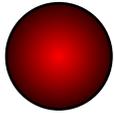


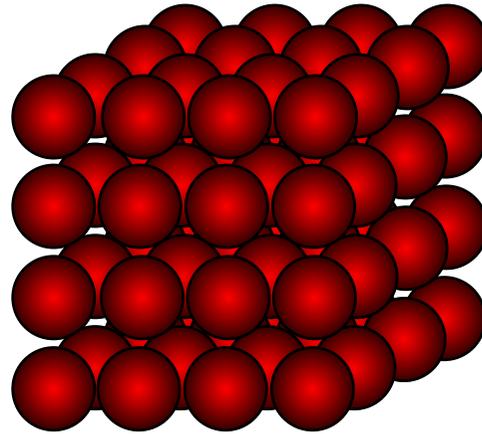
l'atome



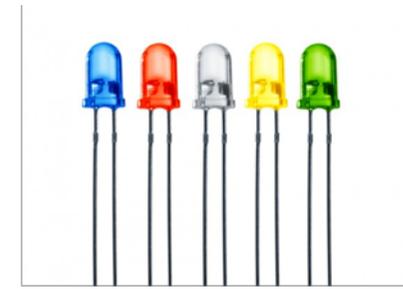
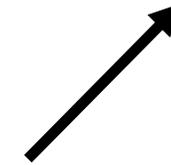
physique  
quantique



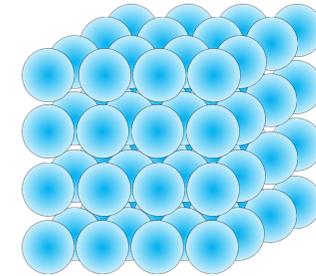
physique des  
solides



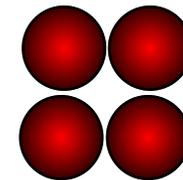
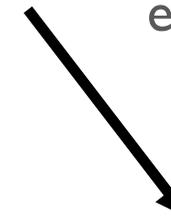
physique classique  
mais propriétés  
compréhensibles  
seulement avec la quantique



technologies  
quantiques



basses températures :  
effets quantiques collectifs



nanophysique :  
retour à la quantique

# Découvertes Récentes en physique

## observer à l'échelle du nanomètre: les nouvelles microscopies

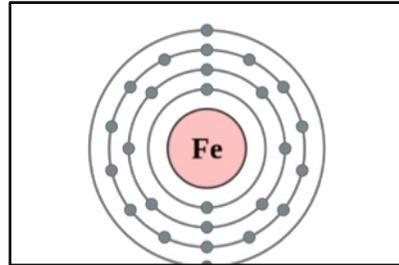
J. Bobroff, Univ. Paris-Sud

Quizz

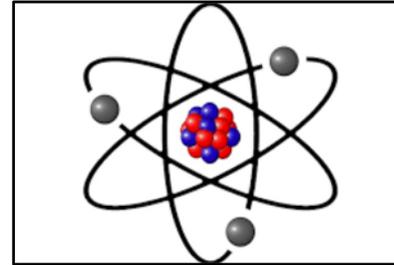
classer du plus petit au plus grand...



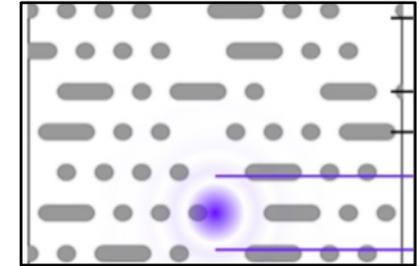
transistor



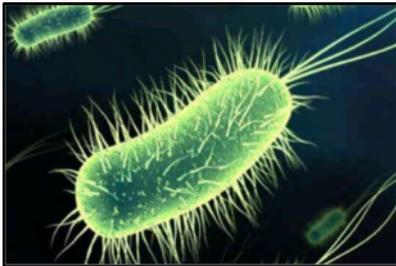
électron



atome



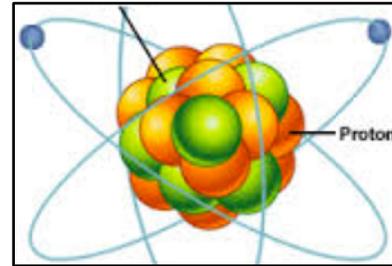
un élément de gravure d'un DVD bluray



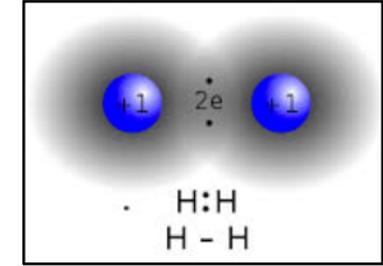
bactérie



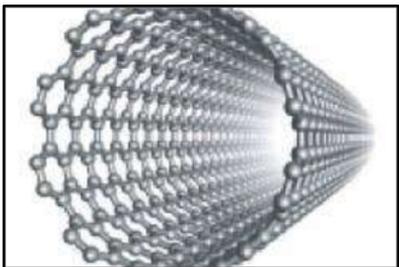
diamètre de l'ADN



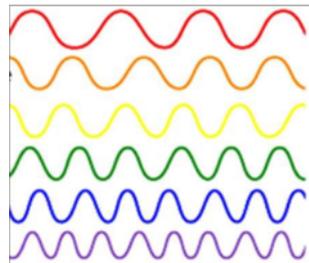
proton



distance entre 2 atomes dans la matière



diamètre d'un nanotube



longueur d'onde de la lumière visible

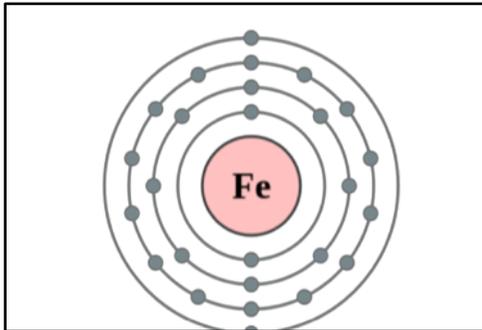


1 molécule d'eau

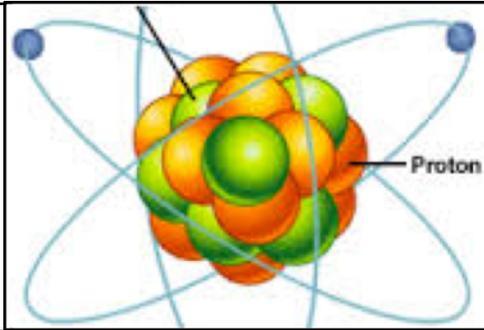


épaisseur d'un cheveu

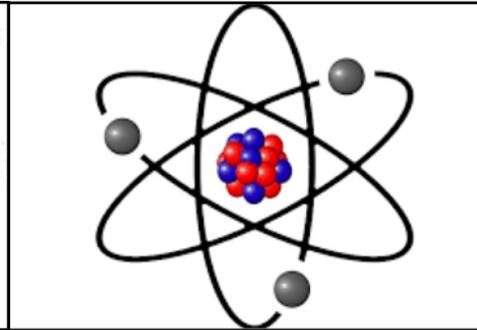
# résultat



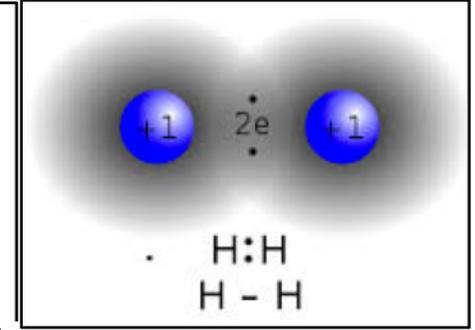
1 électron : ponctuel



1 proton  $10^{-15}\text{m}$   
= 1 milliardième de nm



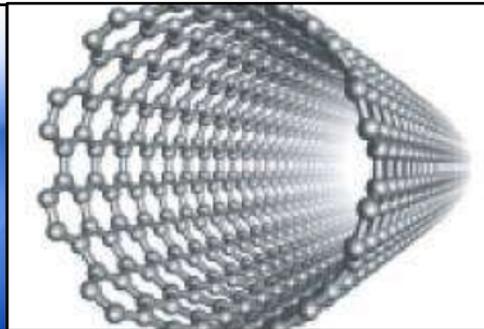
1 atome 0,1-0,3 nm



distance entre 2 atomes  
dans la matière 0,2 nm



1 molécule d'eau  
0.3 nm



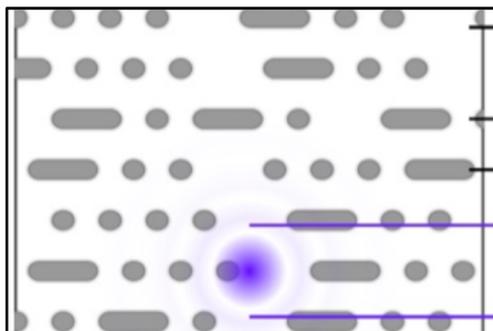
diamètre d'un  
nanotube 1 nm



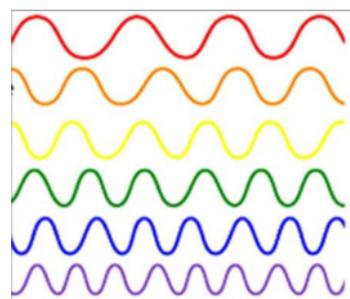
diamètre de l'ADN  
2nm



transistor  
10 à 20nm



taille gravure DVD  
bluray 150 nm



longueur d'onde  
lumière visible  
400-700 nm



bactérie  $1\mu\text{m}=1000\text{ nm}$

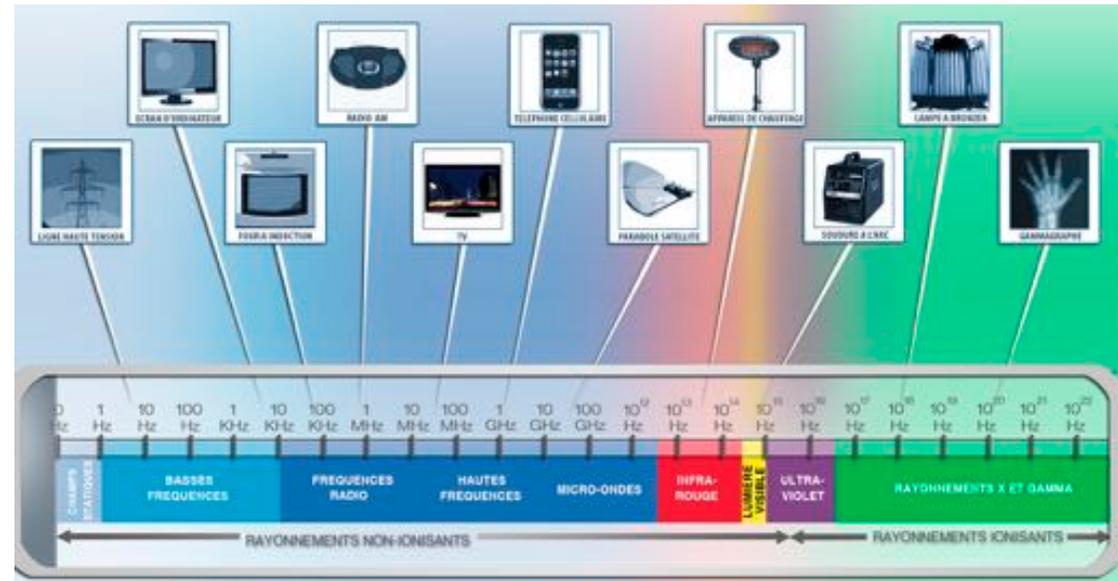


épaisseur d'un cheveu  
 $50\mu\text{m}=50\,000\text{ nm}$

quand a-t-on besoin  
d'un microscope ?

# Les limites de l'oeil humain

- taille limite : 50 à 100  $\mu\text{m}$  (l'épaisseur d'un cheveu)
- couleurs limites :  
longueur d'onde : 400 à 700 nm (l'arc en ciel)  
(on ne voit pas les ondes radio, les microondes, les infrarouges, les ultra-violets, les gamma, les RX...)

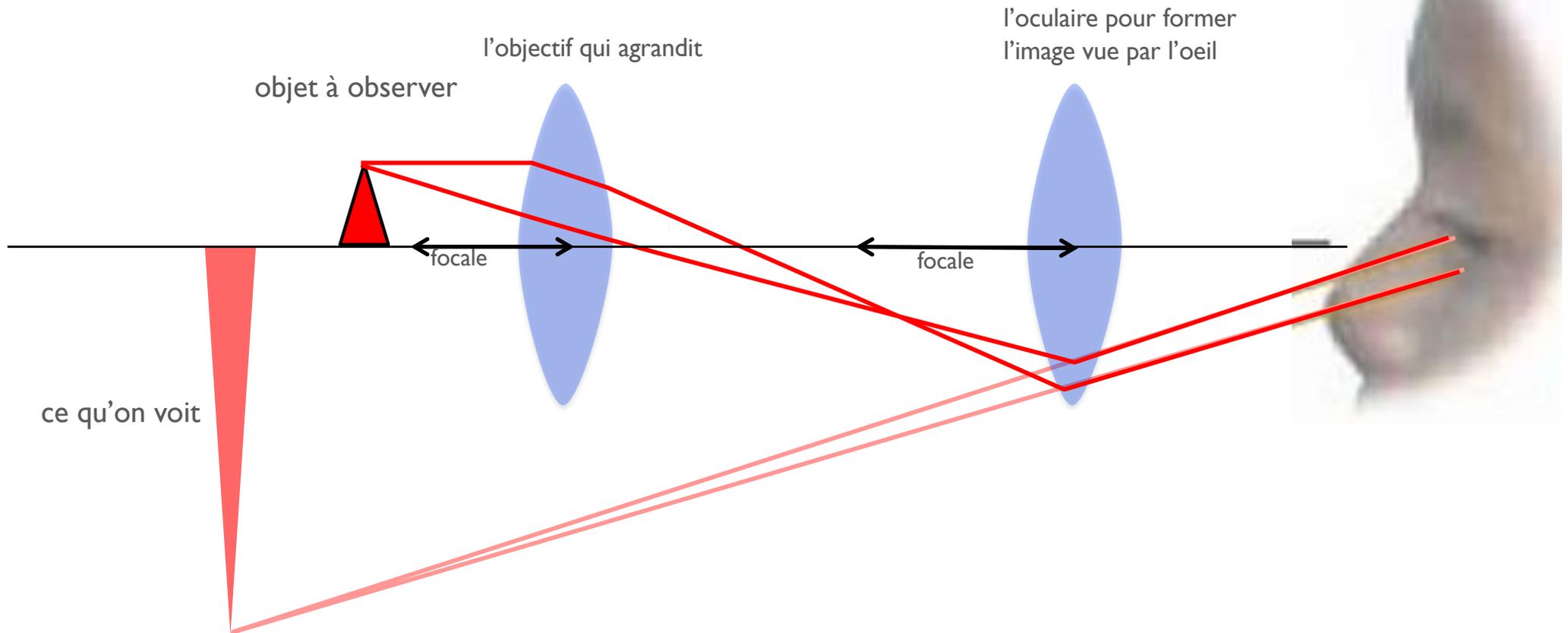


- résolution temporelle :  
de l'ordre de 20 msec (50 images par seconde)

