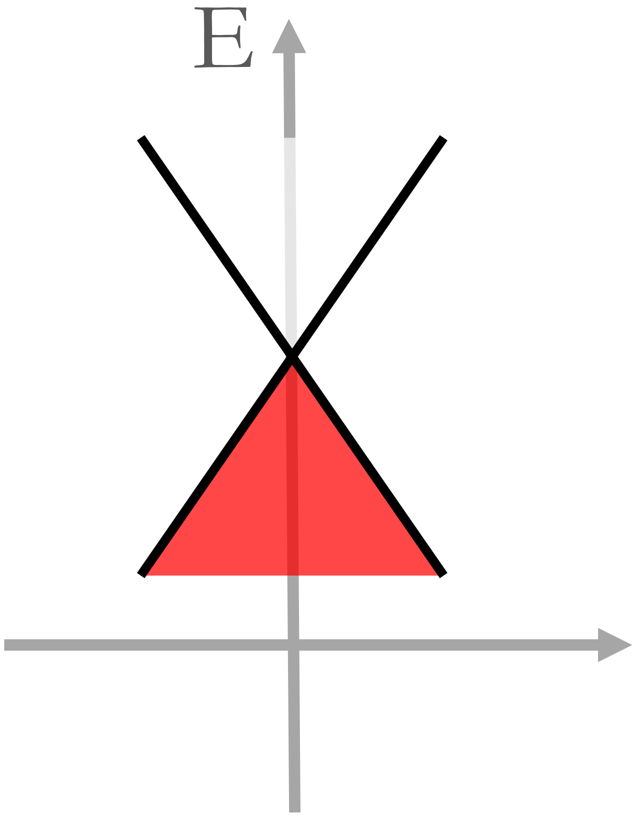
Propriétés électriques du graphène



isolant



métal



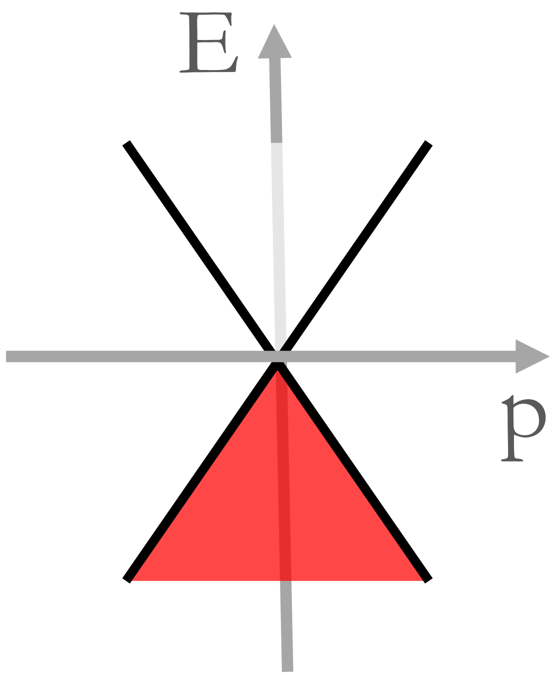
cônes de Dirac

Propriétés électriques du graphène

Cas pathologique :
pas de bande interdite, mais pas d'électrons au niveau de Fermi : ni métal ni isolant !

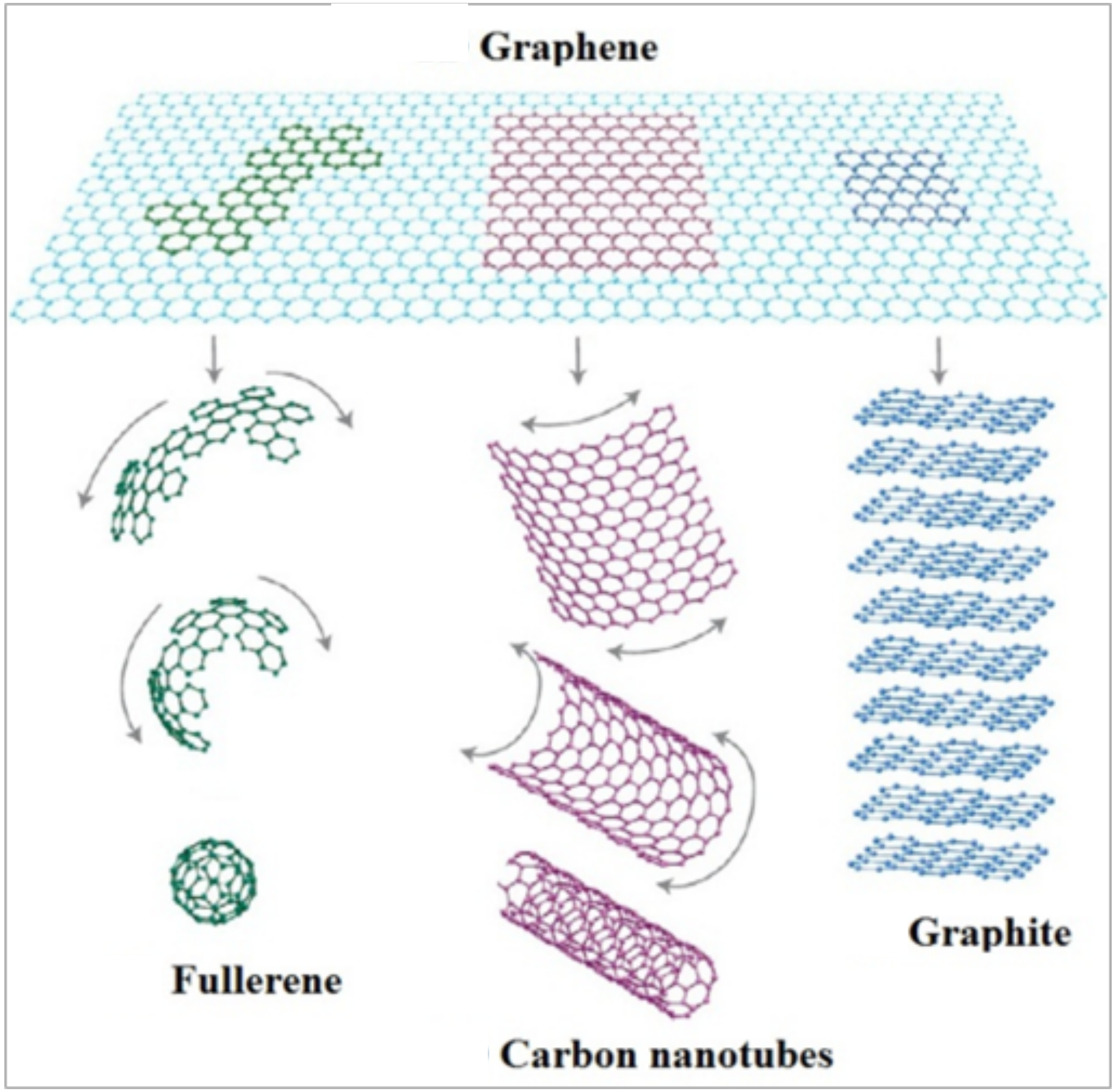
Energie linéaire avec p :
comme des électrons relativistes
sans masse $\varepsilon = \pm\sqrt{p^2 c^{*2} + m^{*2} c^{*4}} = \pm c^* p$

Nouvelle physique des cônes de Dirac :
nouveau transport des électrons,
nouveaux effets quantiques, ...



cônes de Dirac

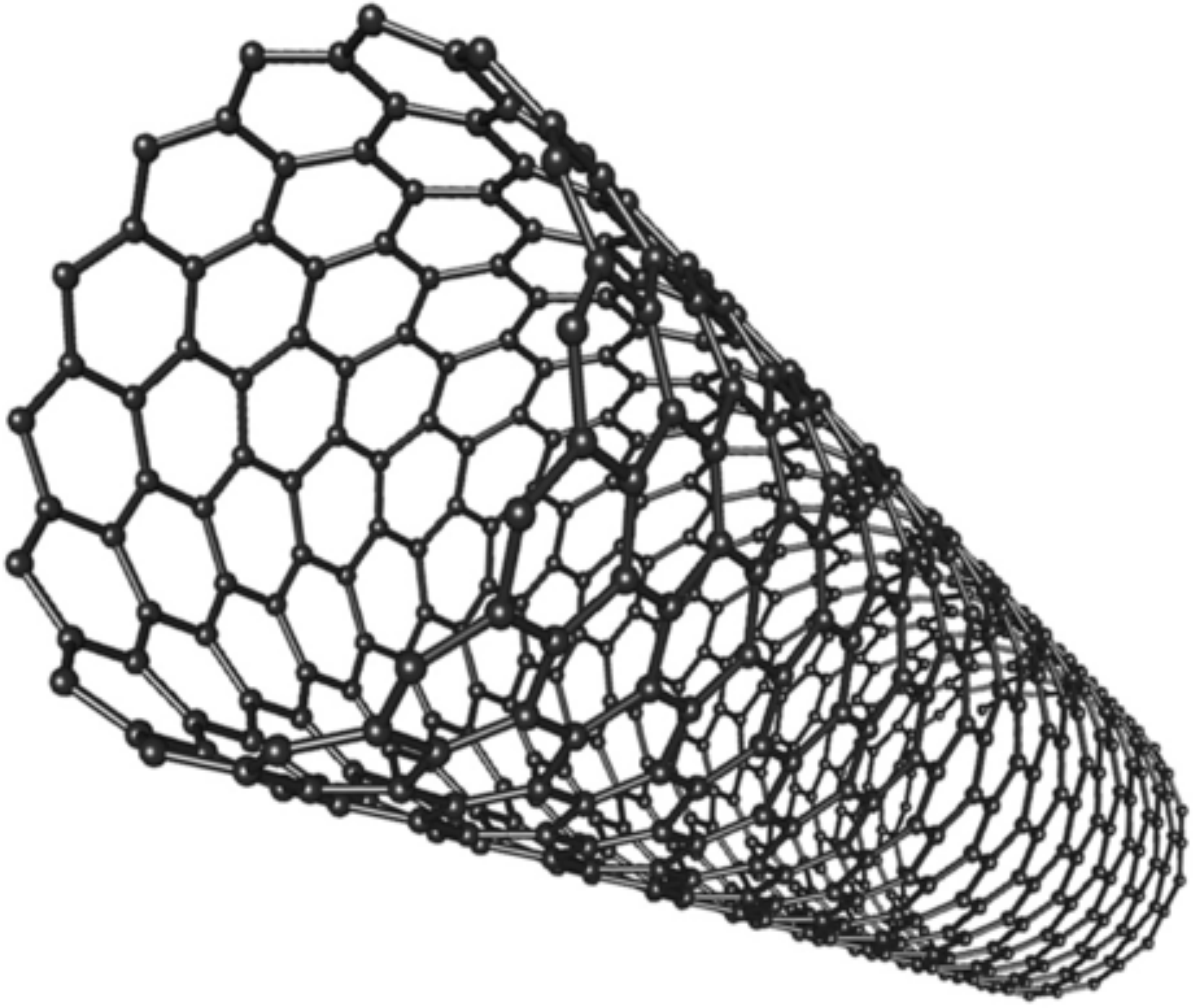
d’autres formes de nano-objets à partir du graphite :



une recherche récente :

peser un atome avec un nanotube

un nanotube de carbone :



nature nanotechnology

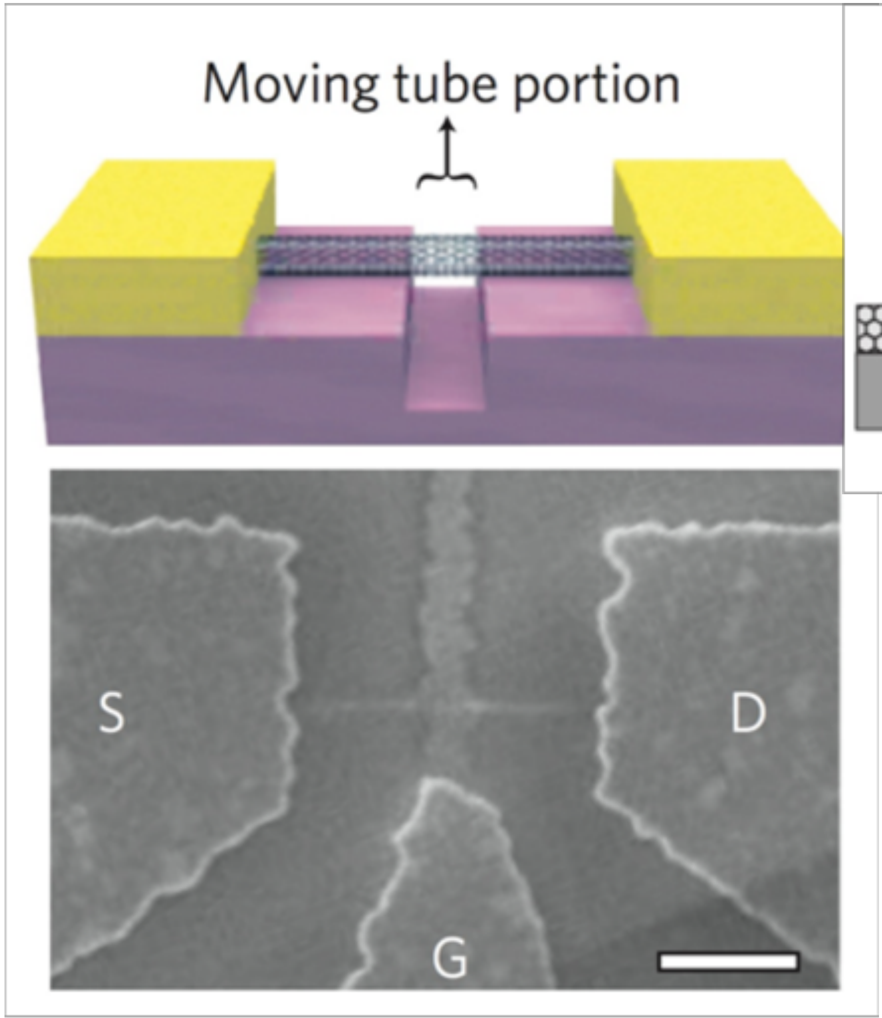
LETTERS

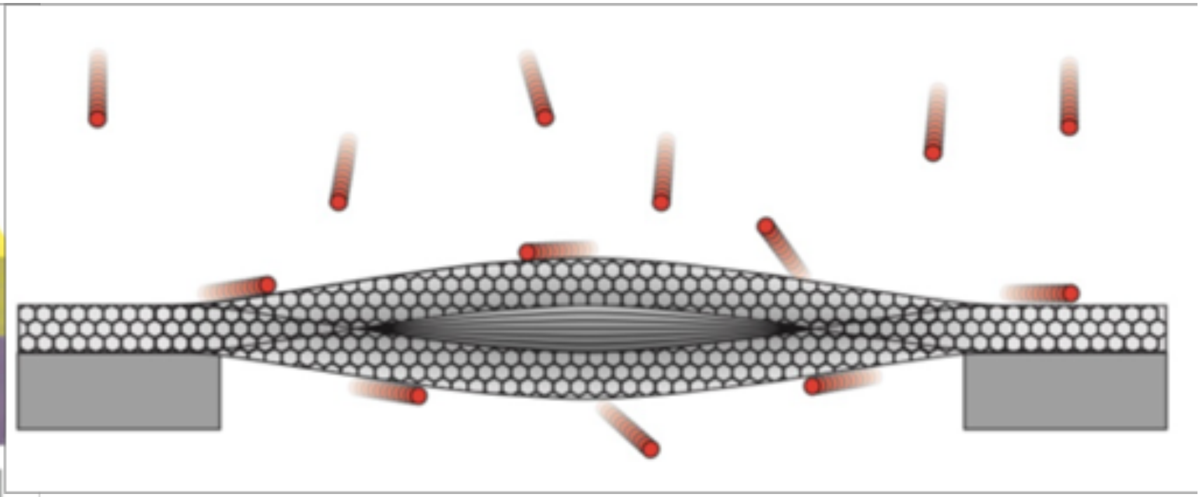
PUBLISHED ONLINE: 1 APRIL 2012 | DOI: 10.1038/NNANO.2012.42

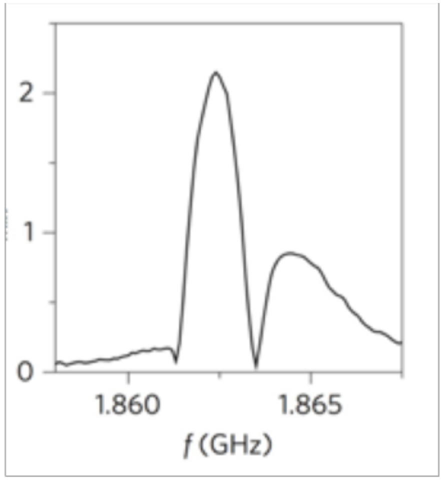
A nanomechanical mass sensor with yoctogram resolution