# les premiers microscopes



Janssen, 1590





Janssen, 1590



Galilée, 1609



une puce  
Robert Hooke, Micrographia, 1655

Schem 2

*1/2 yellow Aug: or of an inch*

Fig: 1.<sup>a</sup>

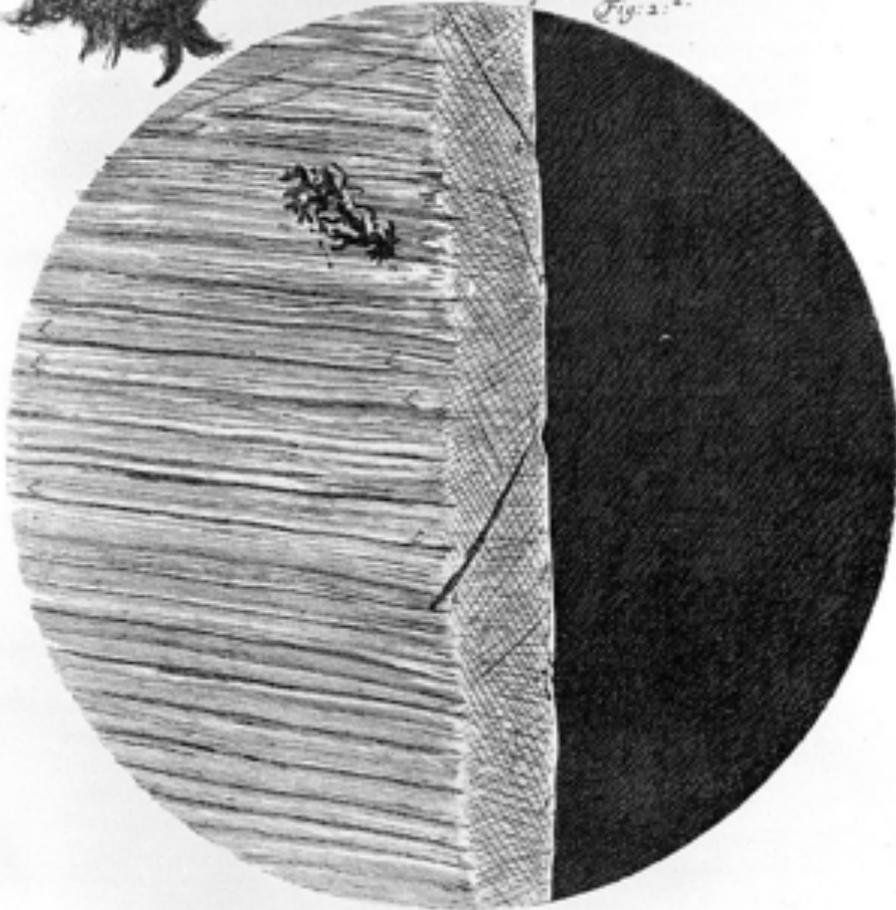


point imprimé



*1/2 poll: Aug: or of an inch*

Fig: 2.<sup>a</sup>



pointe d'une aiguille

lame de rasoir

Robert Hooke, Micrographia, 1655

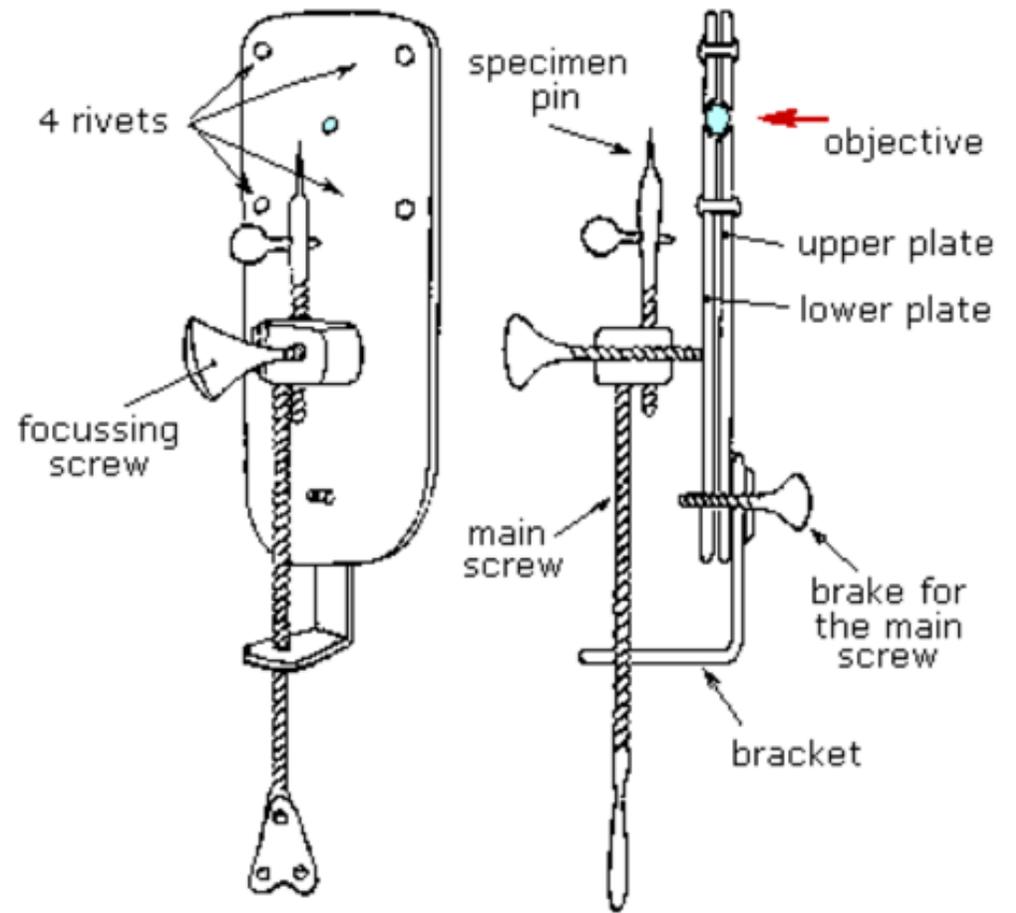
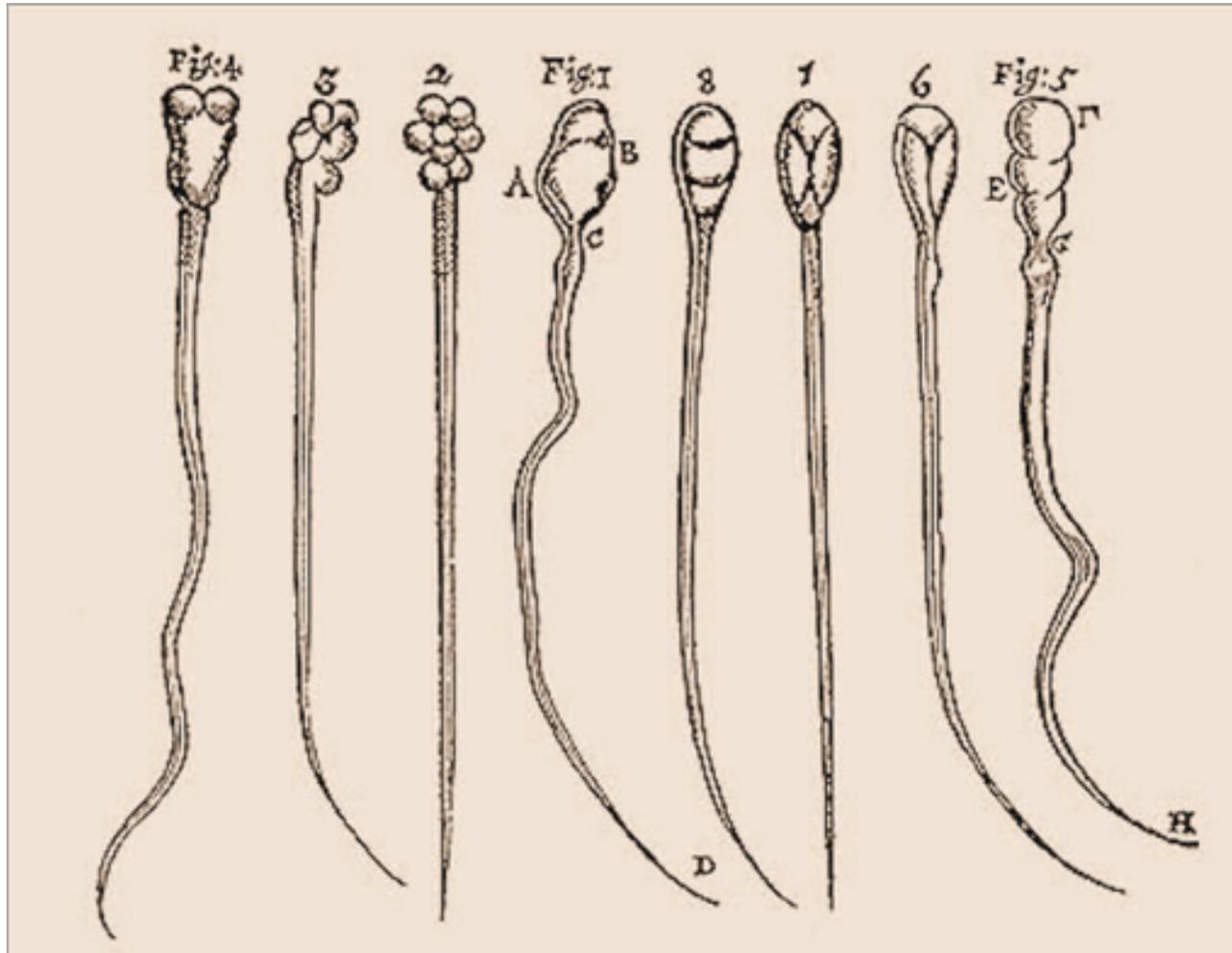


Figure 1 - Diagram of the microscope constructed by Antoni van Leeuwenhoek in the XVII century

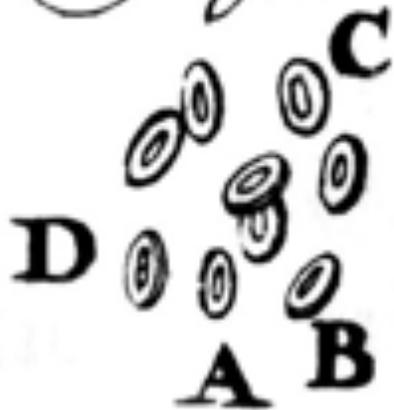
1674, Van Leeuwenhoek



spermatozoides de lapins et de chiens

1674, Van Leeuwenhoek

*fig:1.*



*fig:2.*



*fig:3.*



globules rouges du saumon

1674, Van Leeuwenhoek

# les limites de la microscopie optique traditionnelle

Le critère de Abbe:

résolution spatiale limite pour un objectif  
de diamètre  $D$  et de focale  $f$  est  $1.22 f \lambda / D$

Dans un microscope, on ne pourra pas voir de détails  
ou distinguer des objets plus petits que 500 nm.

critère de Abbe pour  
2 objets distants de 1 nm



$\lambda / \text{NA} \approx 100 \text{ nm}$

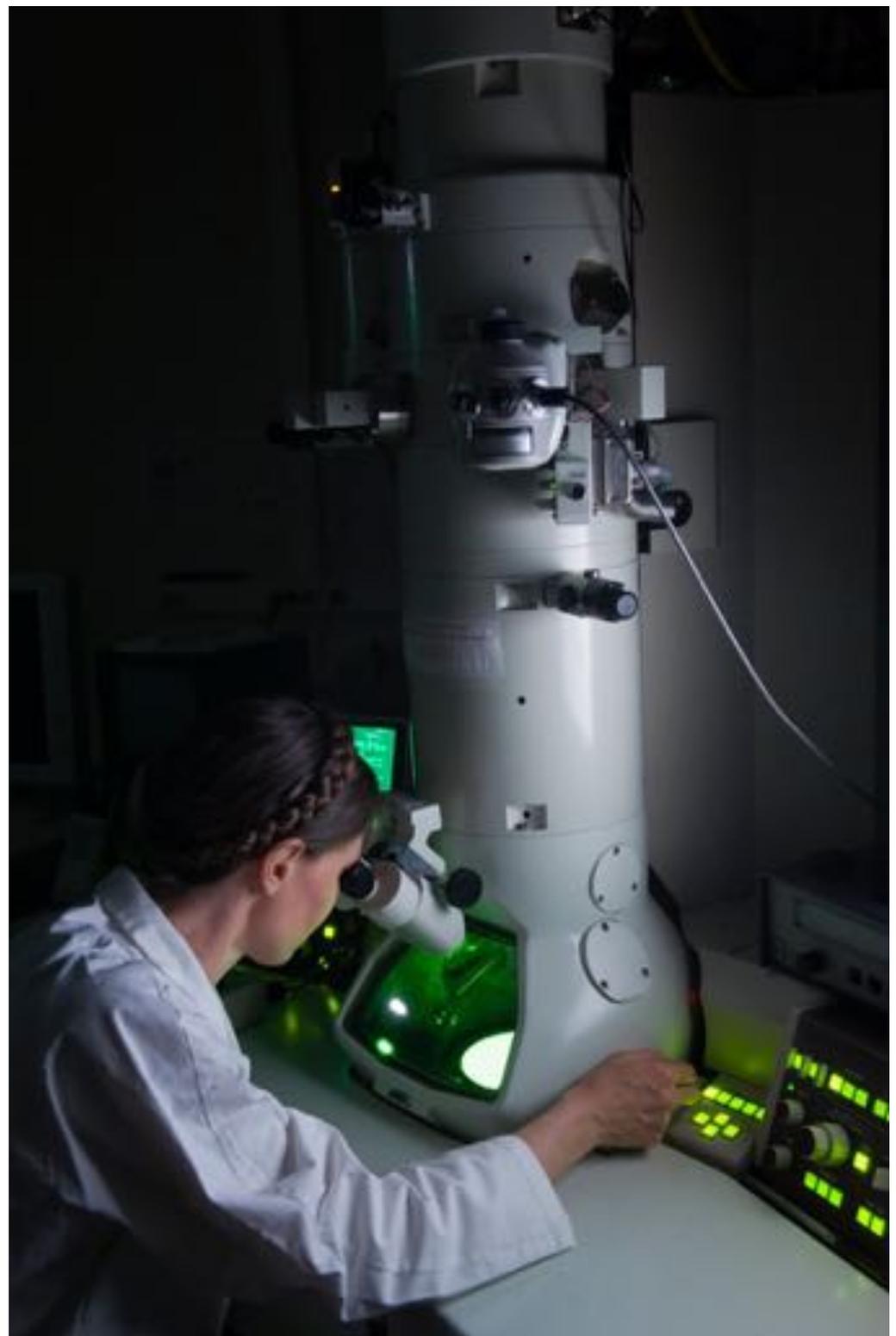
Renouveler les microscopies grâce à la physique quantique :

1. voir avec de la matière au lieu de la lumière
2. voir en touchant
3. voir en arrachant
4. voir en faisant fluorer

Renouveler les microscopies grâce  
à la physique quantique :

1. voir avec de la matière au lieu  
de la lumière
2. voir en touchant
3. voir en arrachant
4. voir en faisant fluorer

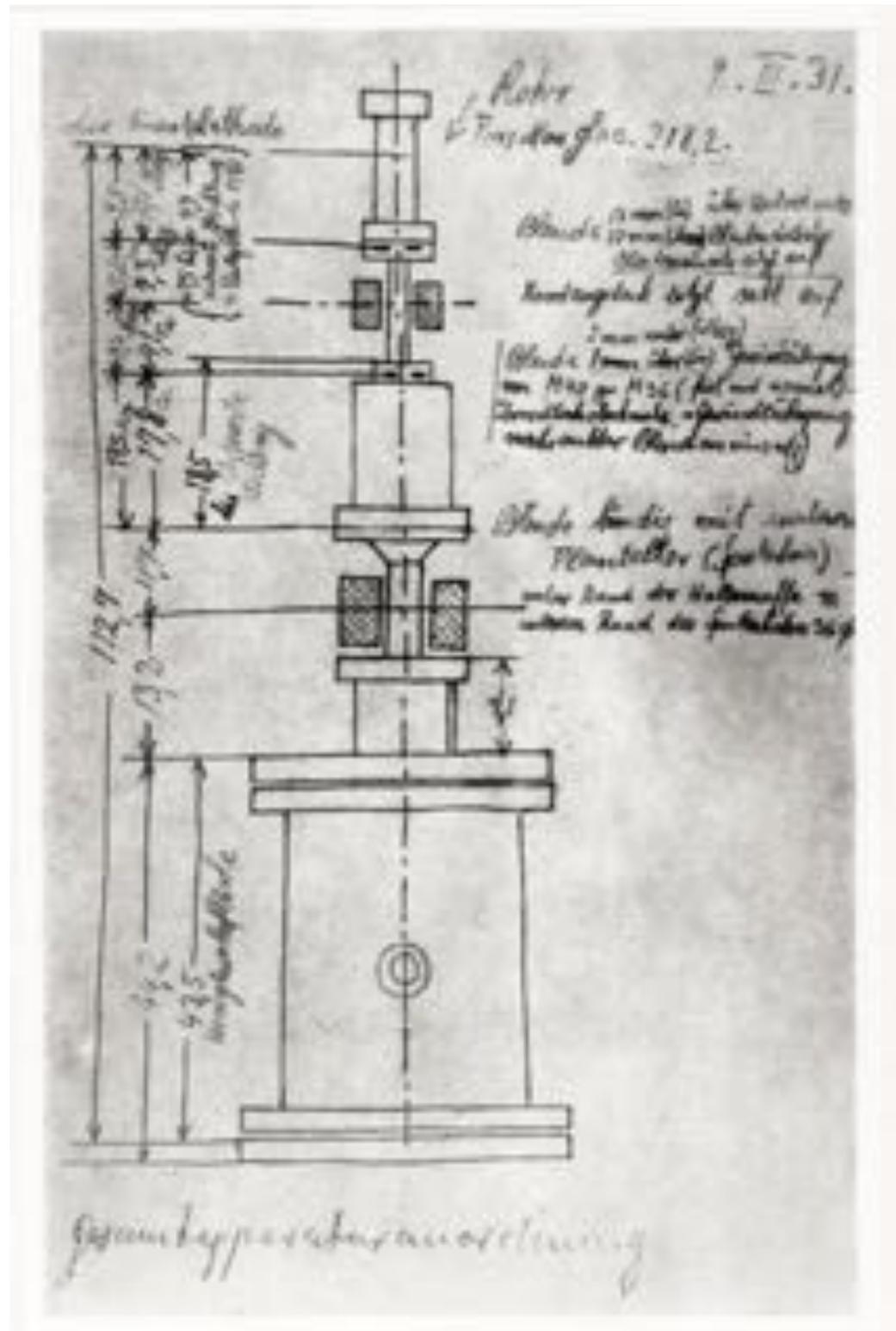
la microscopie  
électronique :  
des électrons  
utilisés au lieu de  
la lumière



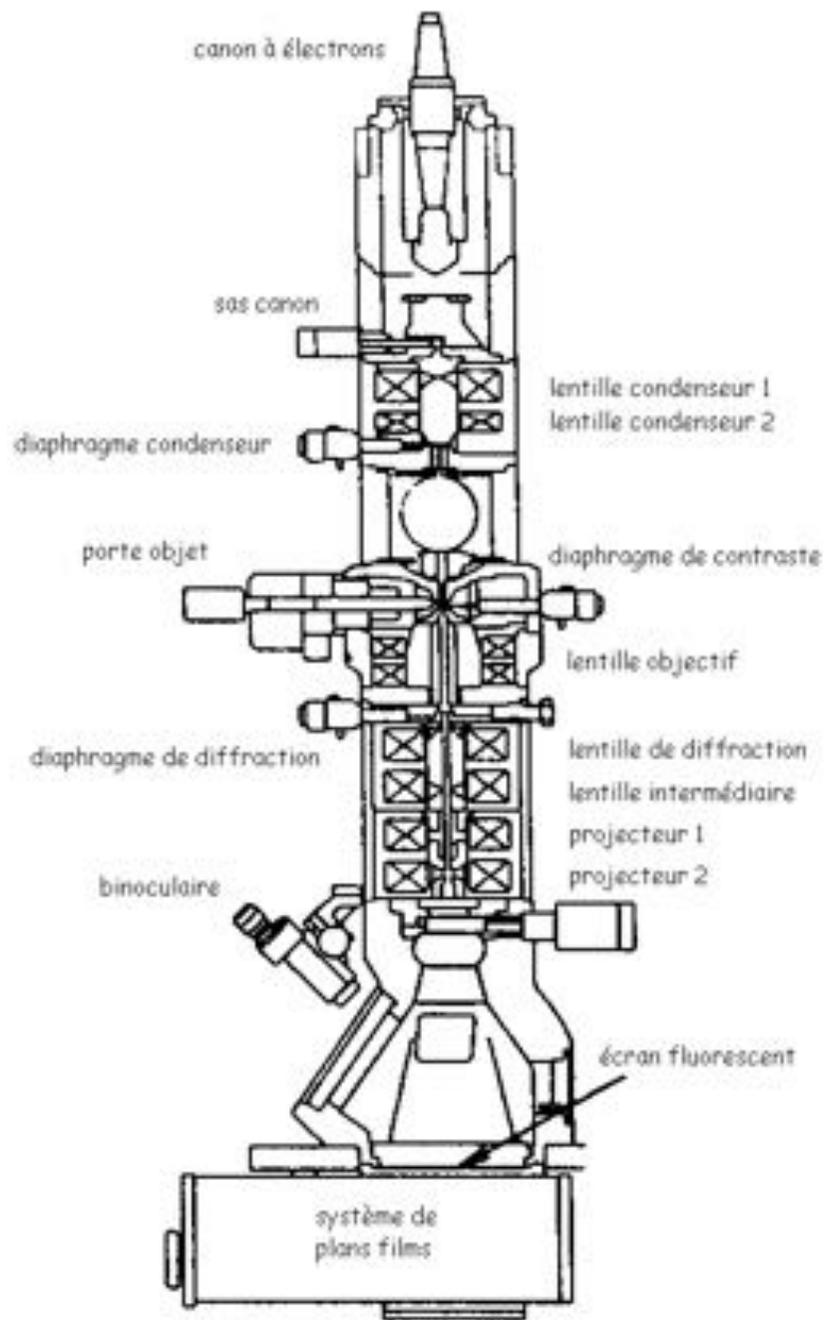


Max Knoll et son etudiant, Ernst Ruska  
(Nobel, 1986)

*Premieres images en 1931*



# Le microscope électronique



2 modes de microscopie électronique :