J. Chaste[1], A. Eichler[1], J. Moser[1], G. Ceballos[1], R. Rurali[2] and A. Bachtold[1]*

ARTICLE







resonance mécanique

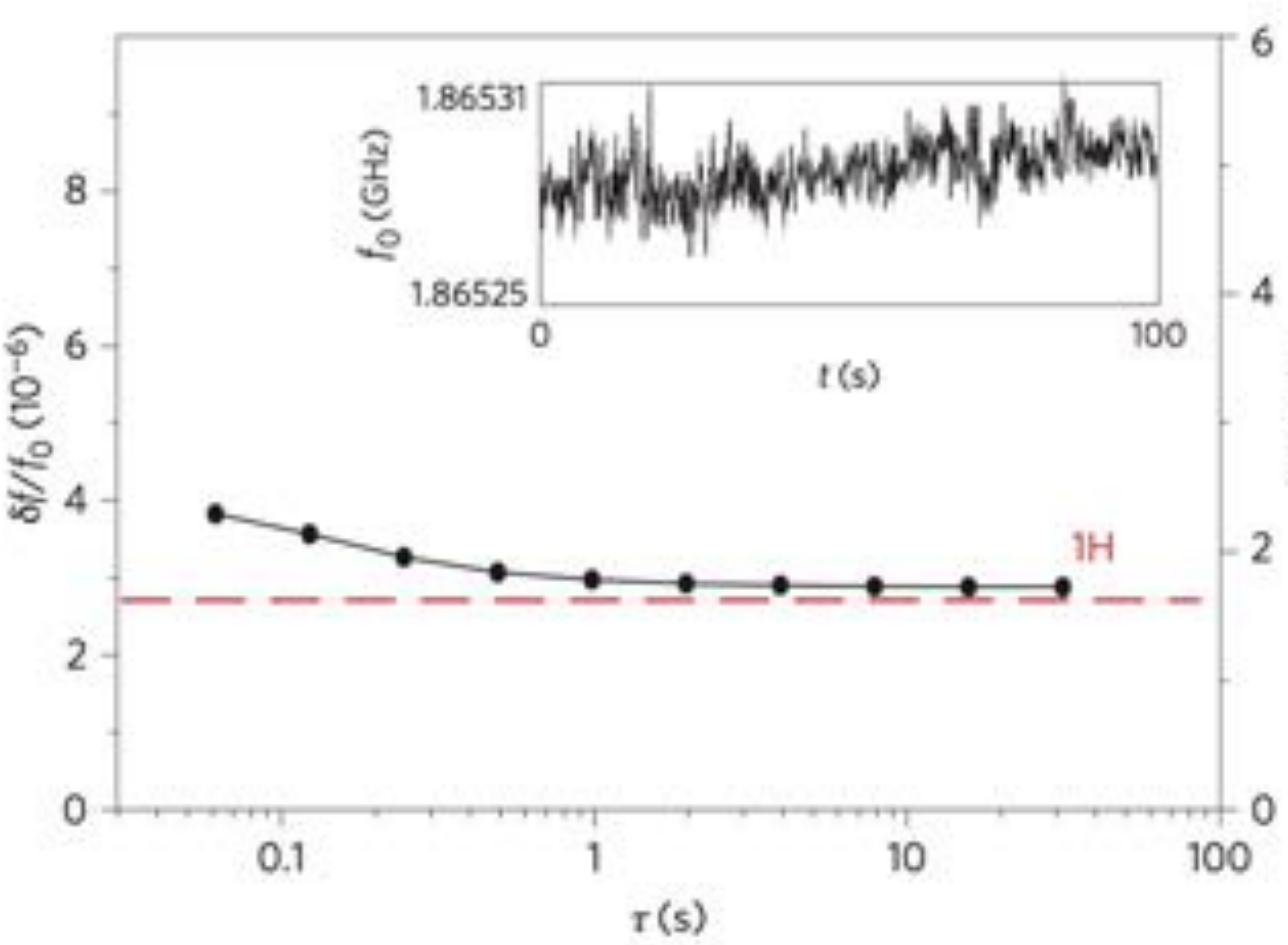
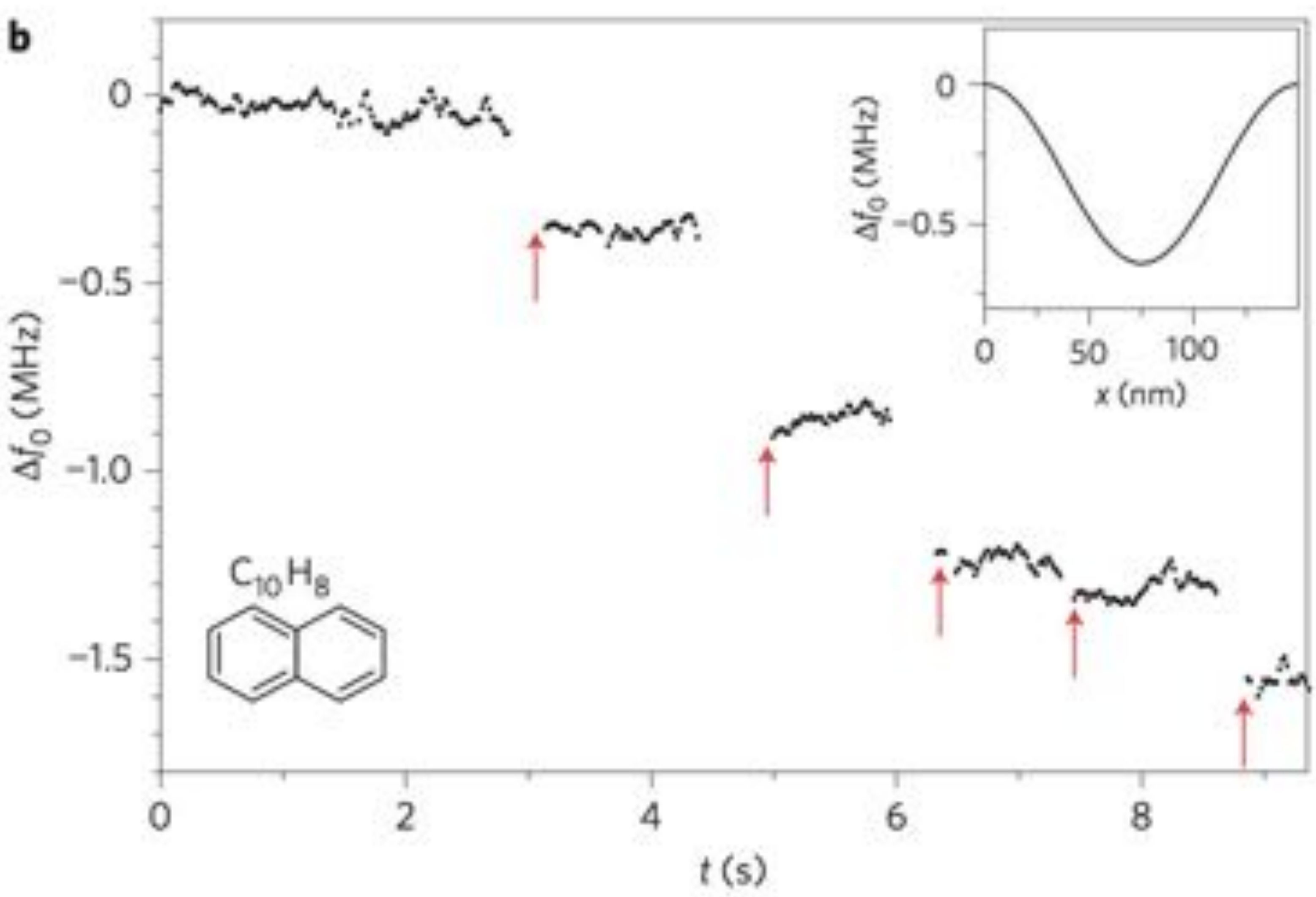


Figure 2 | Measuring mass resolution. Standard error of the resonance frequency (left axis) and corresponding mass resolution (right axis) as a function of averaging time at 5.5 K. The red dashed line corresponds to the

1 yg=10^{-24}g
(masse d'un proton)