- en transmission (TEM)
- à balayage (SEM)

# Microscope électronique à transmission

# Microscope électronique à balayage

des images  
de microscopie électronique

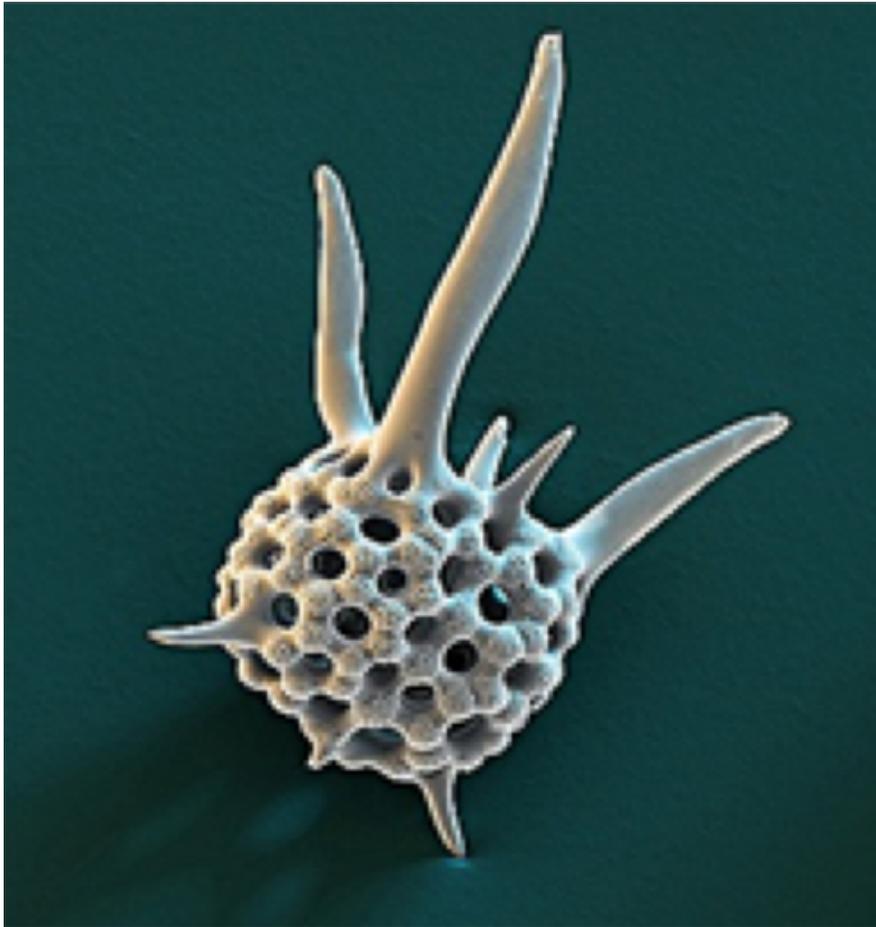
**Le vivant**



cils humains



aile de papillon



cellules protozoeres  
dans le plancton marin



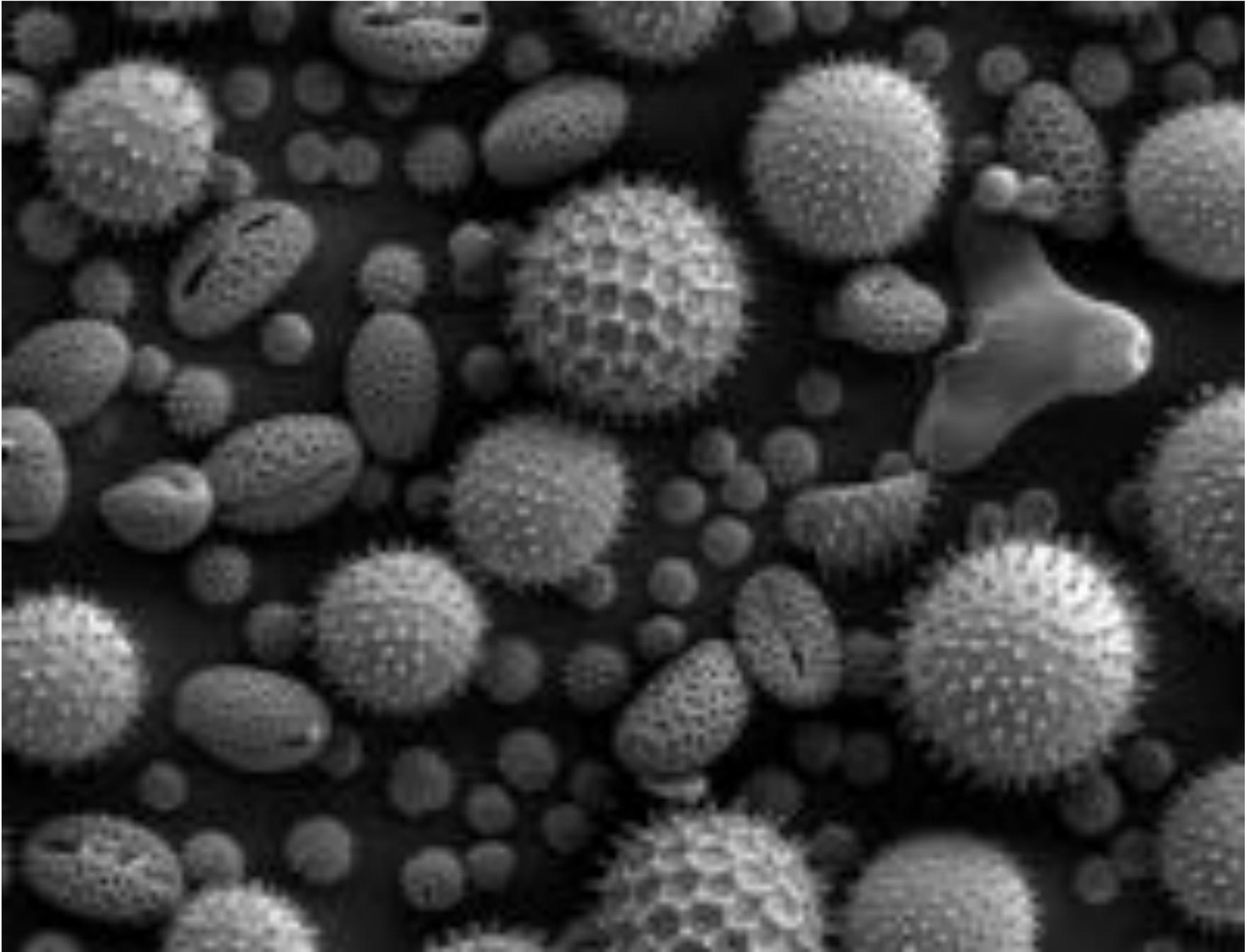
aiguille d'oursin



SCIENCEPHOTOLIBRARY

cellule canceruse cervicale

# Le végétal



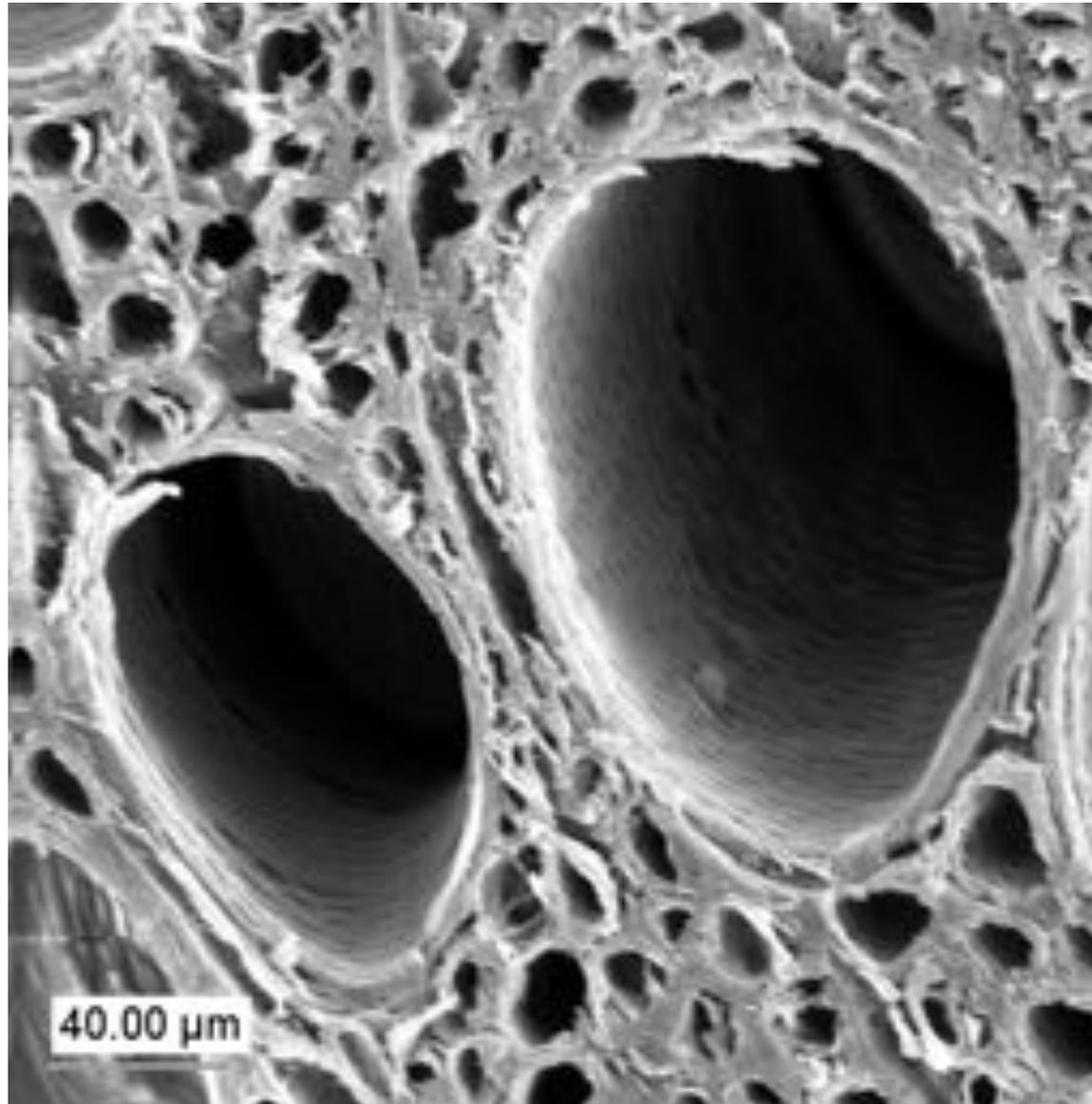
pollen



poussière de maison (cheveux, pollen, fibres de laine, résidus d'insecte...)

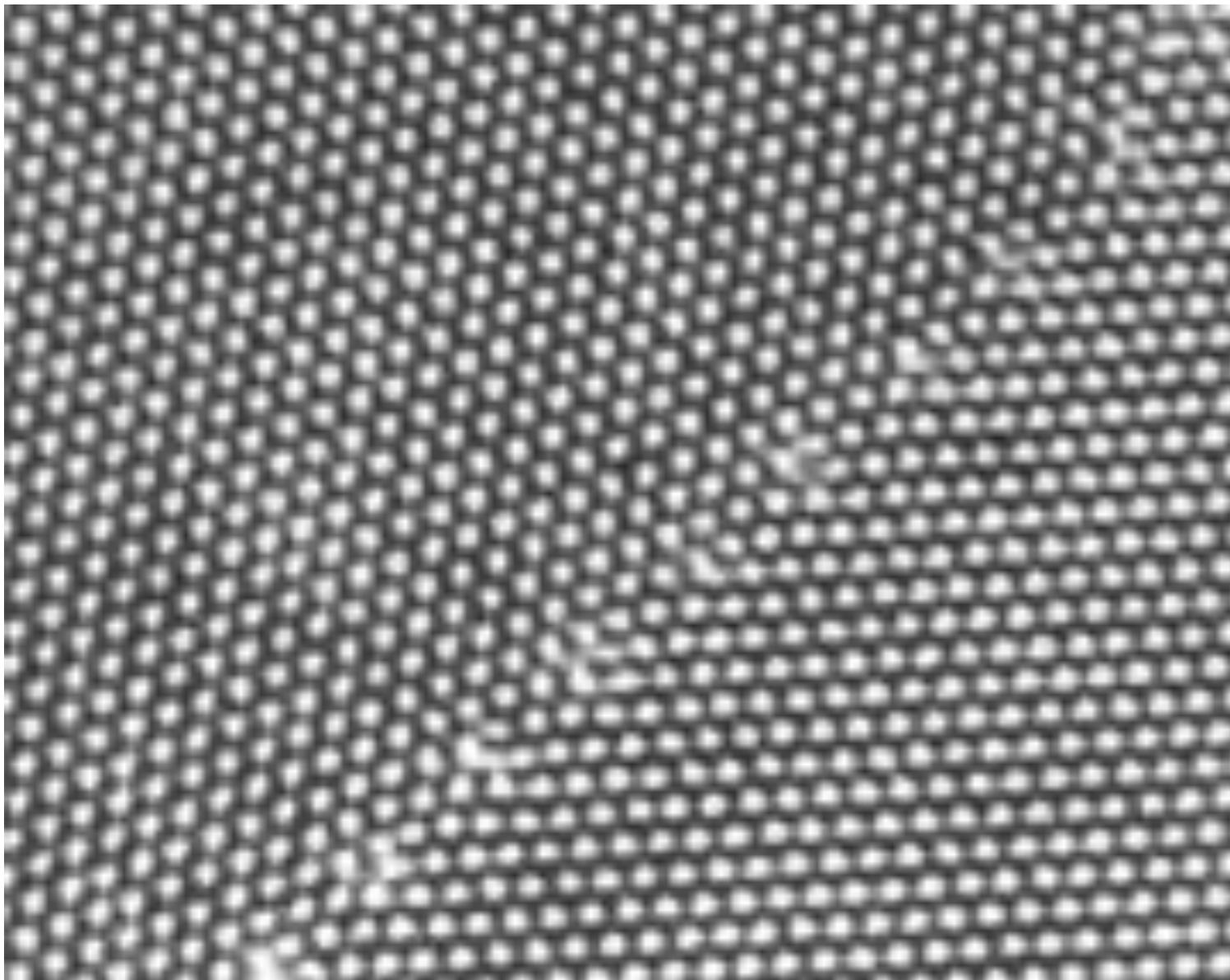


pétale

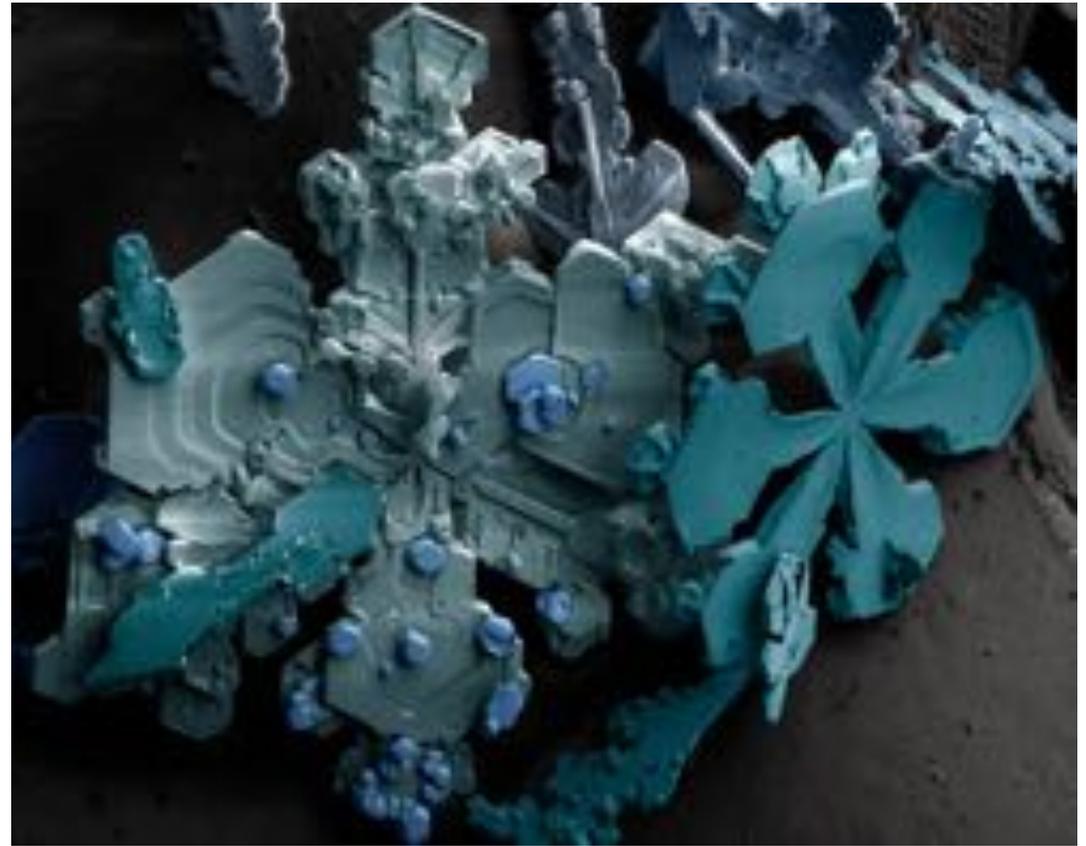
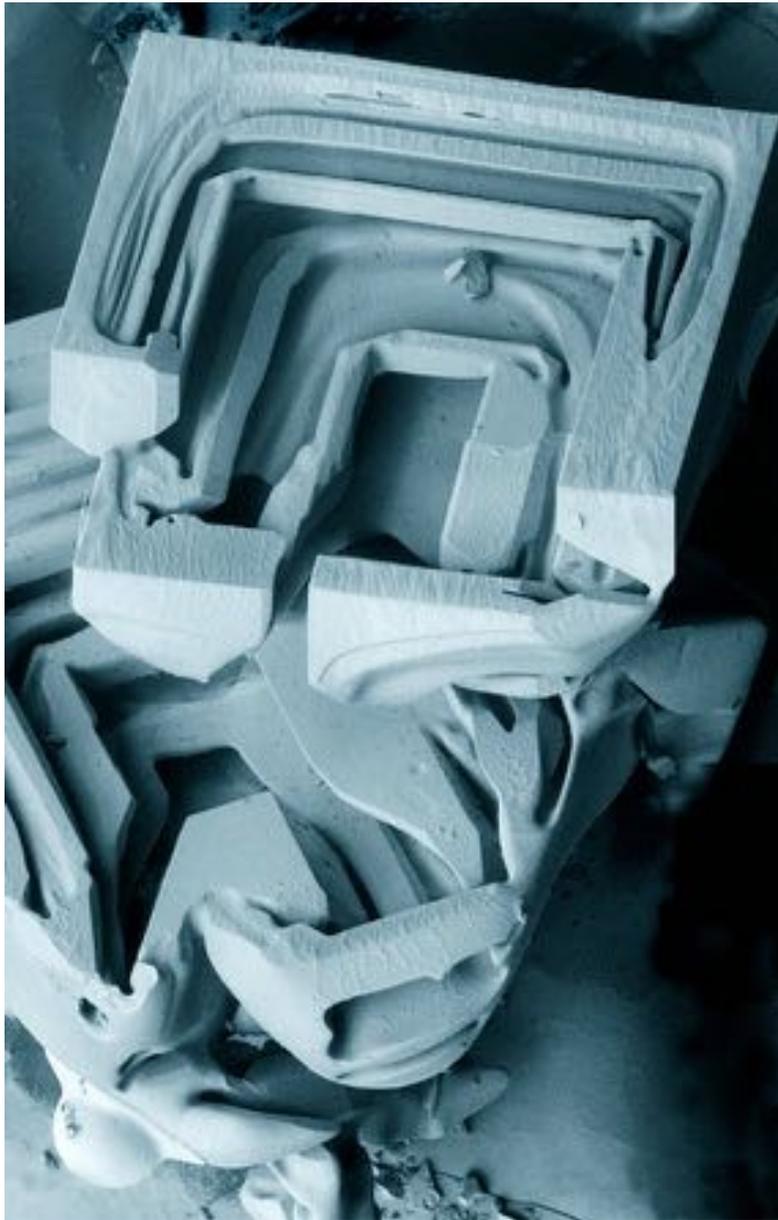