avec le nanotube, on peut mesurer un proton = 1 yoktogramme = 10^{-21} g

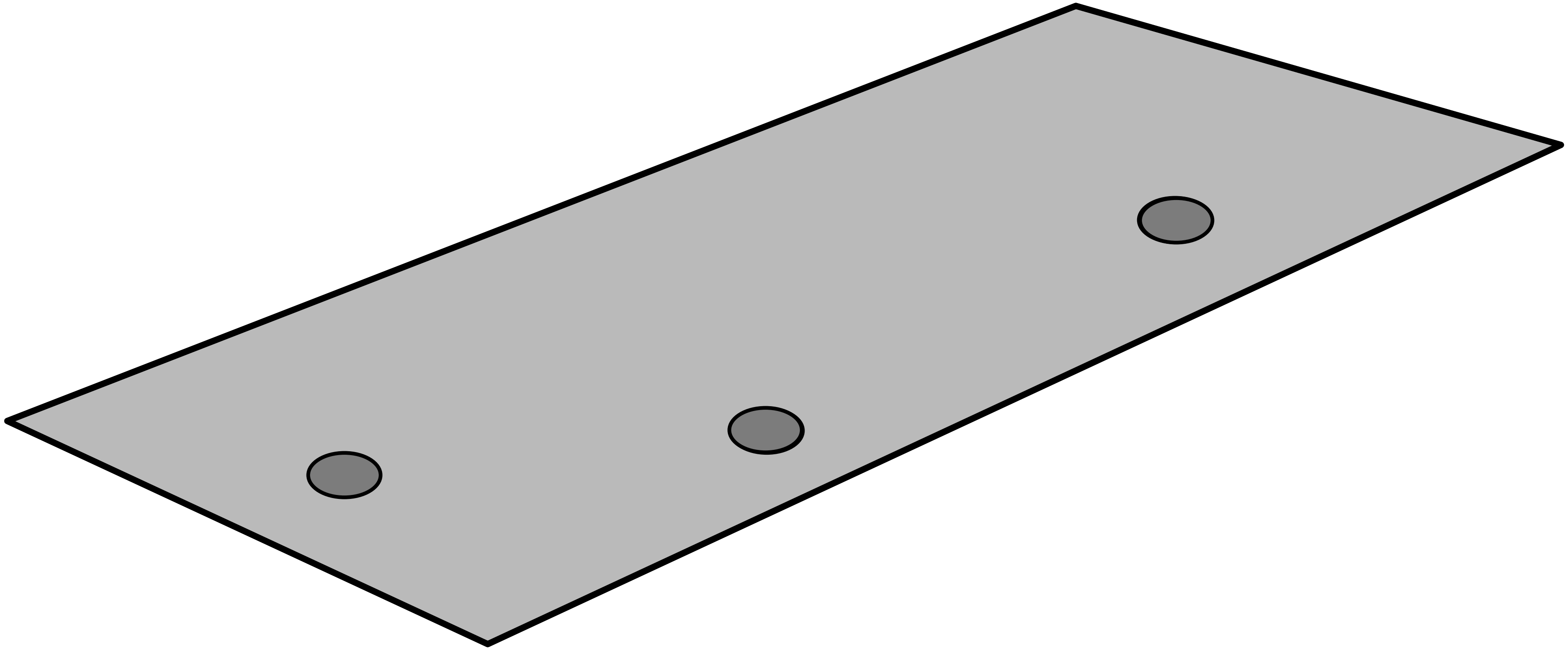


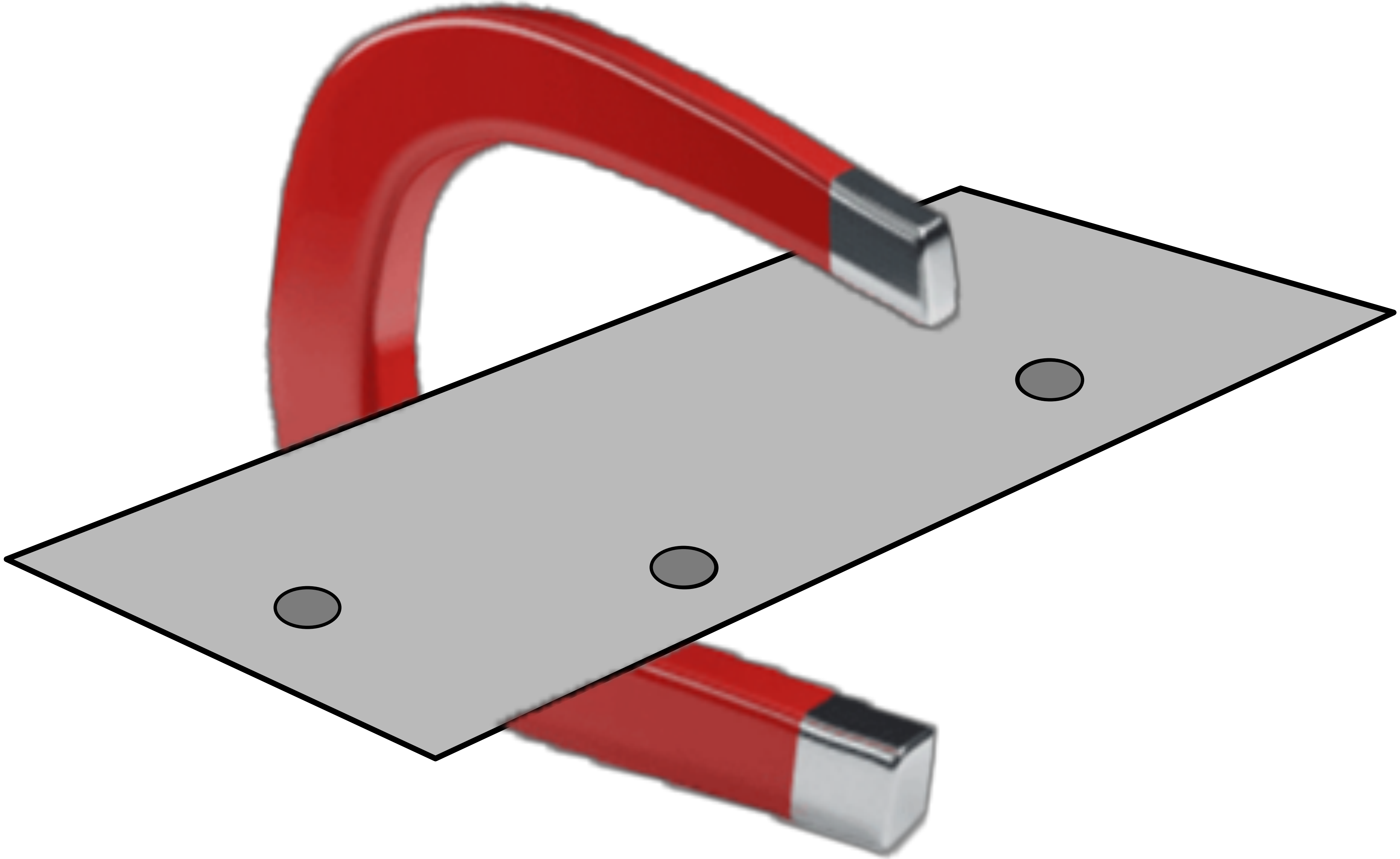
mesure à T=4.3K de l'absorption par le nanotube au cours du temps de molécules $C_{10}H_8$

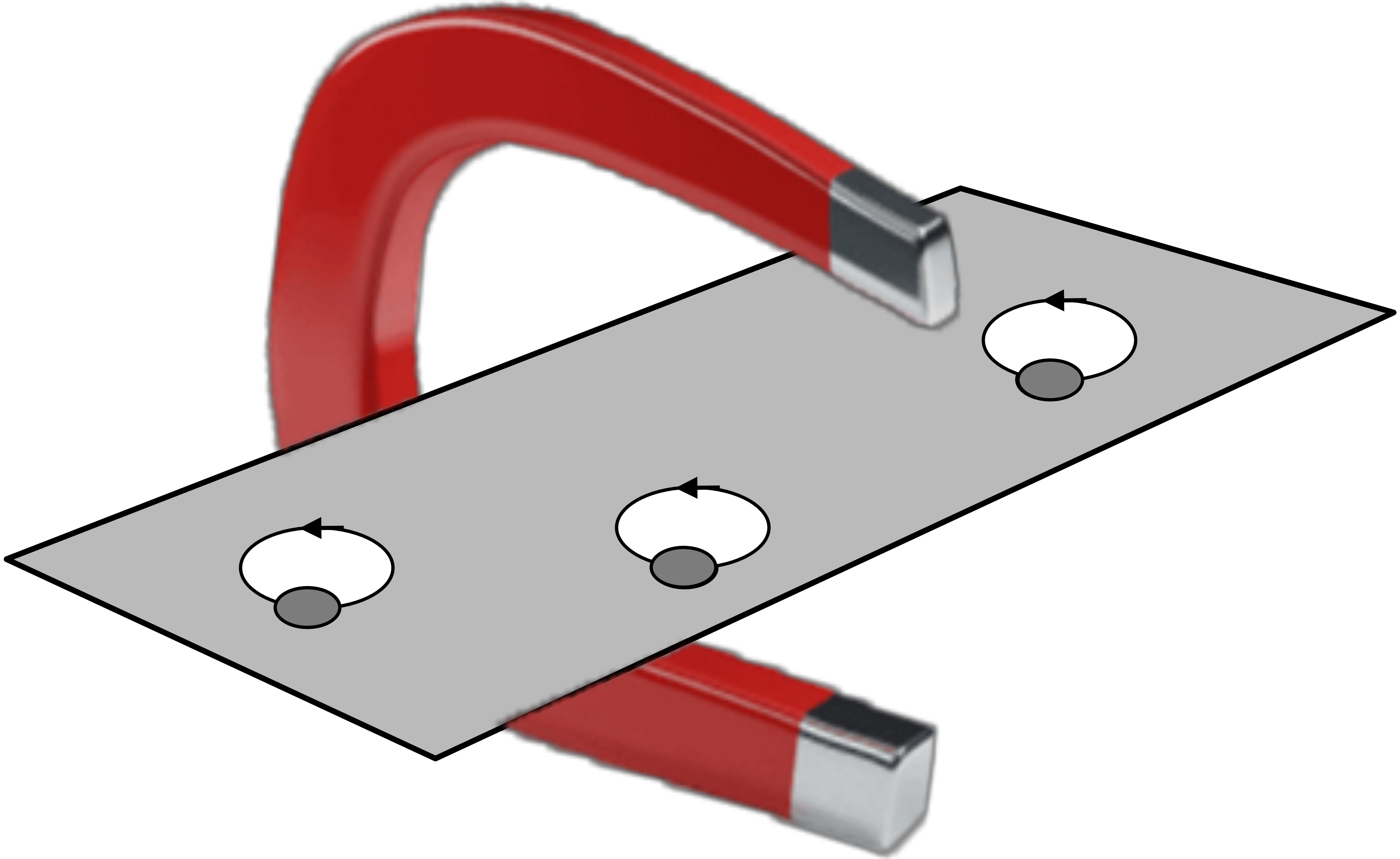
interêt : mesurer sans ioniser

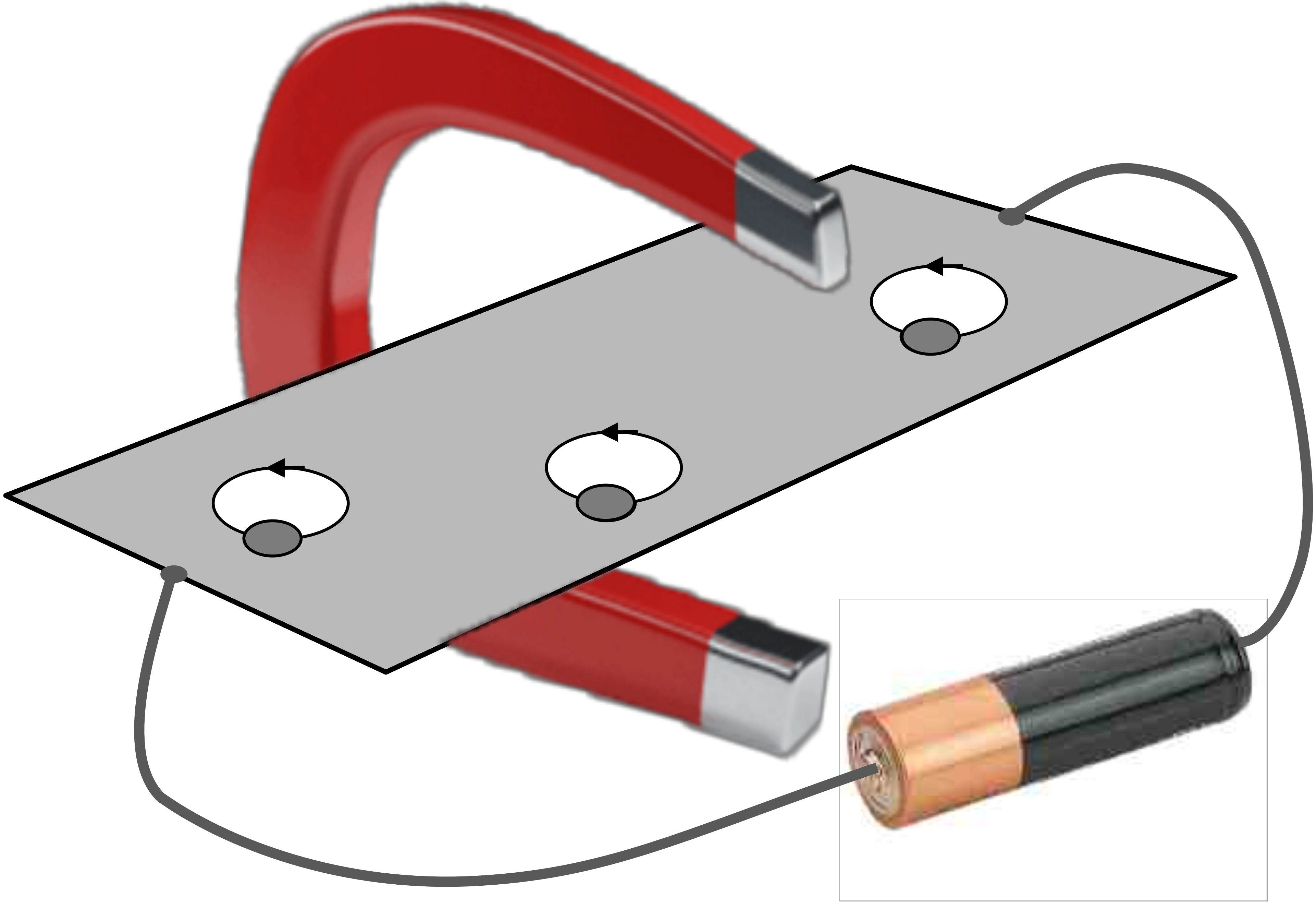
Chaste et al. 2012

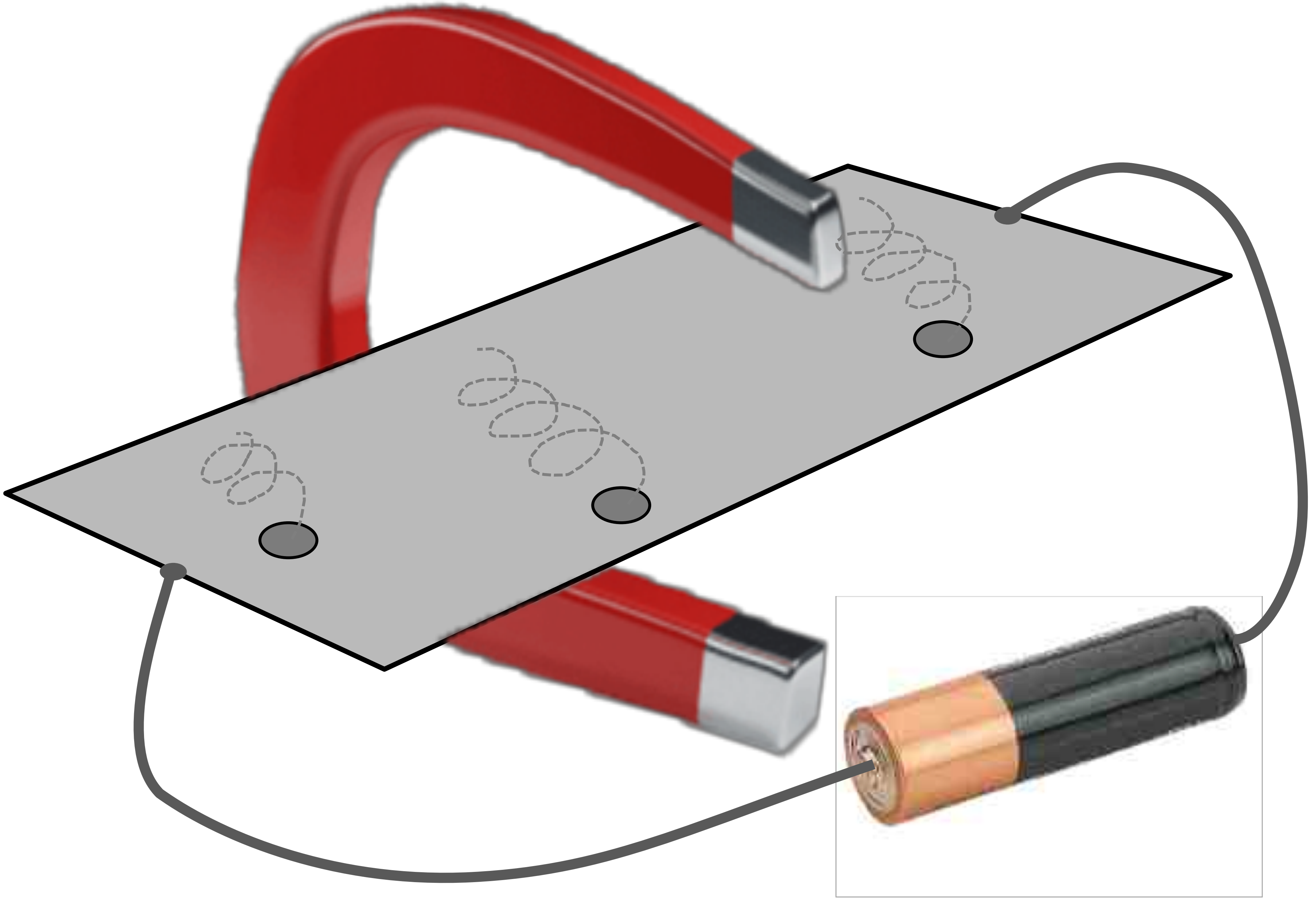
en bonus :
l’effet Hall quantique
et la topologie