bois

# Le minéral



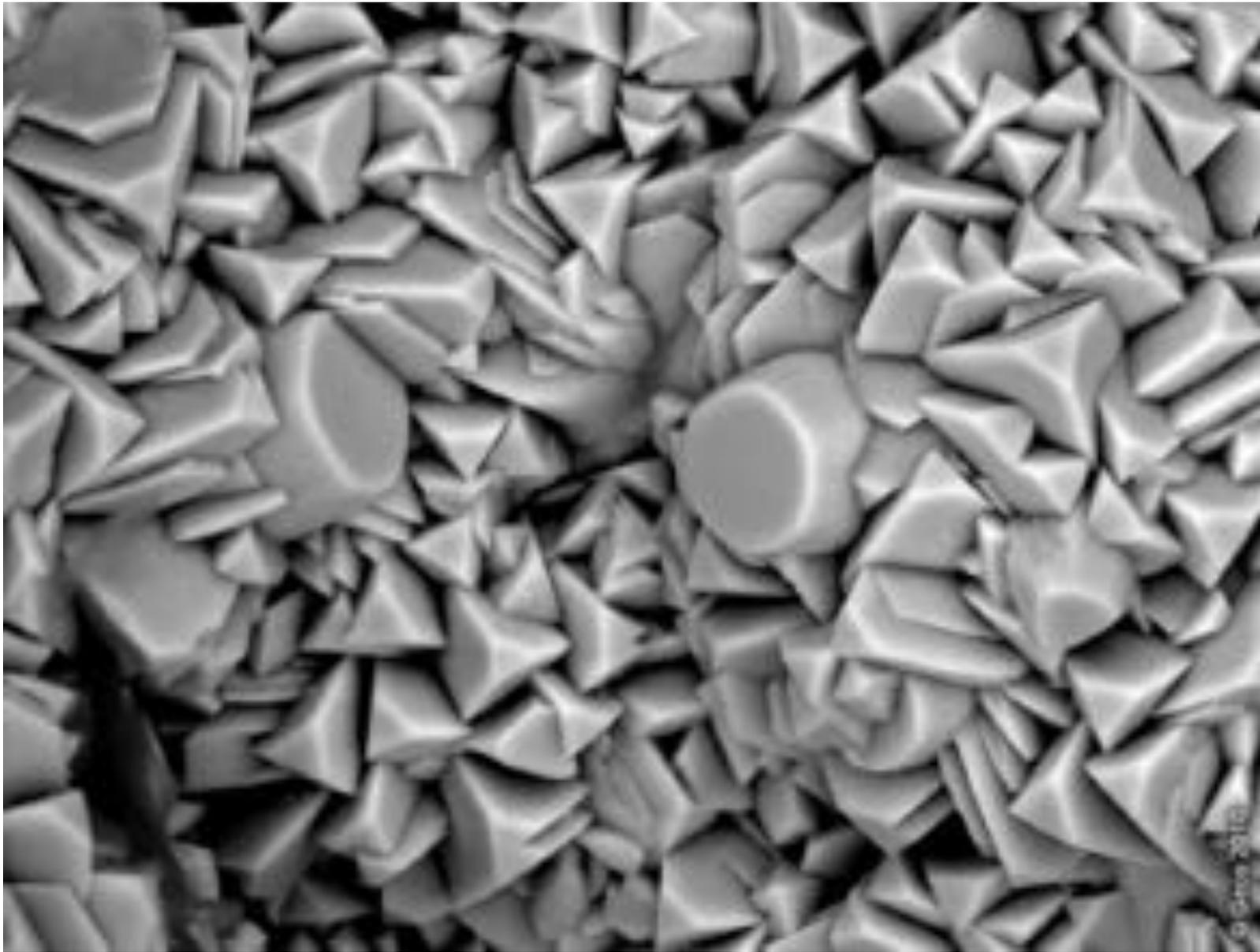
atomes d'aluminium



cristal de neige



métal oxydé

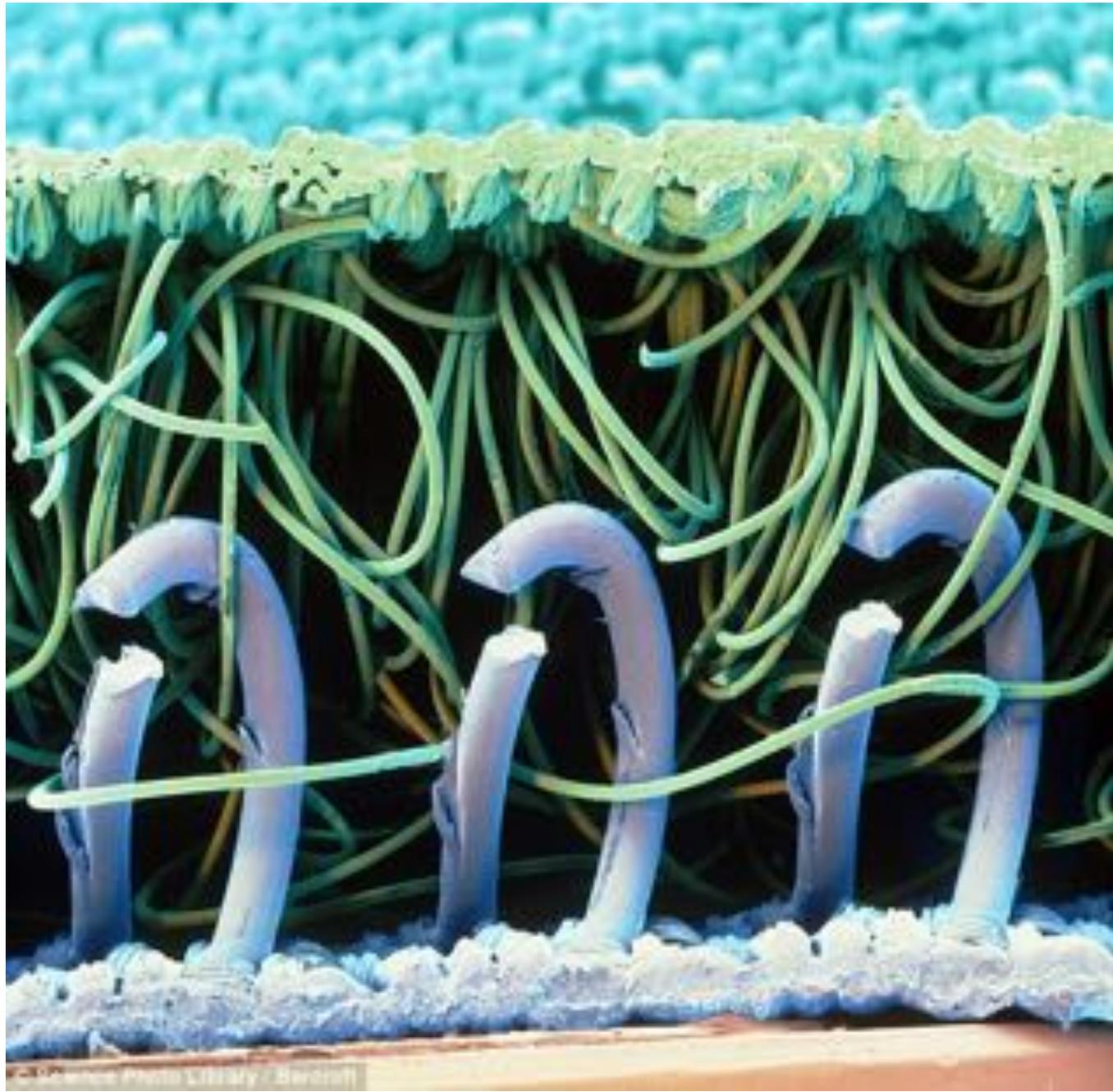


microcristaux de cobalt

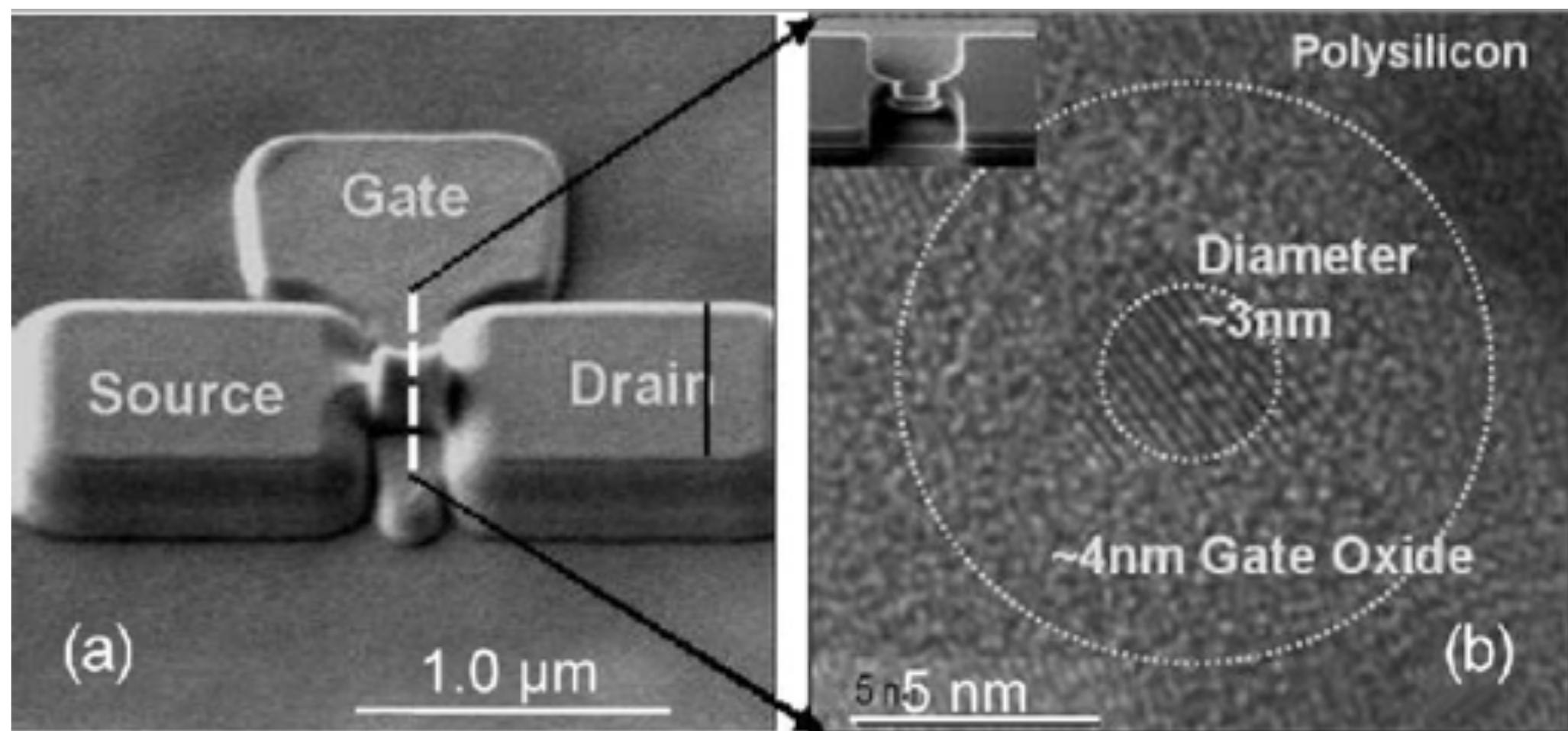
**L'artificiel**



fibres de coton colonisées par une moisissure



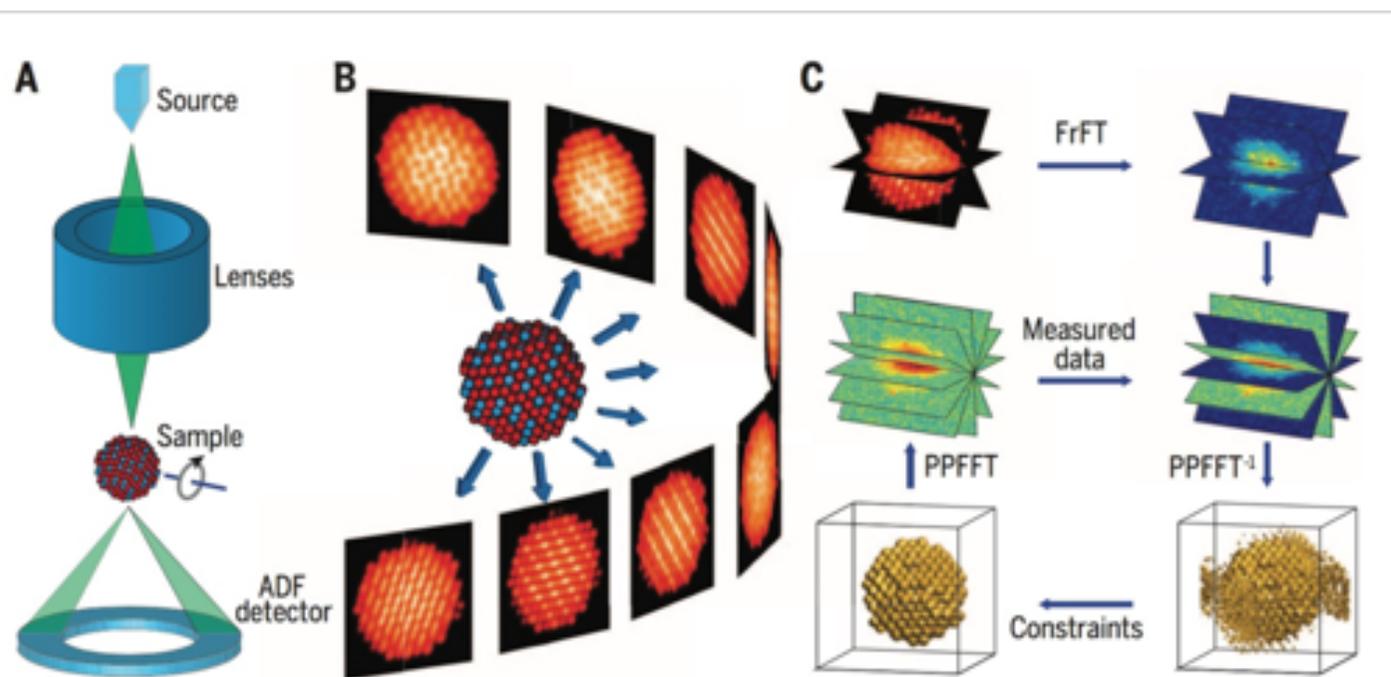
velcro



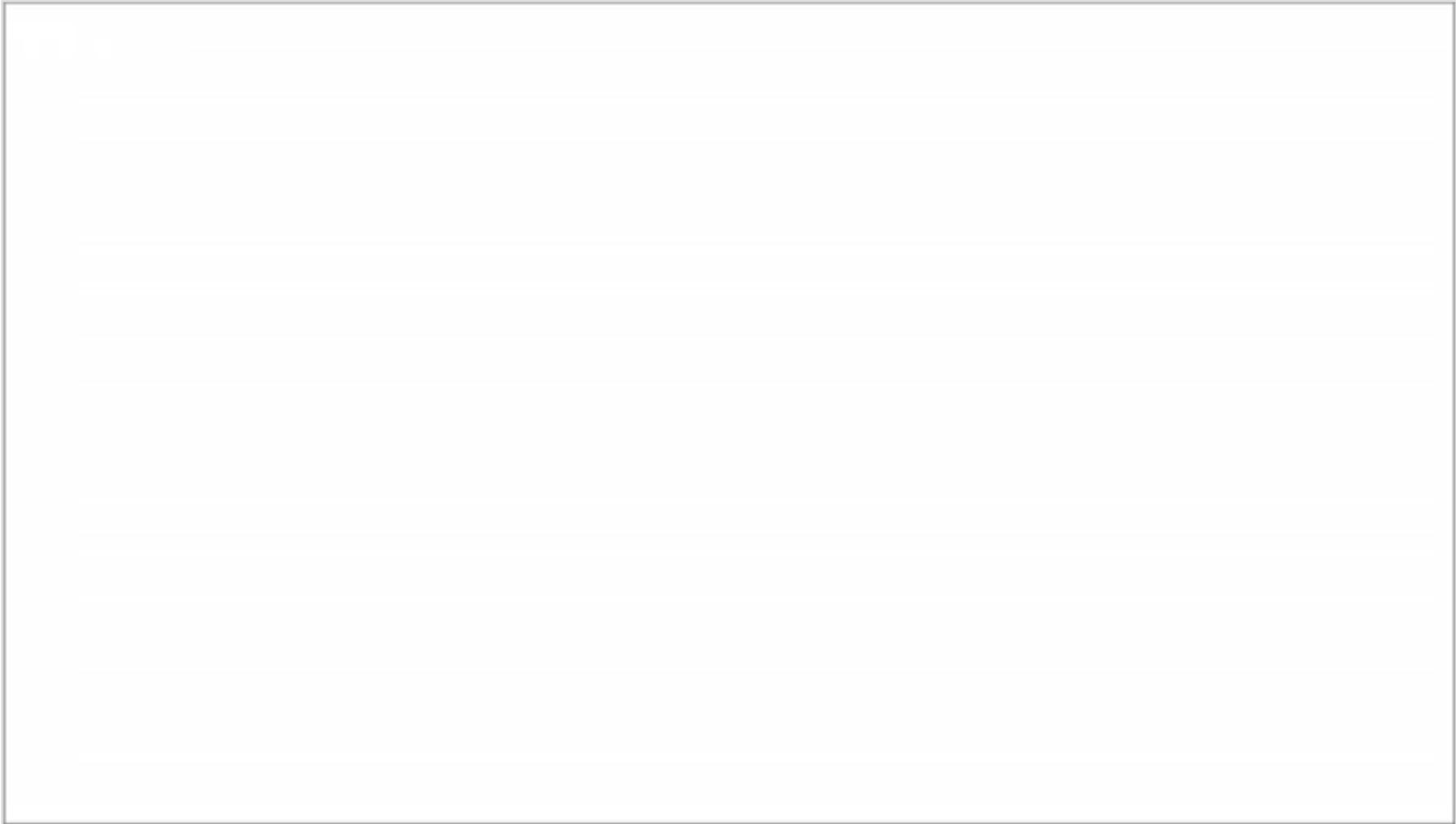
un exemple de recherche récente  
avec un microscope électronique :  
la tomographie atomique

# Atomic electron tomography: 3D structures without crystals

Jianwei Miao,<sup>1\*</sup> Peter Ercius,<sup>2</sup> Simon J. L. Billinge<sup>3,4</sup>



**Fig. 1. Schematic layout of AET.** (A) An electron beam is focused on a small spot and scanned over a sample to form a 2D image. The integrated signal at each scanning position is recorded by an ADF detector. (B) By rotating the sample around a tilt axis, a series of 2D images is measured at different tilt angles. (C) After preprocessing and alignment, the tilt series is inverted to Fourier slices by the fractional Fourier transform (FrFT). A 3D reconstruction is computed by using a Fourier-based iterative algorithm. From the 3D reconstruction, the coordinates of individual atoms are traced and refined to produce the 3D atomic model of the sample.



# Renouveler les microscopies grâce à la physique quantique :

1. voir avec de la matière au lieu de la lumière
2. voir en touchant
3. voir en arrachant
4. voir en faisant fluorer

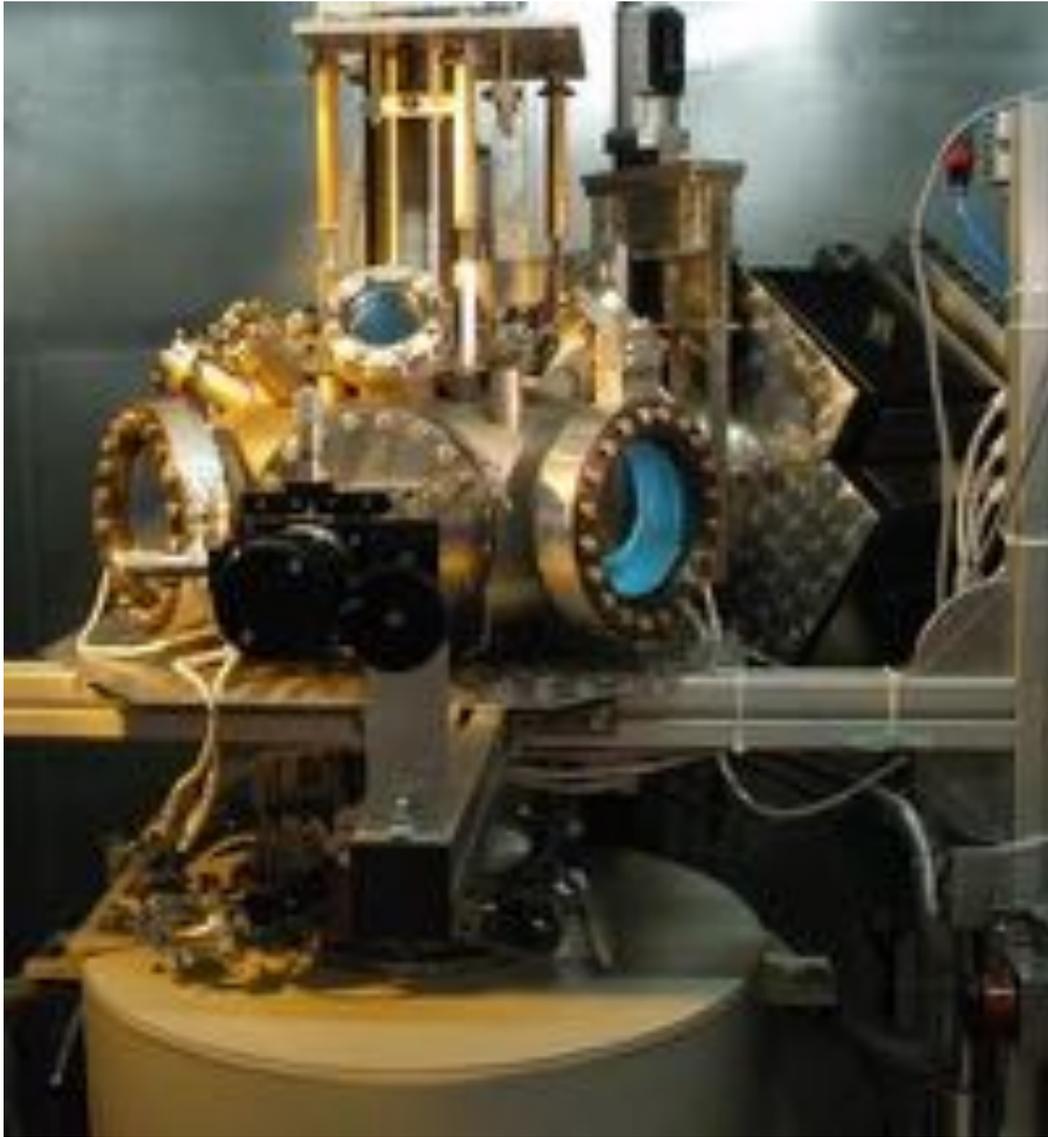
# Renouveler les microscopies grâce à la physique quantique :

1. voir avec de la matière au lieu de la lumière
- 2. voir en touchant**
3. voir en arrachant
4. voir en faisant fluorer

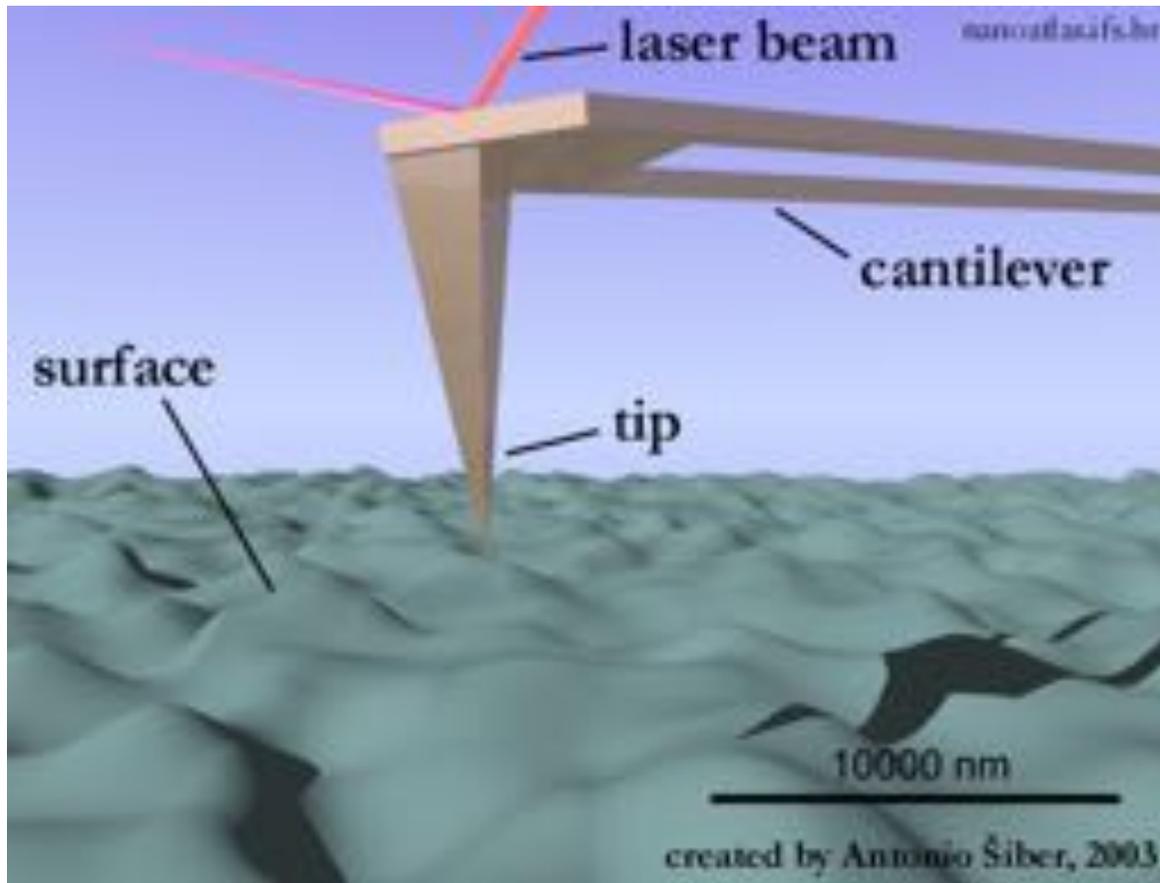
# la microscopie à force atomique

laisser glisser une pointe  
et regarder comment elle  
est déviée par le relief



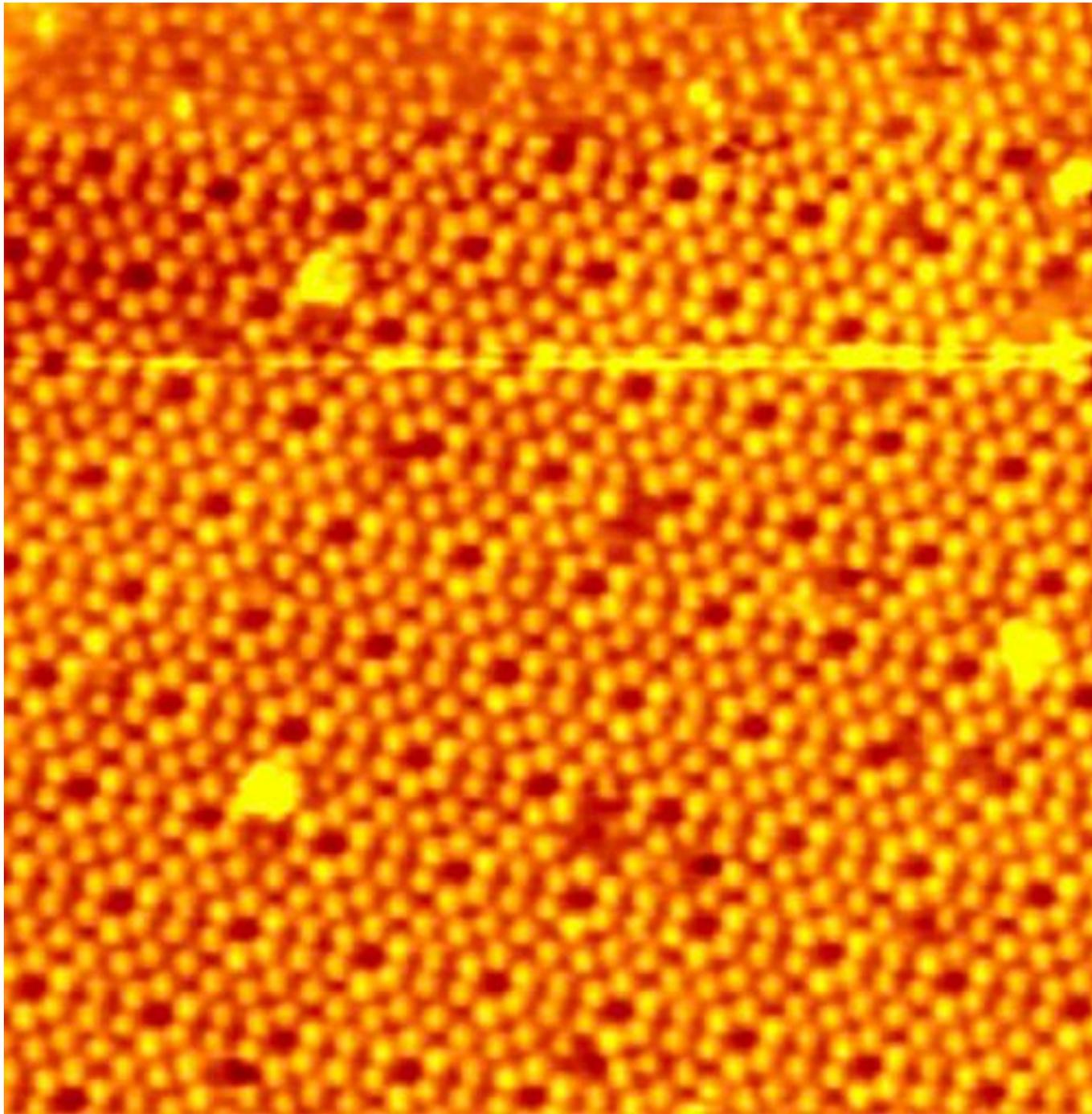


# Microscope à force atomique



analogie de la main qui parcourt une surface quand on est aveugle, puis du doigt : resolution liée à la taille de la sonde

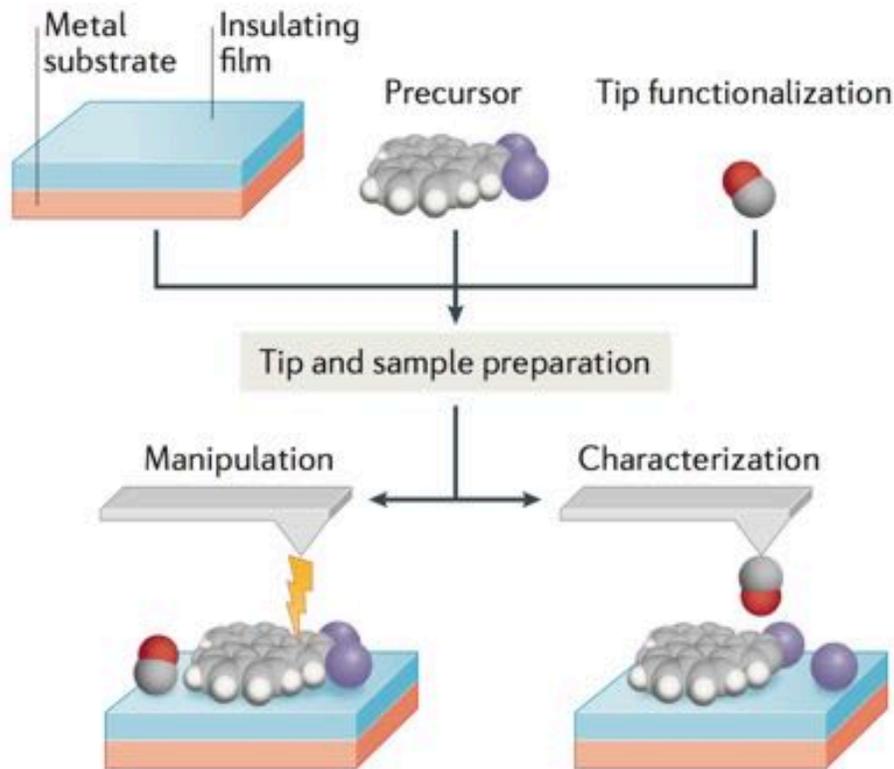
On peut voir des isolants.



AFM sur Si(111)

un exemple de recherches  
récentes pour l'AFM

si on « habille » la pointe de l'AFM pour la passiver, on peut faire mieux:



exemple :  
molécule CO  
au bout de la pointe

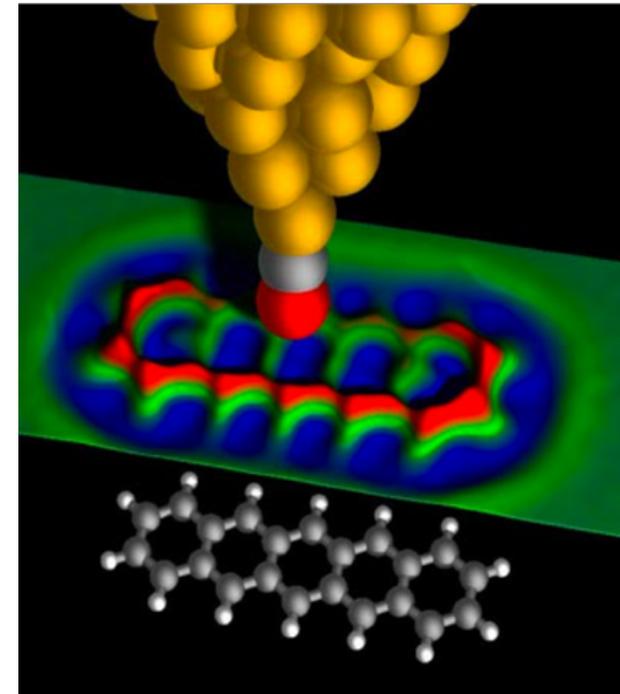
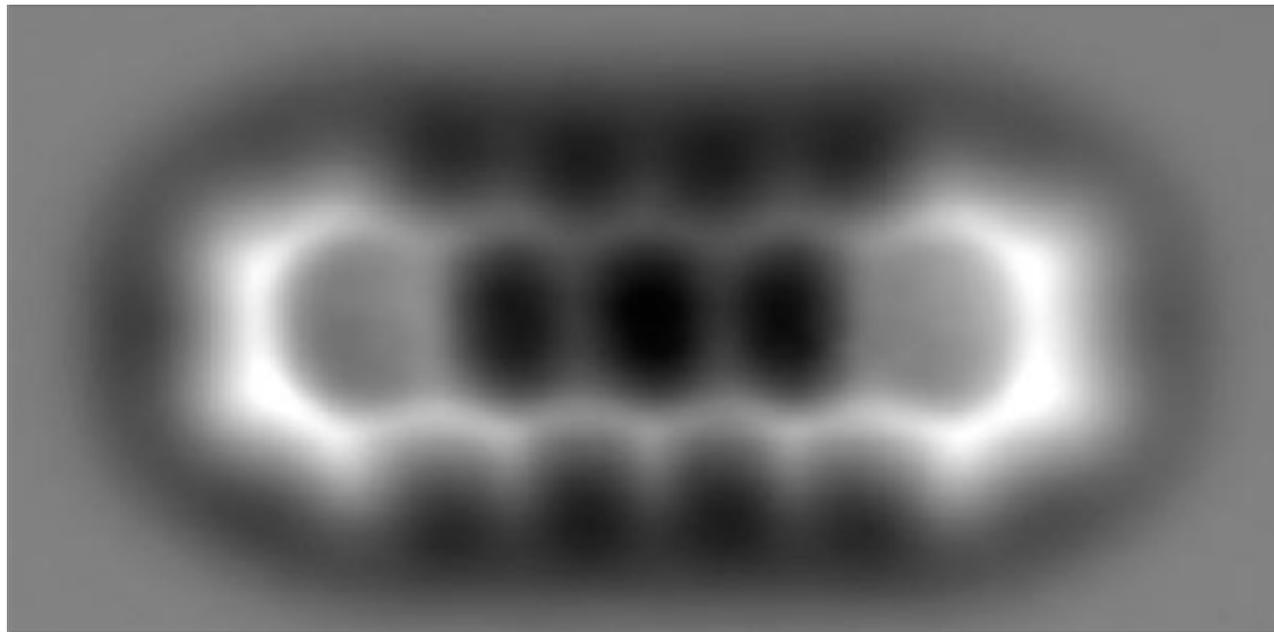
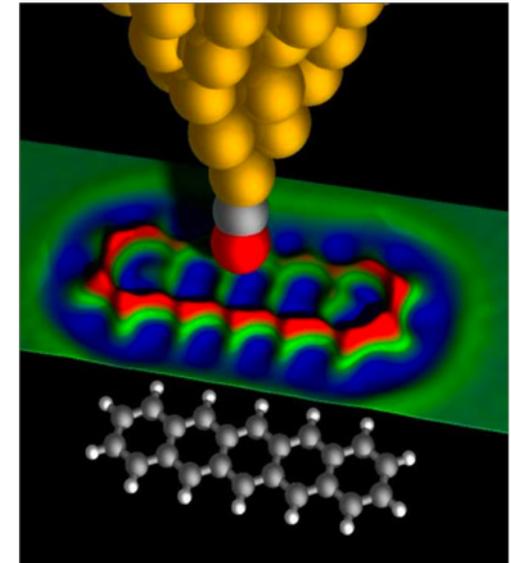