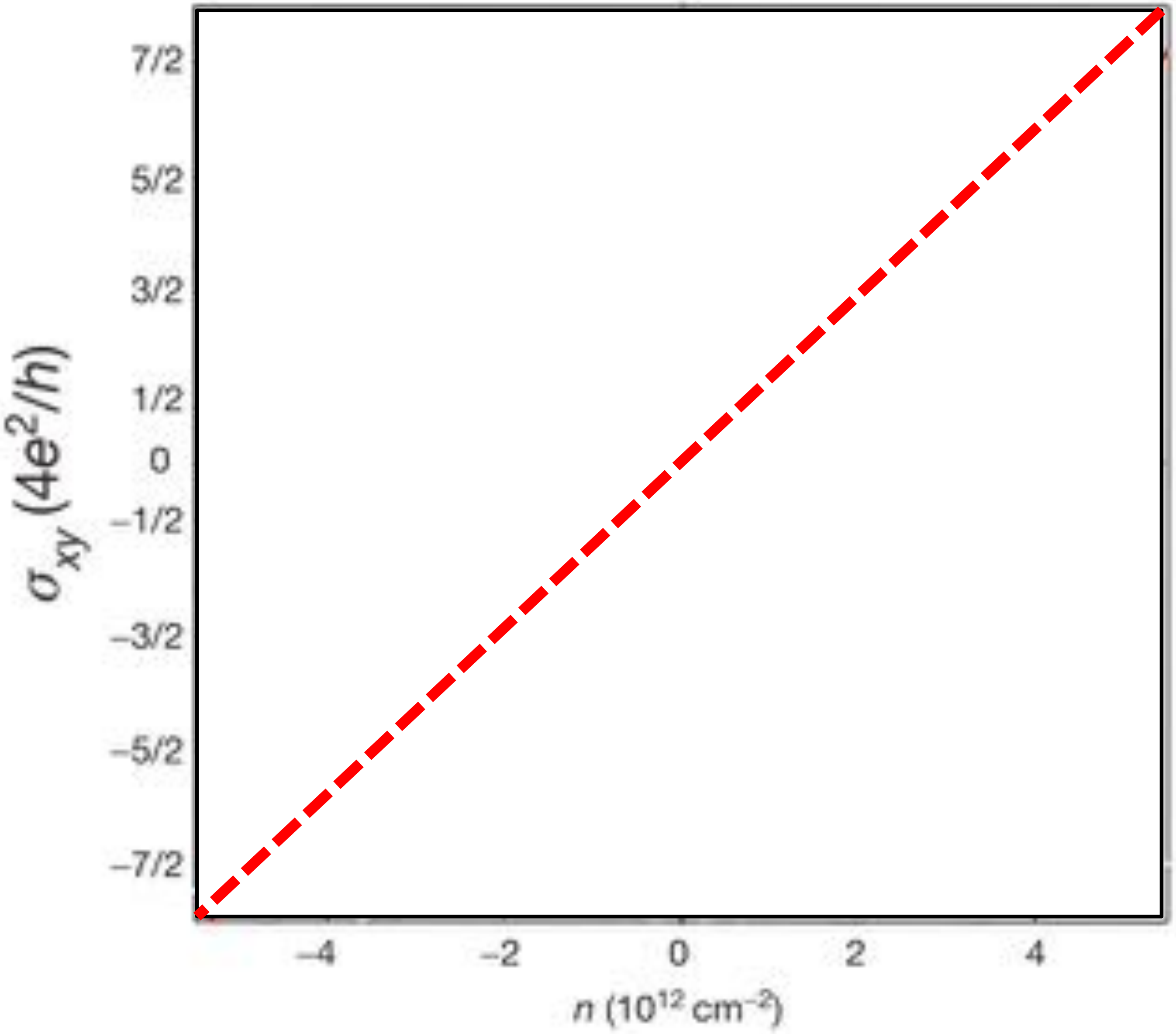


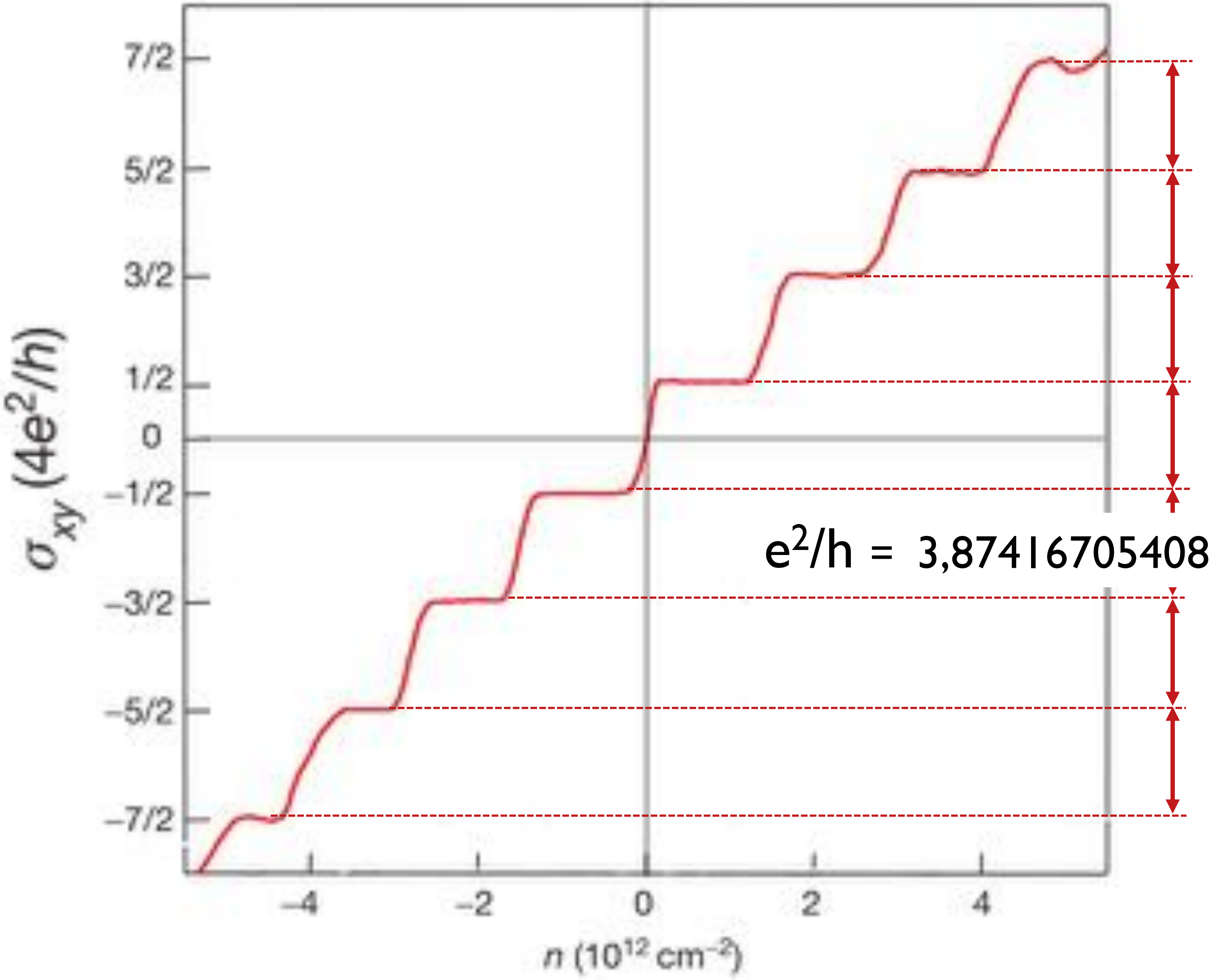






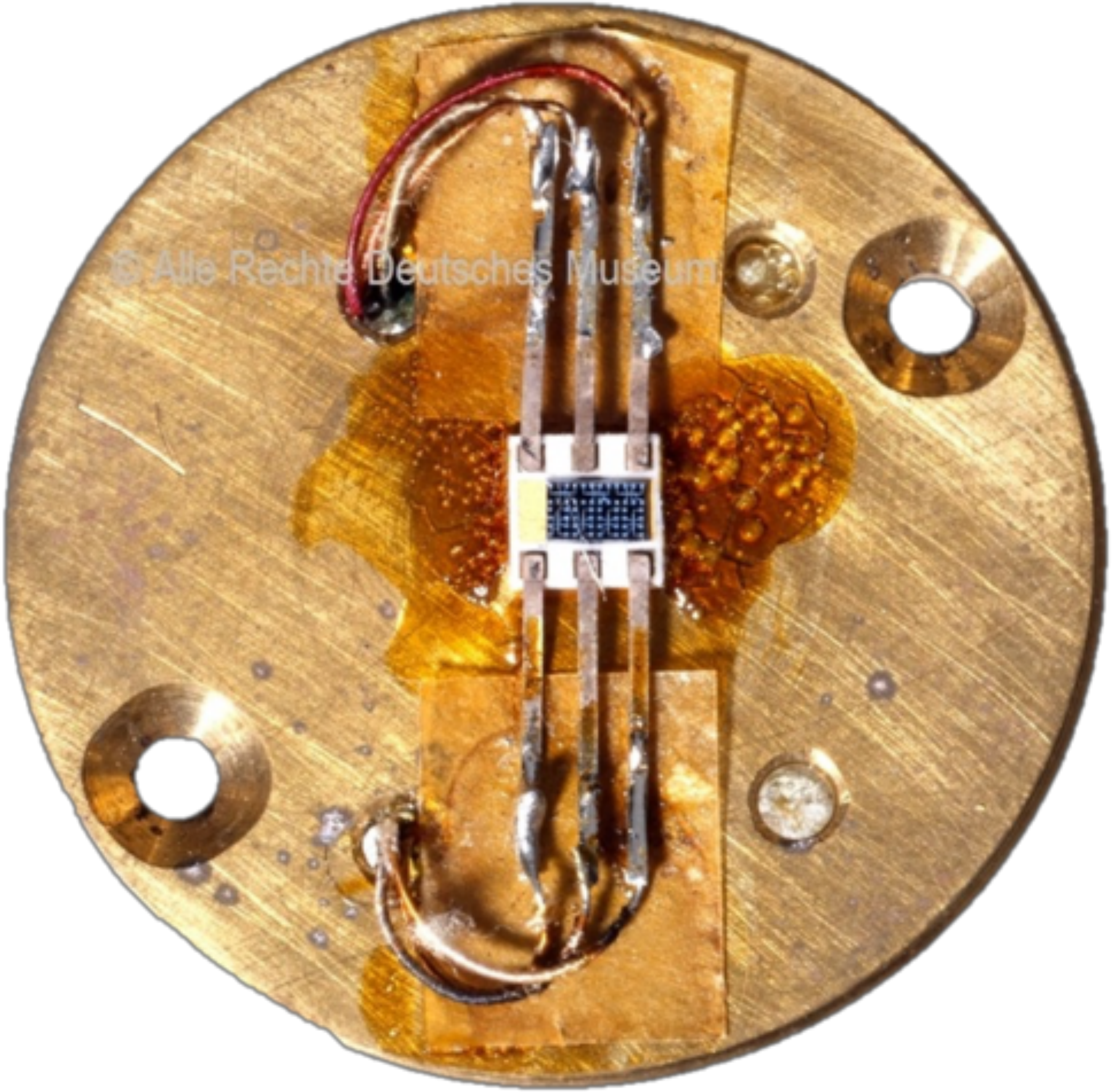



7/2
5/2
3/2
1/2
0
−1/2
−3/2
−5/2
−7/2
σ_{xy} ($4e^2/h$)
−4
−2
0
2
4
n (10^{12} cm^{-2})