Figure 3 | **Sample preparation for AFM manipulation and analysis.** Atomic force microscopy (AFM) measurements require a clean substrate, which often takes the form of a noble metal single crystal with an optional coating of a thin insulating layer such as NaCl or xenon. The analyte molecules and/or precursors, as well as the atoms or molecules intended for tip functionalization are then deposited from the gas phase.

molécule CO au bout de la pointe  
→ diminue les forces de Van der Waals  
et très stable

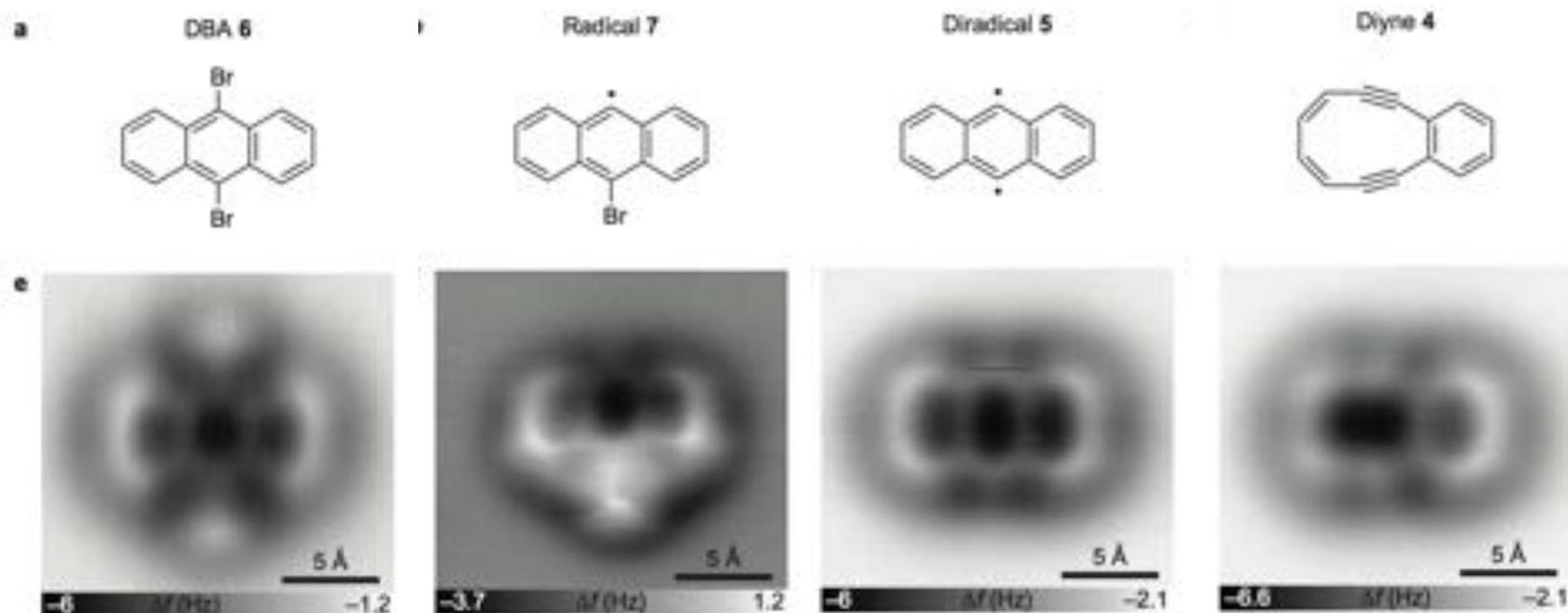


pentacène

## Reversible Bergman cyclization by atomic manipulation

Bruno Schuler<sup>1</sup>, Shadi Fatayer<sup>1</sup>, Fabian Mohn<sup>1\*</sup>, Nikolaj Moll<sup>1</sup>, Niko Pavliček<sup>1</sup>, Gerhard Meyer<sup>1</sup>, Diego Peña<sup>2</sup> and Leo Gross<sup>1\*</sup>

mesure par AFM  
et manipulation par STM

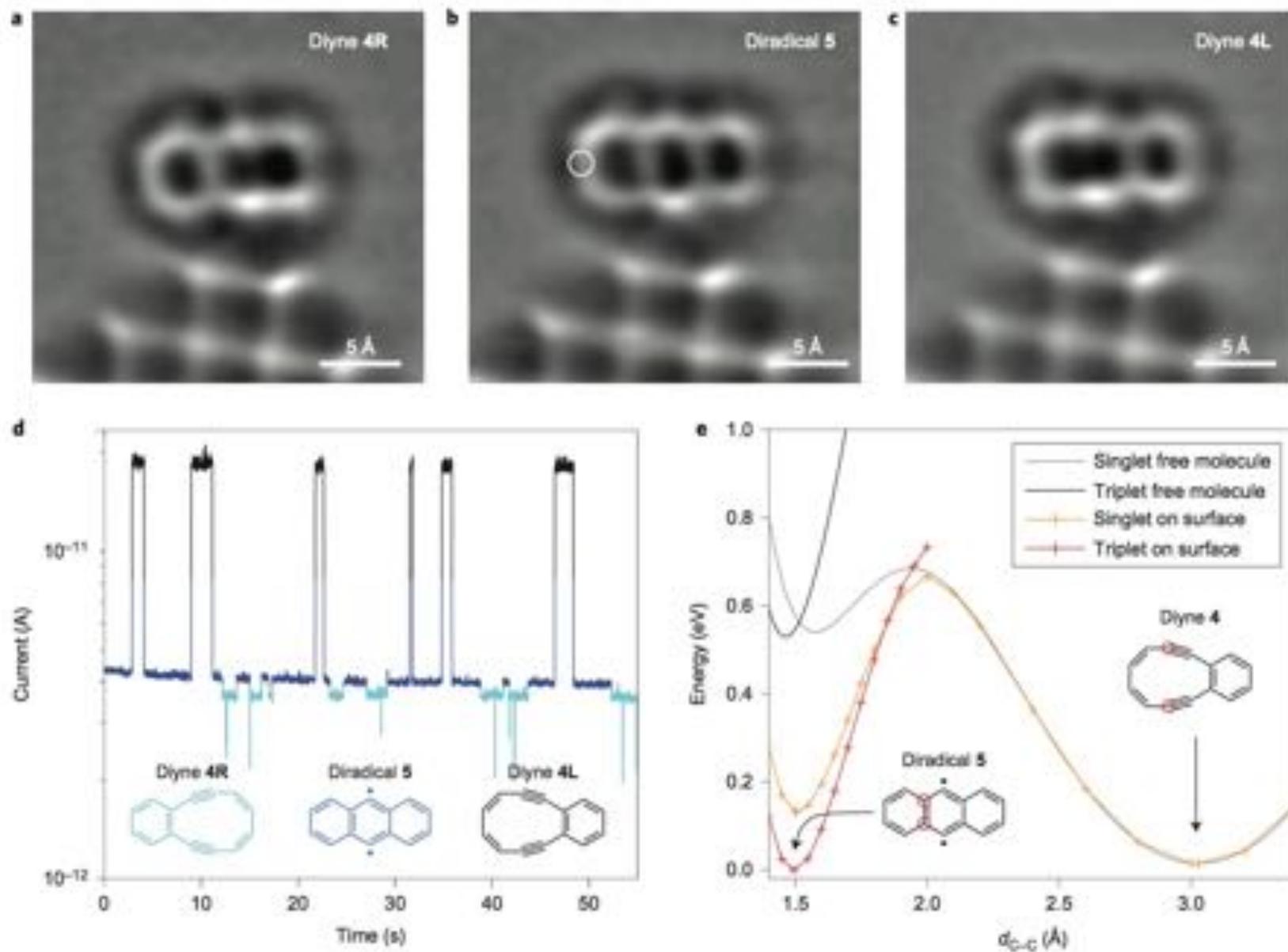


1) on casse les 2 liens C-Br  
avec une tension STM

2) on convertit  
le diradical en diyne  
byclicque par une  
autre tension STM

**Figure 2 | Structures and AFM imaging of the starting material, reaction intermediates and product.** **a-d**, Chemical structures of the reaction products formed by successive STM-induced debromination of DBA (6) (**a**) and subsequent retro-Bergman cyclization: DBA, 9-dehydro-10-bromoanthracene (radical 7) (**b**), 9,10-didehydroanthracene (diradical 5) (**c**) and 3,4-benzocyclodeca-3,7,9-triene-1,5-diyne (diiyne 4) (**d**). **e-h**, Corresponding constant-height AFM images of the molecules in **a-d**, respectively, on NaCl(2ML)/Cu(111) using a CO tip.  $\Delta f$  corresponds to the frequency shift of the oscillating cantilever.

En appliquant les bonnes tensions STM, on peut même inverser la réaction.



**Figure 4 | Reversible Bergman cyclization.** **a-c.** Laplace-filtered AFM images of diyne 4R (**a**), diradical 5 (**b**) and diyne 4L (**c**) on NaCl(2ML)/Cu(111). The molecule is adsorbed at a step edge of an NaCl(3ML)/Cu(111) island, seen in the lower part of the images. **d.** Current trace during a voltage pulse of  $V = 1.64$  V at the position indicated by the white circle in **b**. The different current levels correspond to the molecular structures of the same colour shown in the inset. **e.** Calculated energies of the Bergman cyclization using the distance between the carbons indicated by red circles ( $d_{C-C}$ ) as the reaction coordinate.

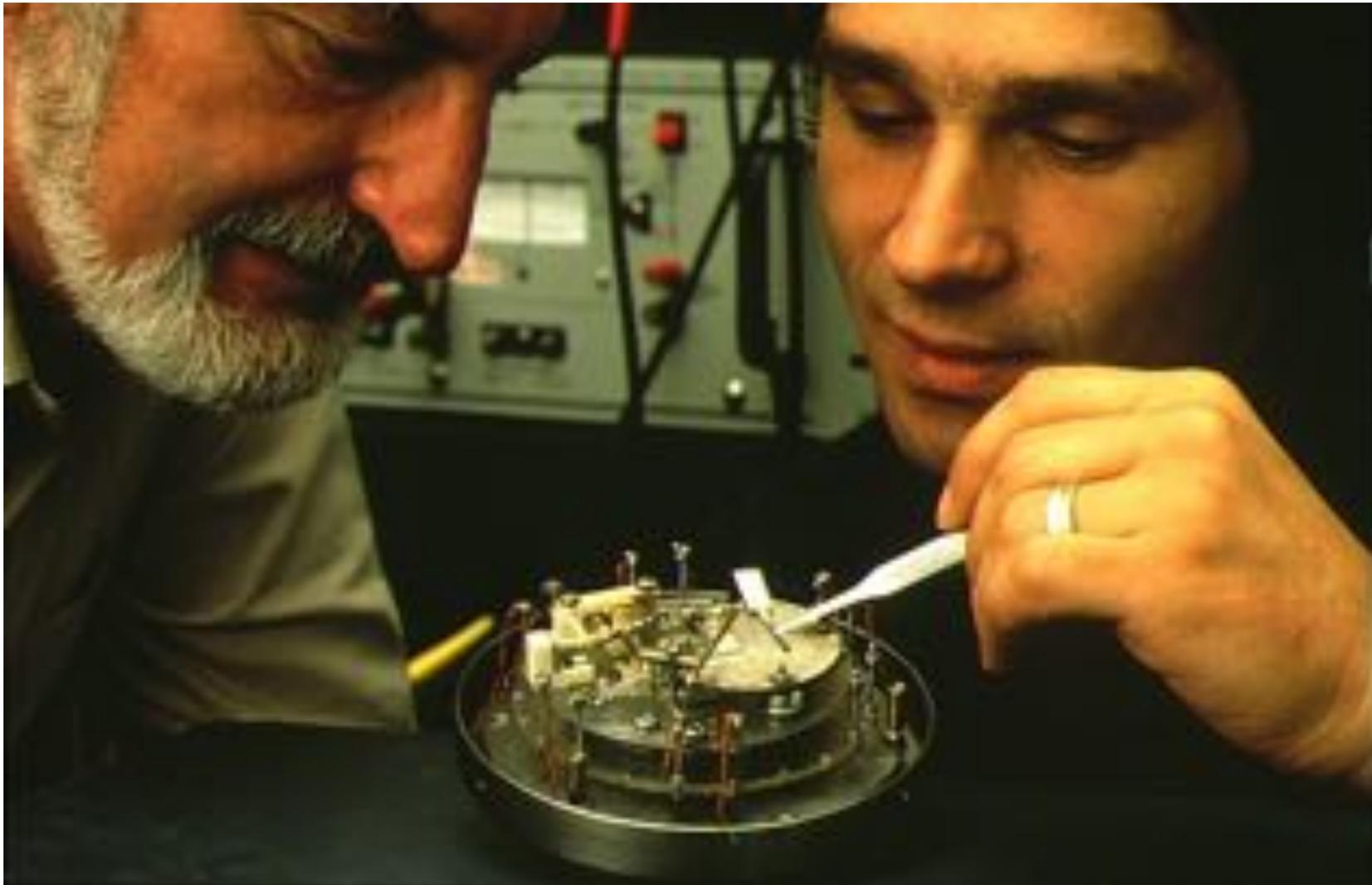
# Renouveler les microscopies grâce à la physique quantique :

1. voir avec de la matière au lieu de la lumière
2. voir en touchant
3. voir en arrachant
4. voir en faisant fluorer

# Renouveler les microscopies grâce à la physique quantique :

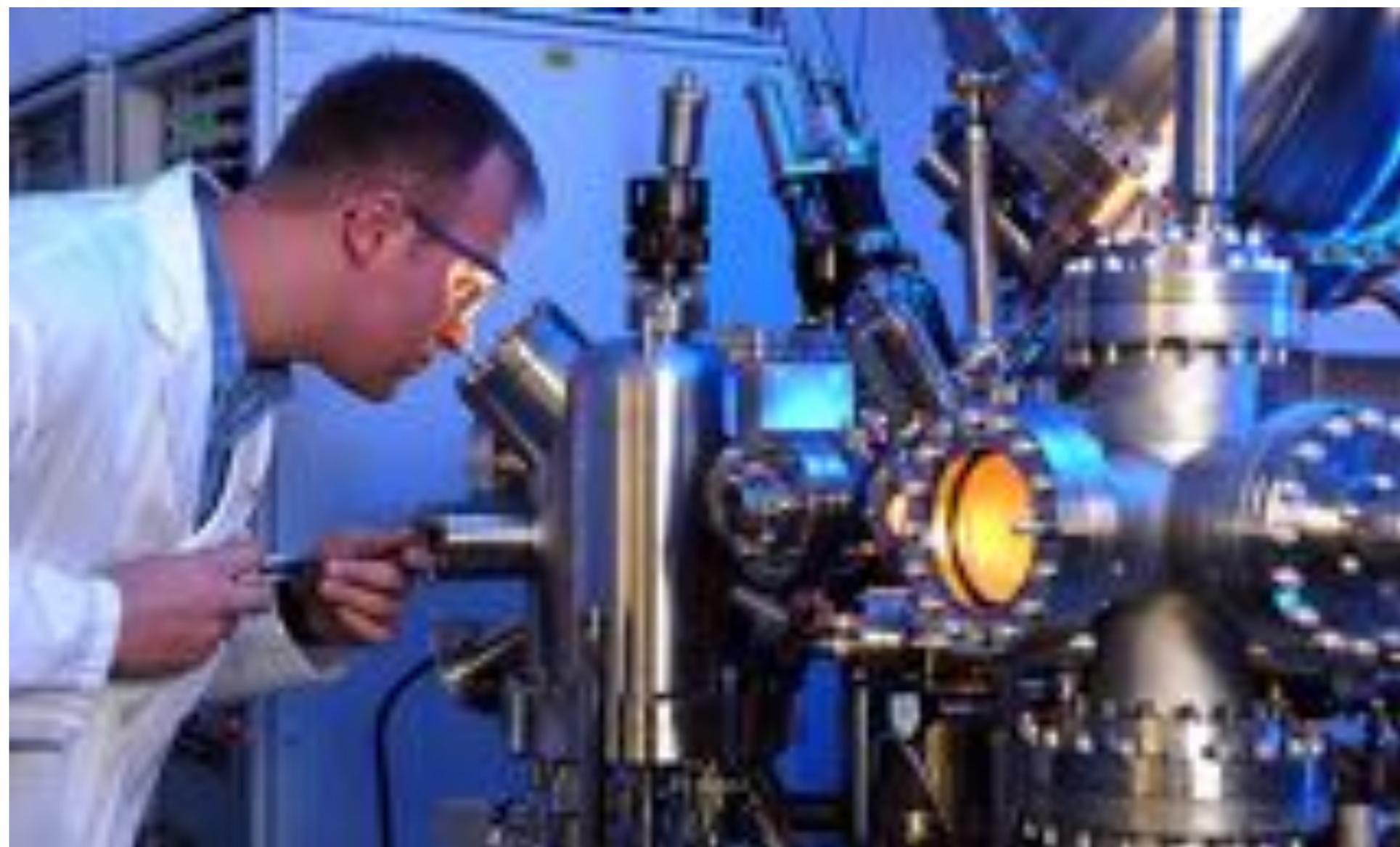
1. voir avec de la matière au lieu de la lumière
2. voir en touchant
- 3. voir en arrachant**
4. voir en faisant fluorer

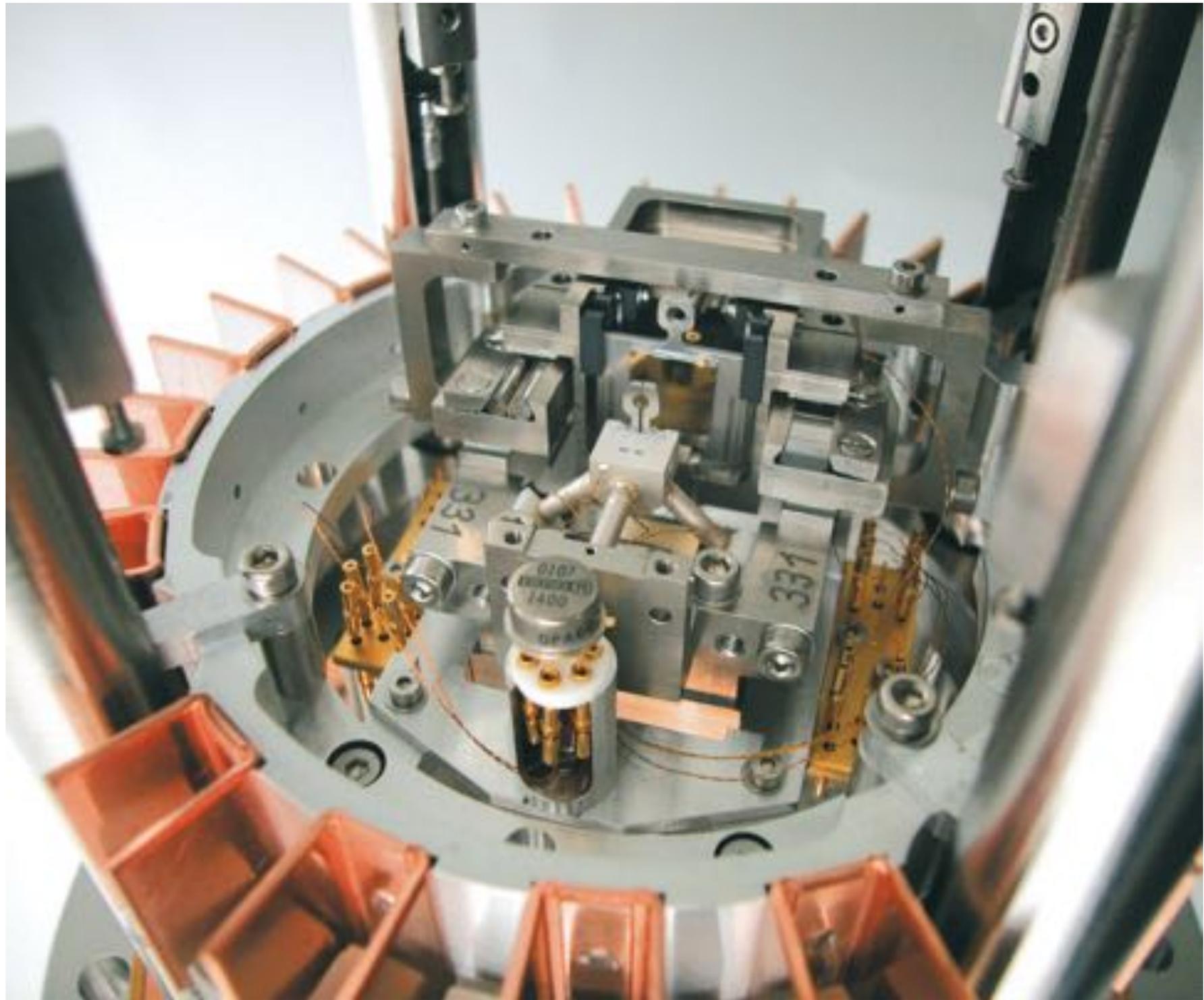
Le microscope à effet tunnel (STM) :  
voir en arrachant des électrons depuis une  
pointe électrisée