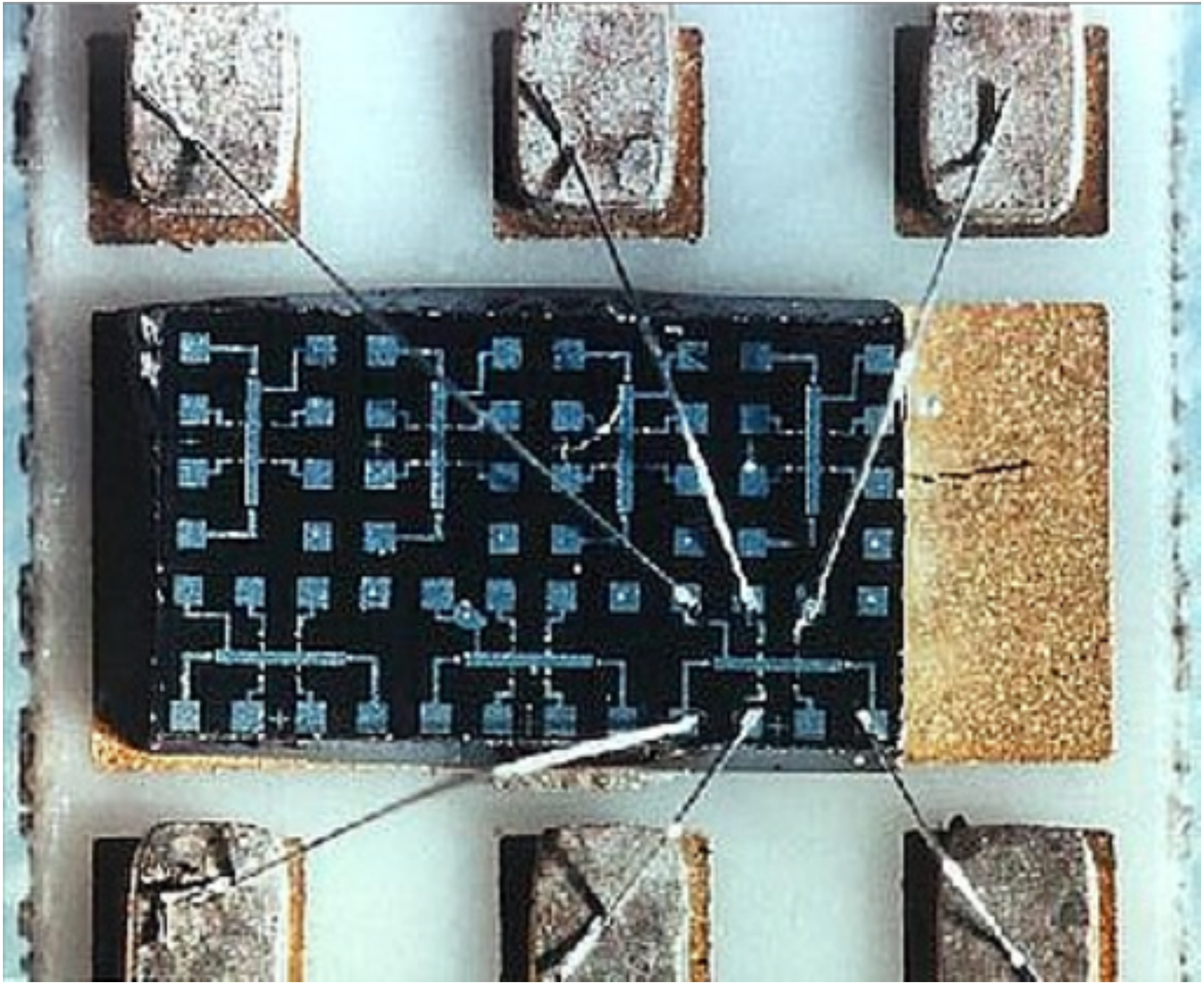


$e^2/h = 3{,}87416705408\ 10^{-5}$ S

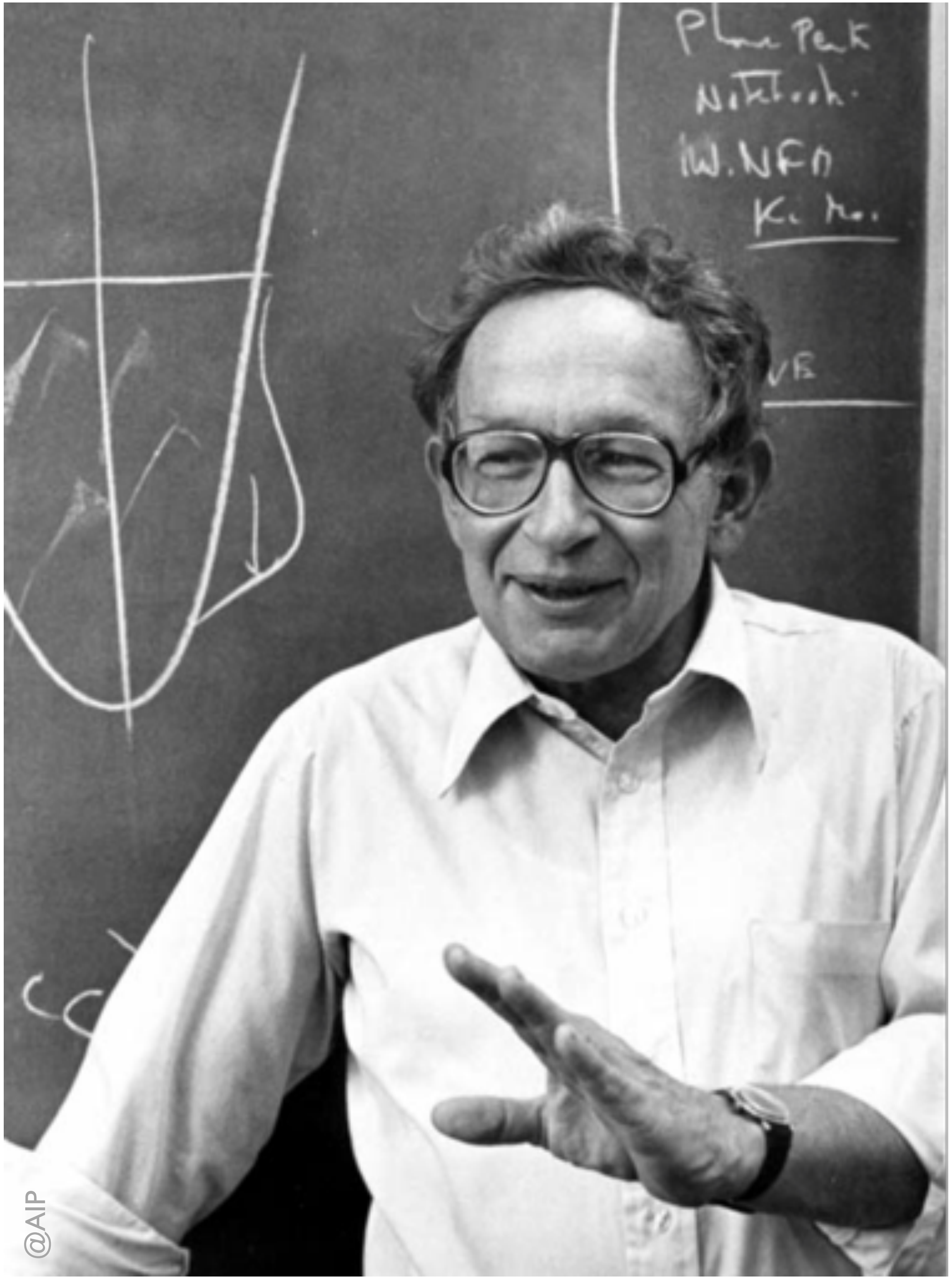
Novoselov et al., Nature 2005



© Alle Rechte Deutsches Museum



@Deutshes Museum

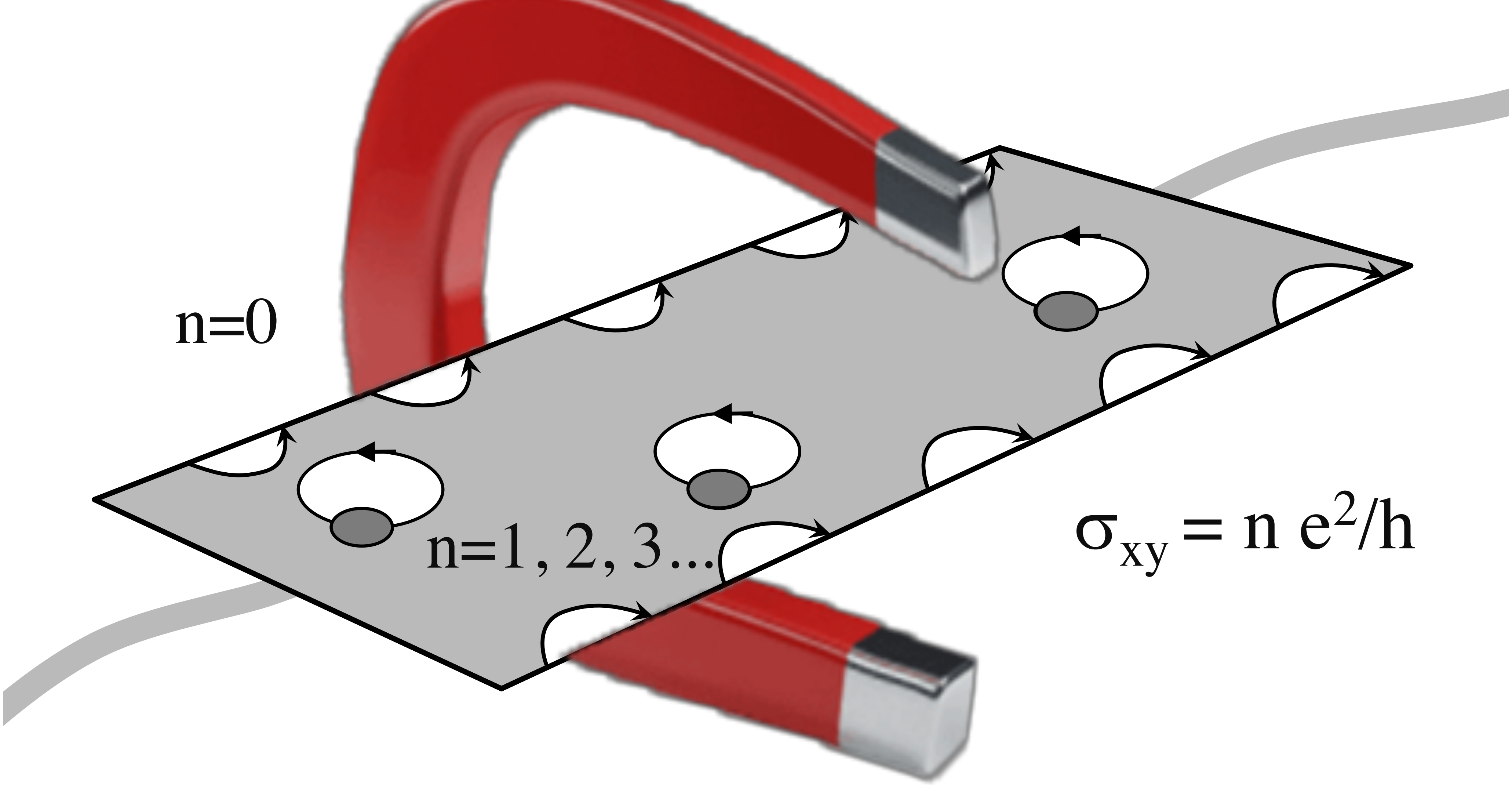


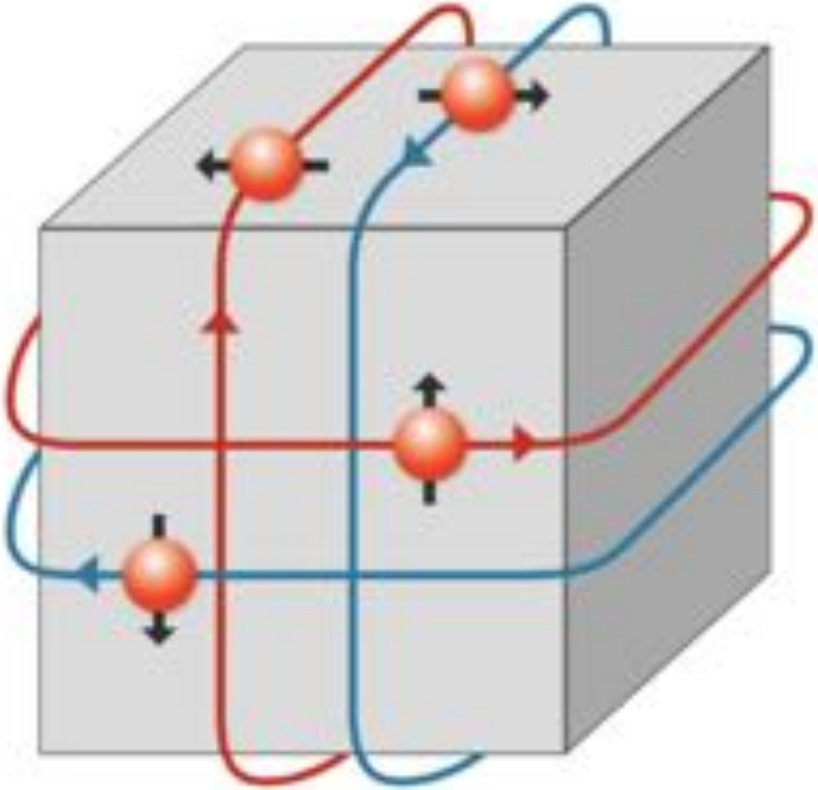
@AIP

@Reuters

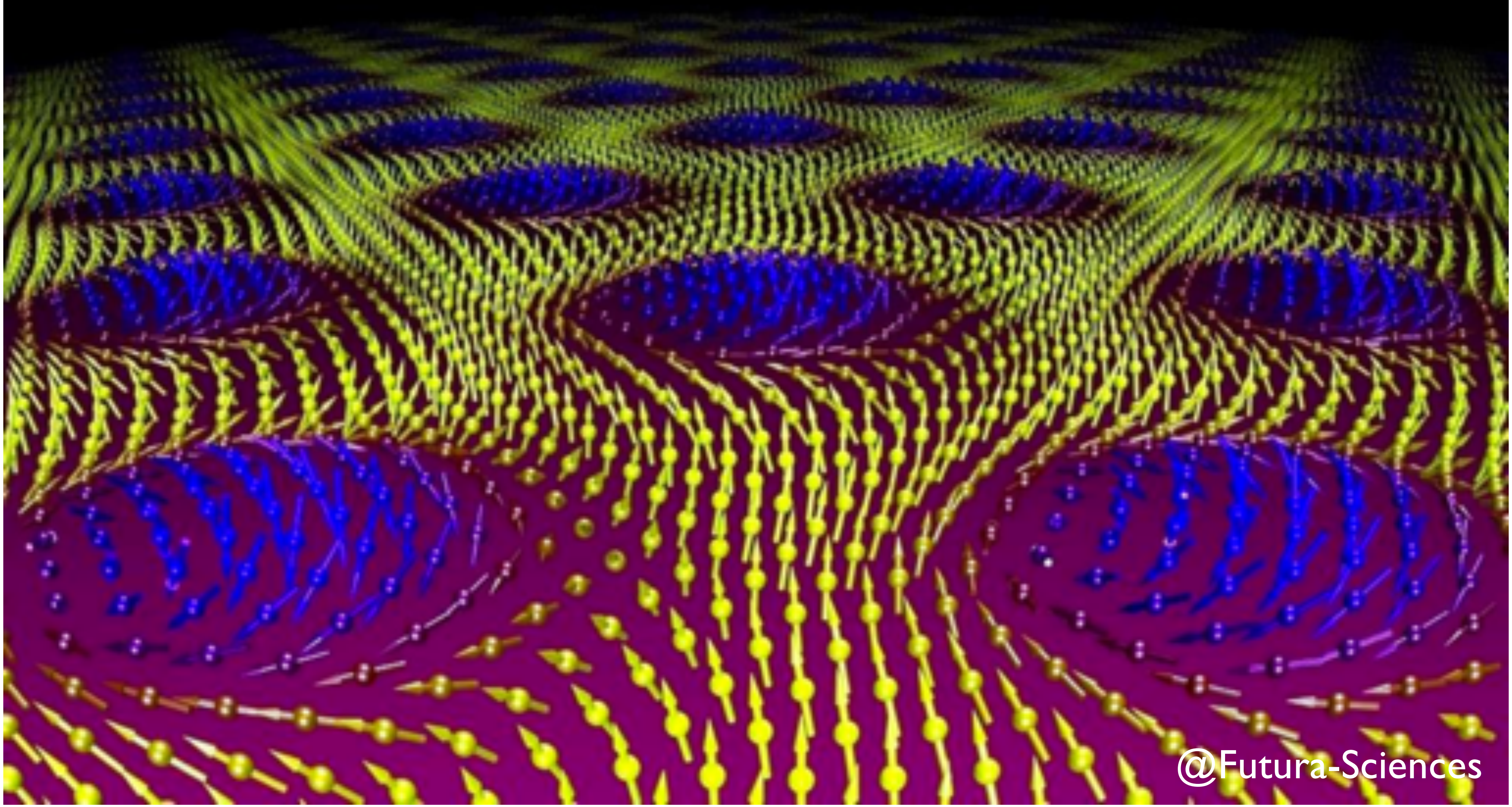
@M.Levin

$$\sum_{\epsilon_\mu(\mathbf{k})<} \frac{i}{2\pi} \int_{\mathbf{k}\in \mathrm{BZ}} d^2\mathbf{k} \langle \nabla_{\mathbf{k}} u_\mu(\mathbf{k})| \times |\nabla_{\mathbf{k}} u_\mu(\mathbf{k})\rangle \cdot \hat{z} = \text{entier n}$$





les skyrmions



@Futura-Sciences

pour conclure

Utilisation principale des nanofabrications:

des composants pour l’électronique

d’autres utilisations :

- pour des petits capteurs
- pour des médicaments
- pour mieux comprendre la physique
- pour contrôler la chimie
- …

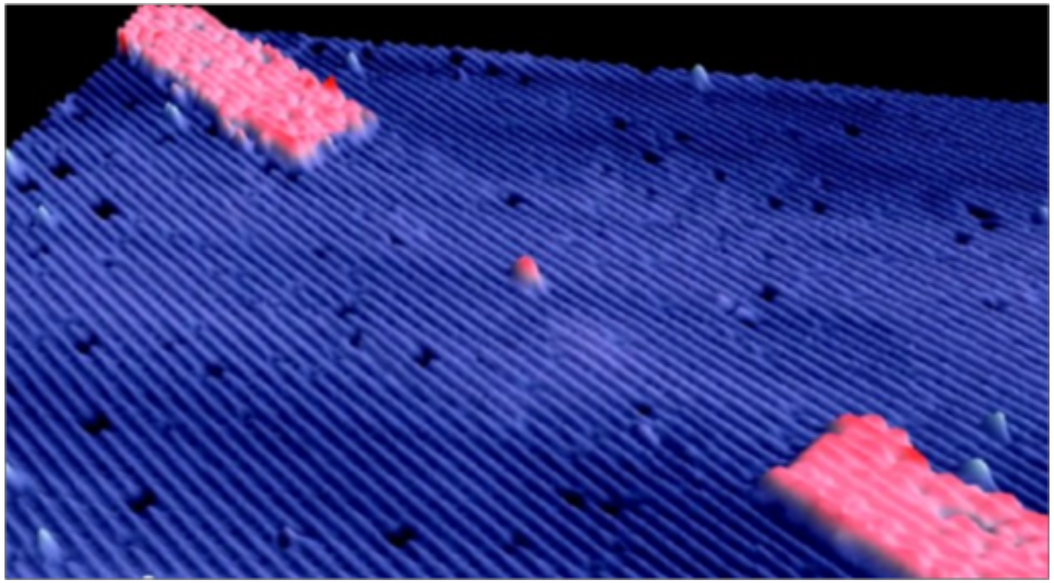
quelques enjeux de société :

- la fabrication nano : un enjeu industriel

  (1 usine de microprocesseurs = qq milliards d'€)
- les matières premières : un enjeu géopolotique
- la recherche fondamentale et le lien avec les applications
- des composants pour l'environnement
- quelle toxicité ?

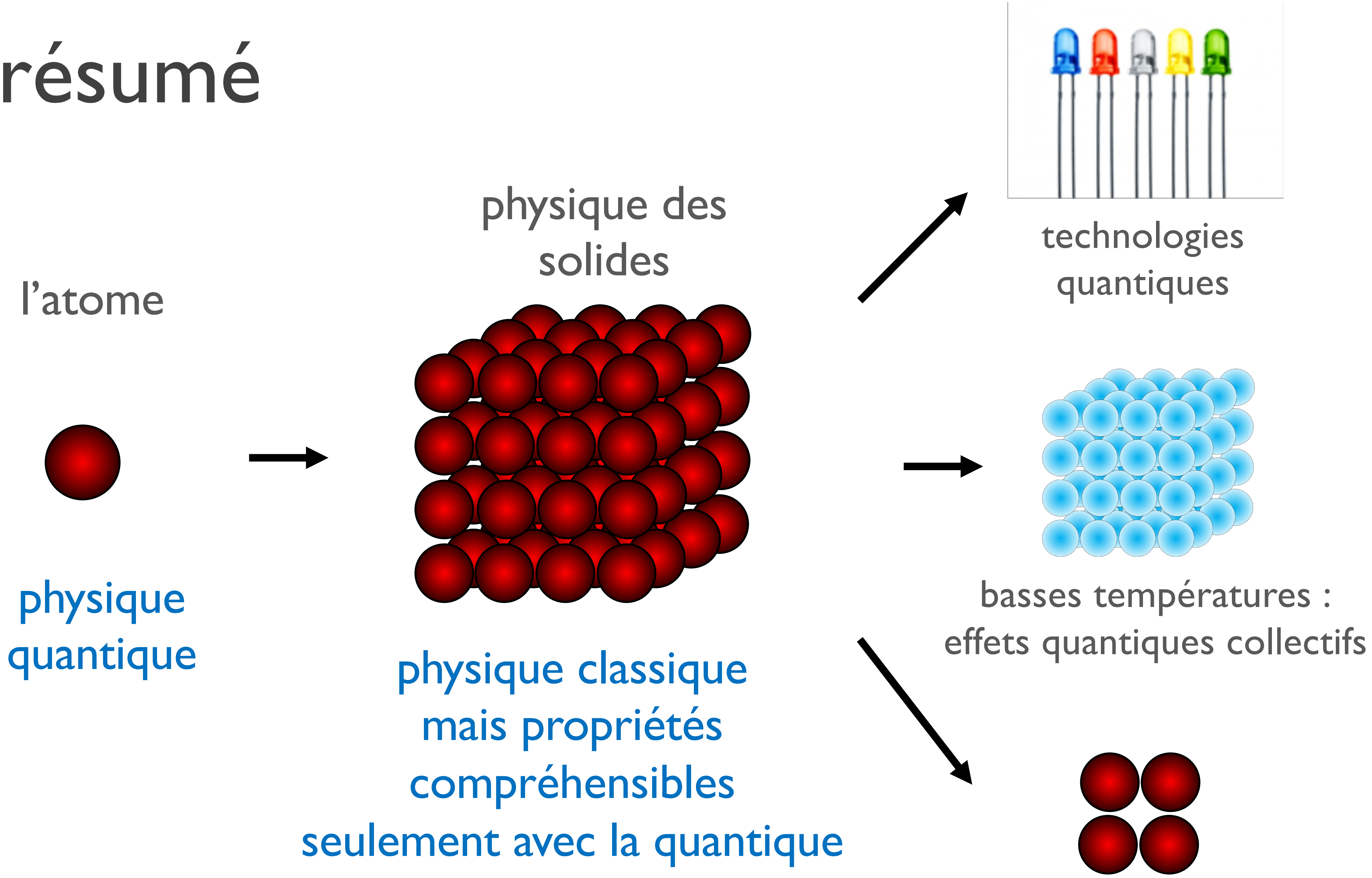
quel futur ?

- miniaturiser encore plus en électronique
- construire sur mesure le macro depuis le nano
- créer de nouvelles matières
- fabriquer des ordinateurs quantiques
- l’intelligence artificielle



transistor à un seul atome

résumé



l’atome

physique
quantique

physique des
solides

physique classique
mais propriétés
compréhensibles
seulement avec la quantique

technologies
quantiques

basses températures :
effets quantiques collectifs

nanophysique :
retour à la quantique