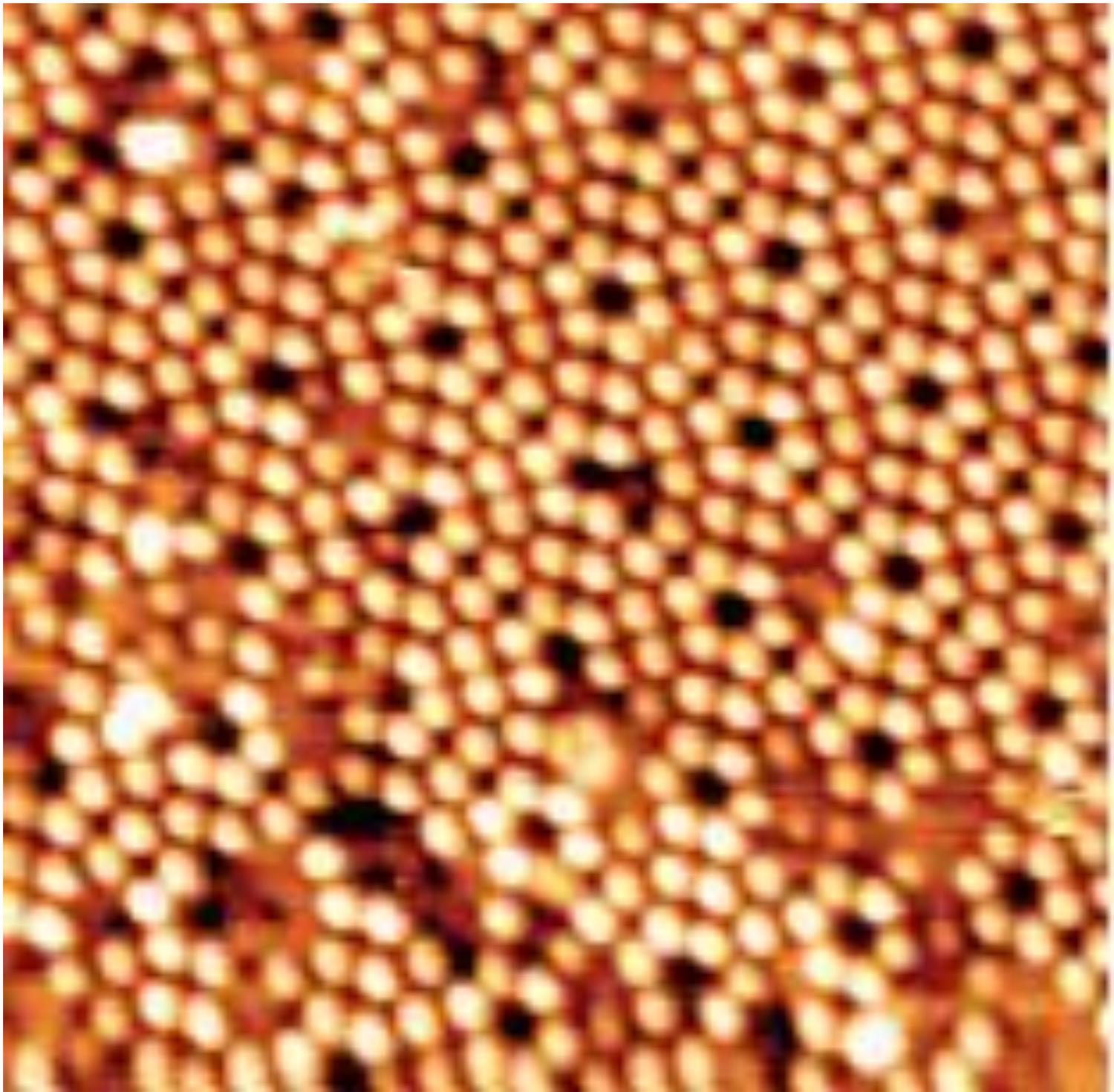


# Microscope à effet tunnel

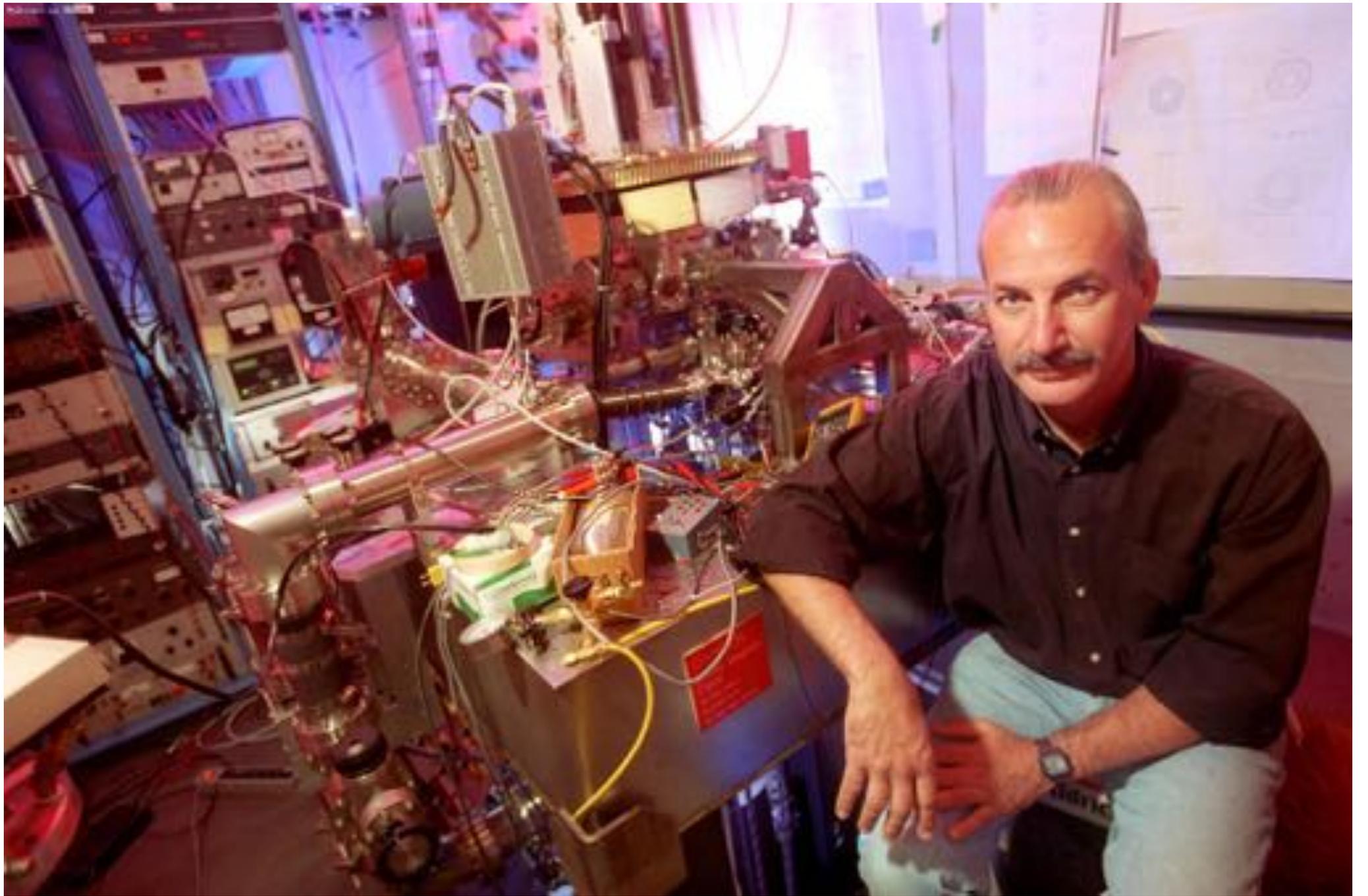
<https://youtu.be/6i0Suqe52wE>

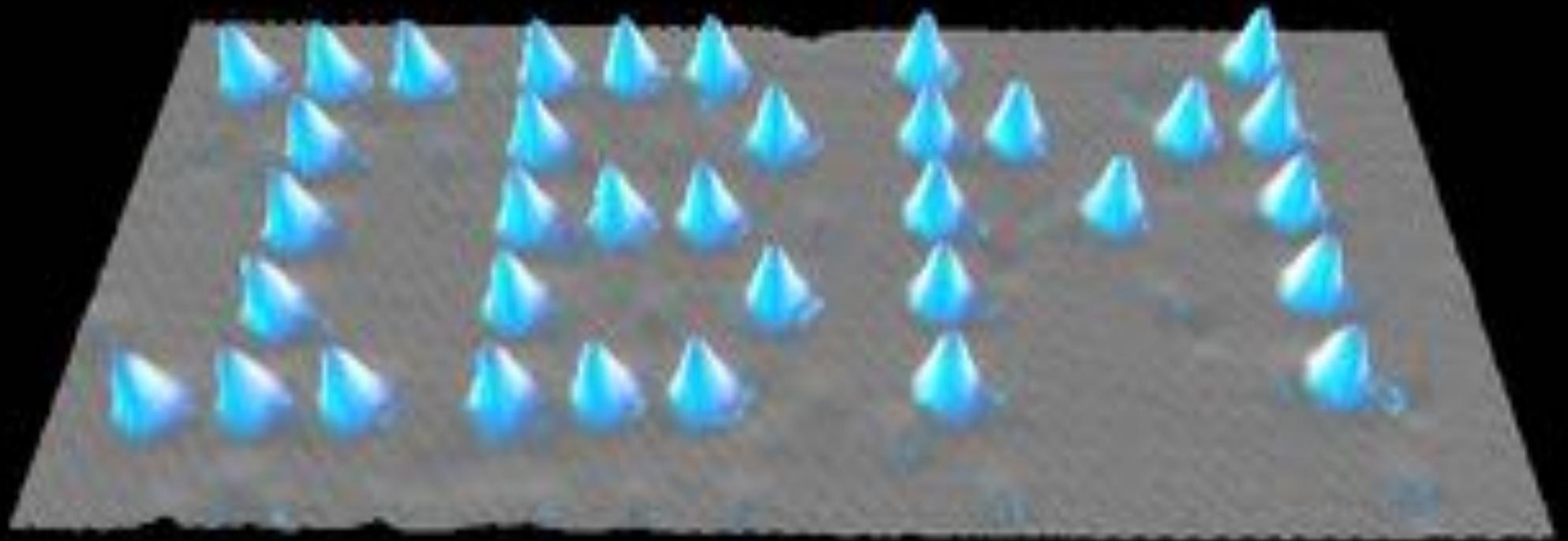




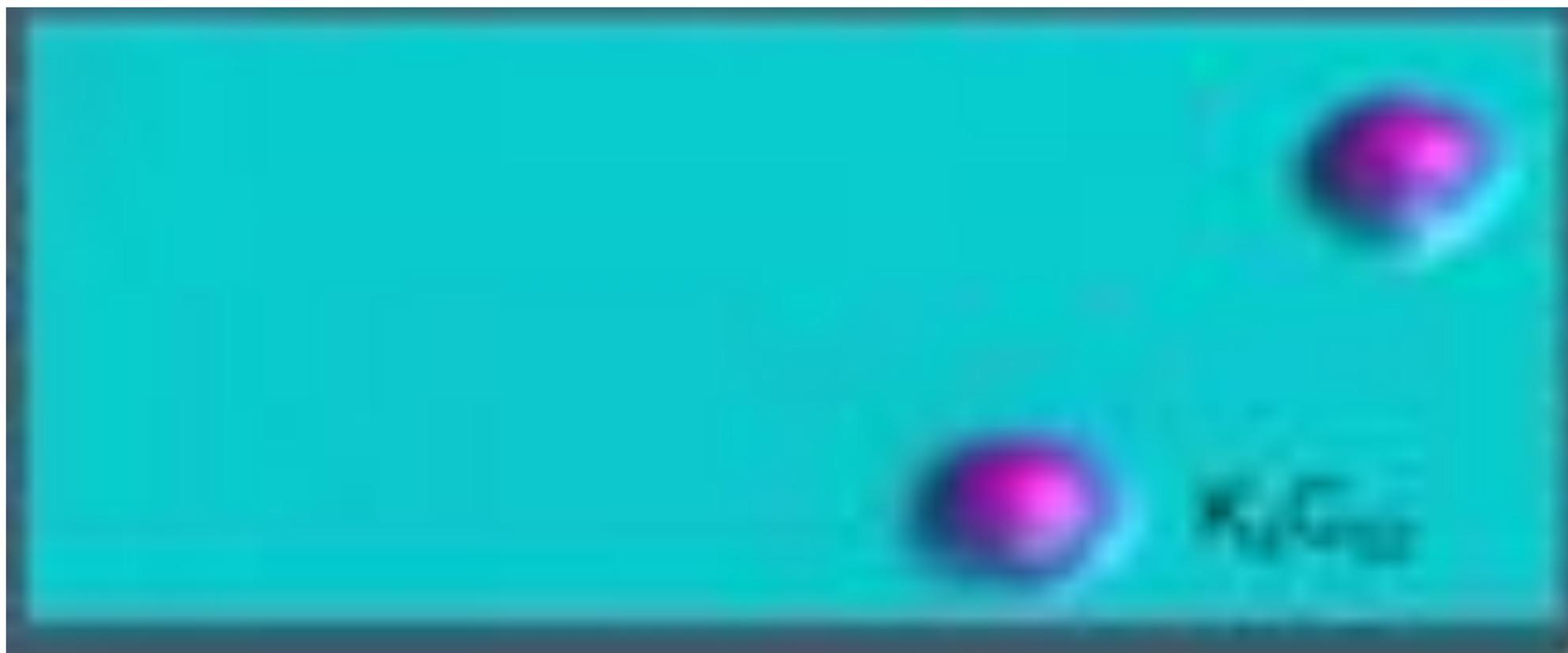


1 nm

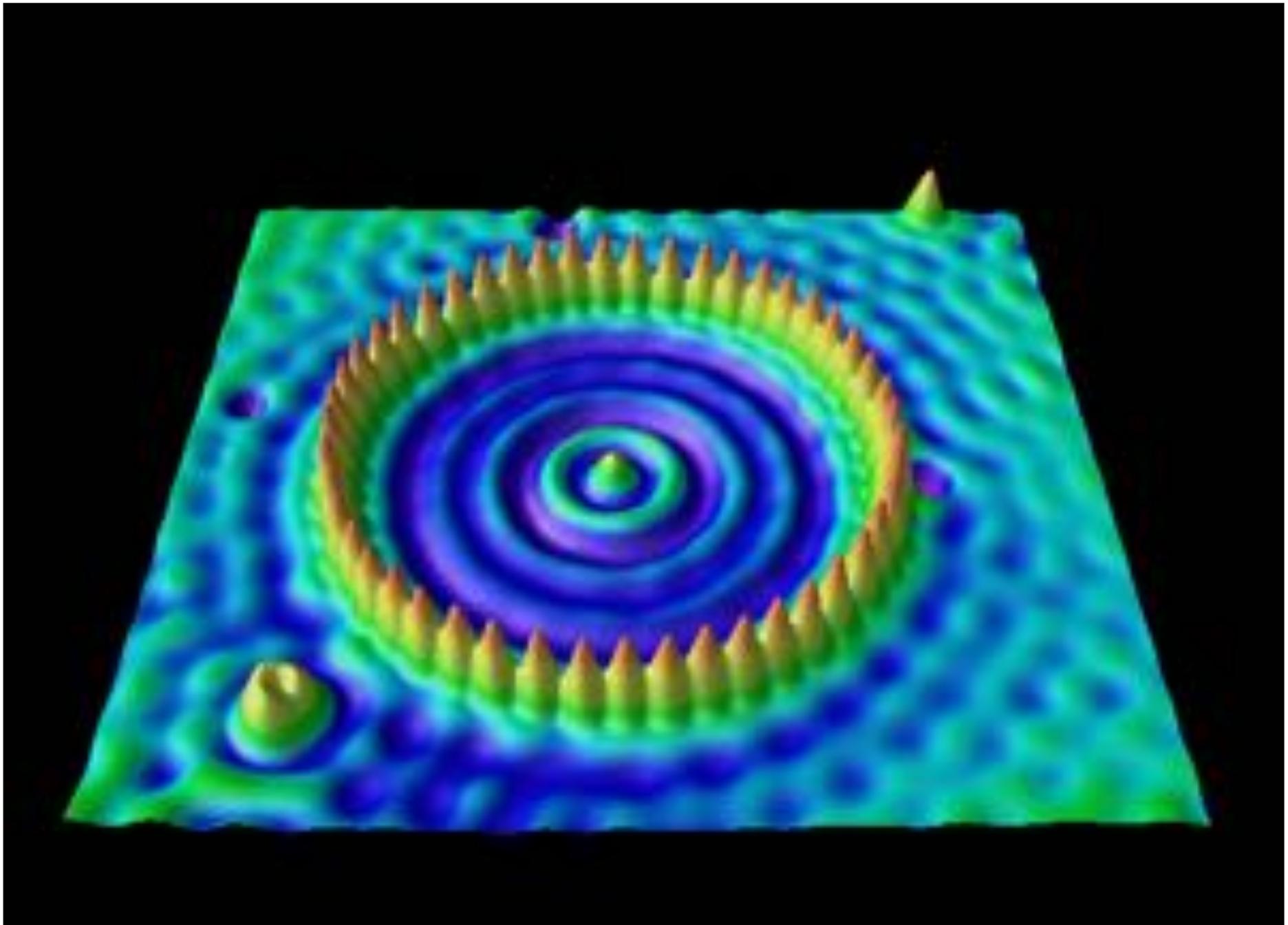




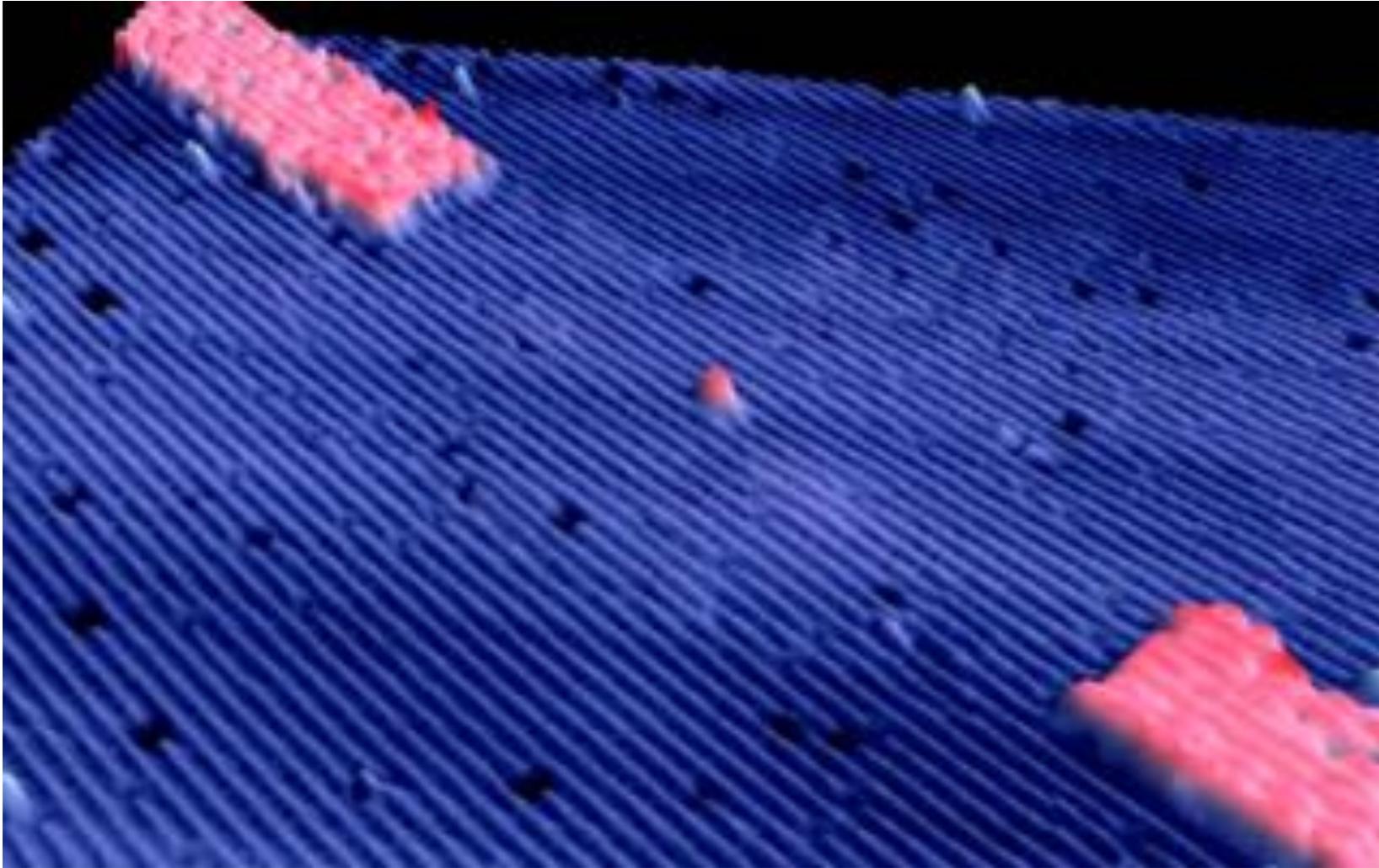
*Xenon sur Nickel (Don Eigler et al.)*



un exemple de recherche récente  
avec un microscope à effet tunnel :  
contrôler et mesurer les effets électriques et  
quantiques d'un seul atome



Fer sur cuivre (IBM)



transistor à un atome

Le plus petit film au monde

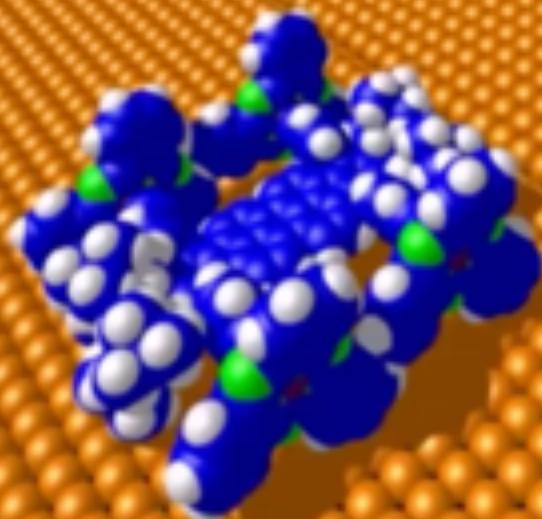




<https://www.youtube.com/watch?v=oSCX78-8-q0>

IBM

# THE SMALLEST RACING COMPETITION IN THE WORLD



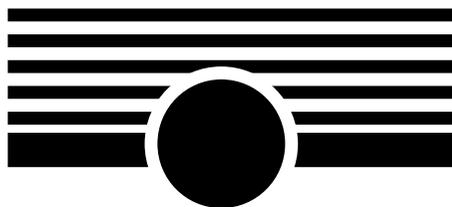
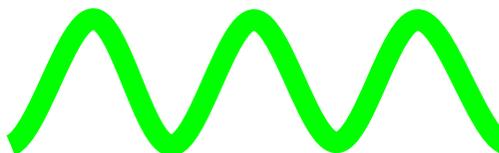
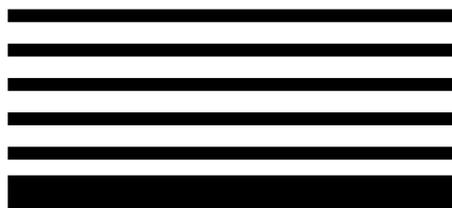
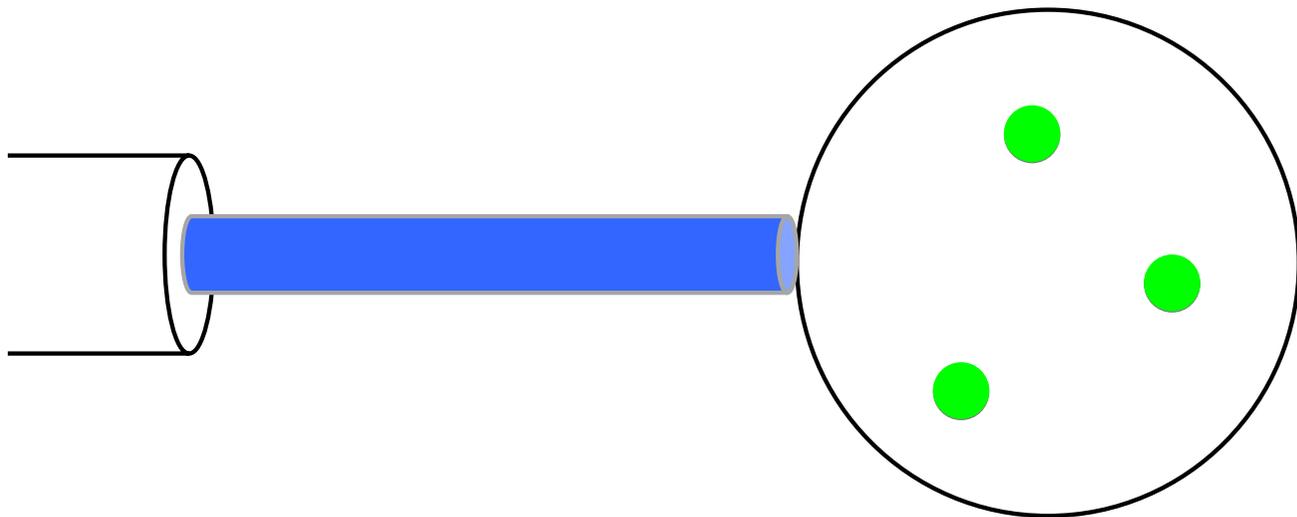
# Renouveler les microscopies grâce à la physique quantique :

1. voir avec de la matière au lieu de la lumière
2. voir en touchant
3. voir en arrachant
4. voir en faisant fluorer

# Renouveler les microscopies grâce à la physique quantique :

1. voir avec de la matière au lieu de la lumière
2. voir en touchant
3. voir en arrachant
4. voir en faisant fluorer

# La microscopie à fluorescence et confocale



Vertical text on the right side of the page, possibly a page number or label, oriented vertically.

# Microscopie à fluorescence, microscopie confocale

# La microscopie à fluorescence

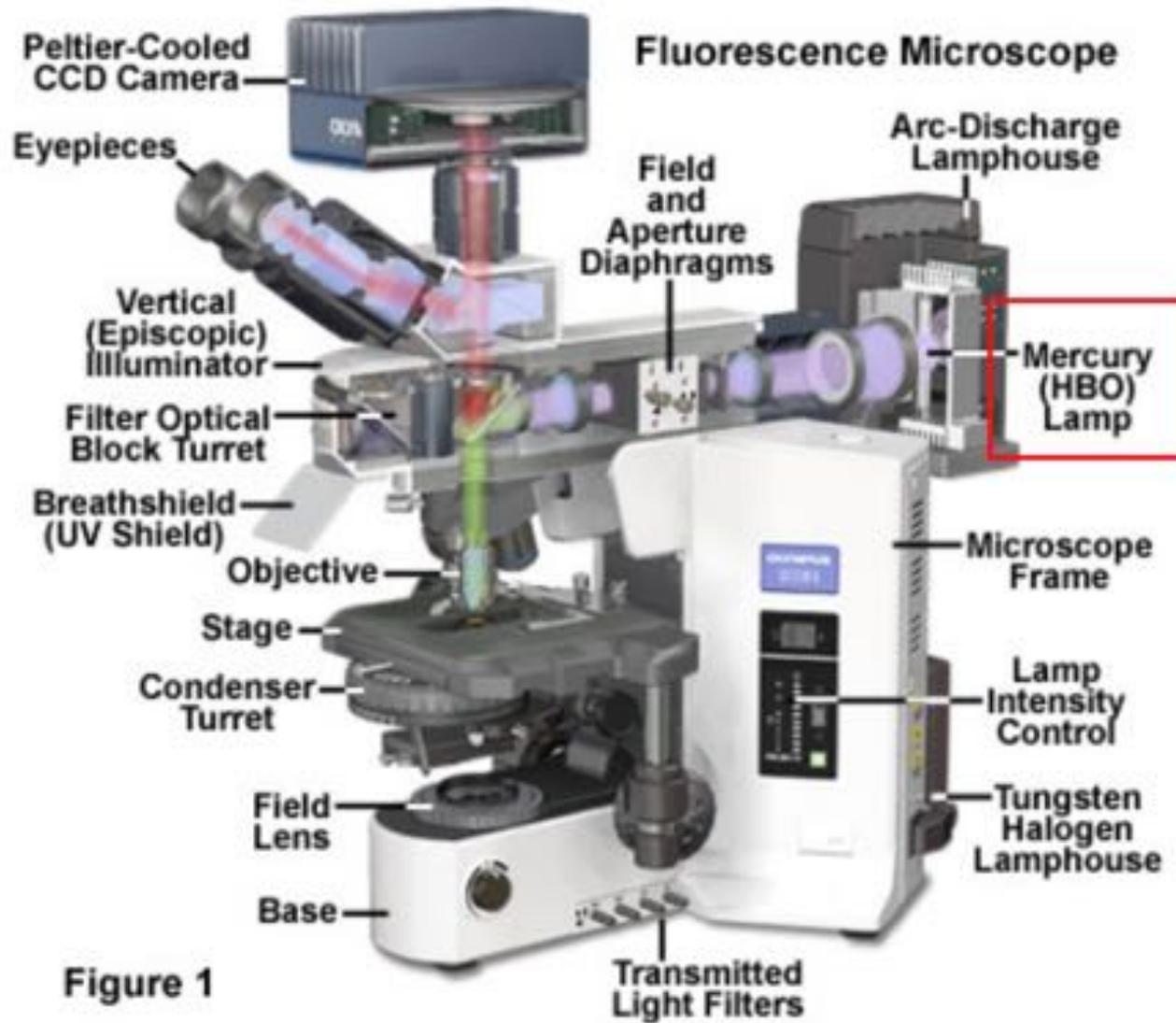


Figure 1

# qu'est-ce qui est fluorescent ?



la Green Fluorescent Protein

## The Nobel Prize in Chemistry 2008



Photo: U. Montan  
**Osamu Shimomura**  
Prize share: 1/3



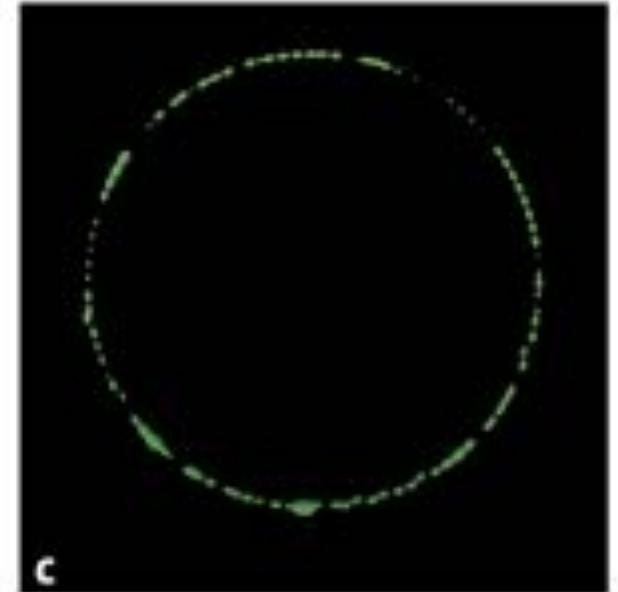
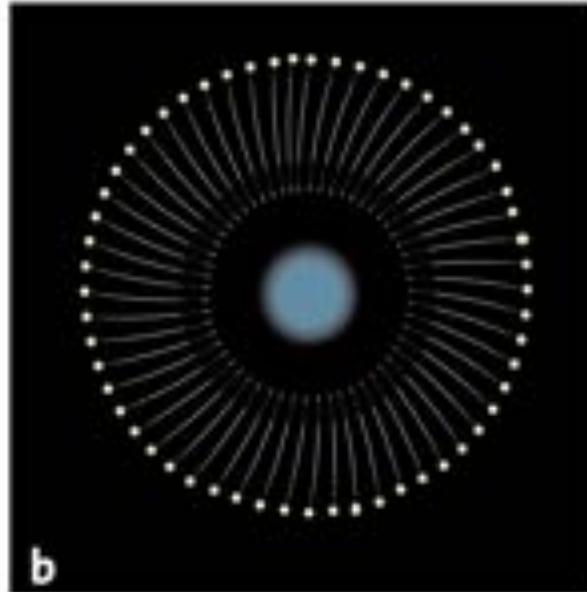
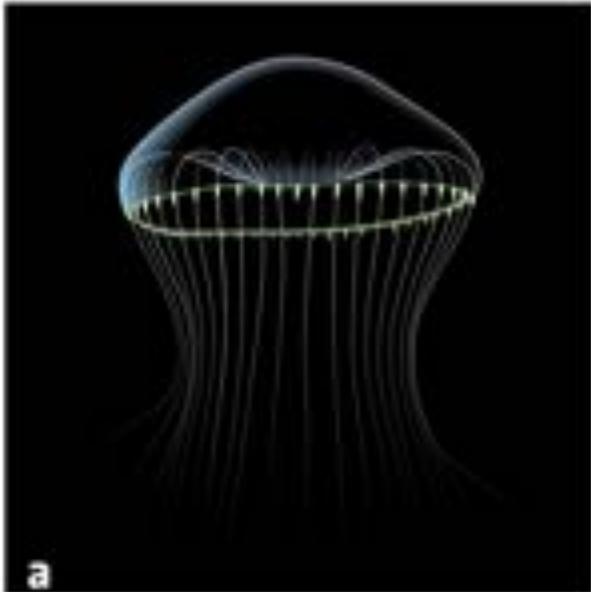
Photo: U. Montan  
**Martin Chalfie**  
Prize share: 1/3



Photo: U. Montan  
**Roger Y. Tsien**  
Prize share: 1/3

The Nobel Prize in Chemistry 2008 was awarded jointly to Osamu Shimomura, Martin Chalfie and Roger Y. Tsien *"for the discovery and development of the green fluorescent protein, GFP"*.

la GFP « green fluorescent protein » fluore en vert sous UV : dans les méduses Aequorea Victoria



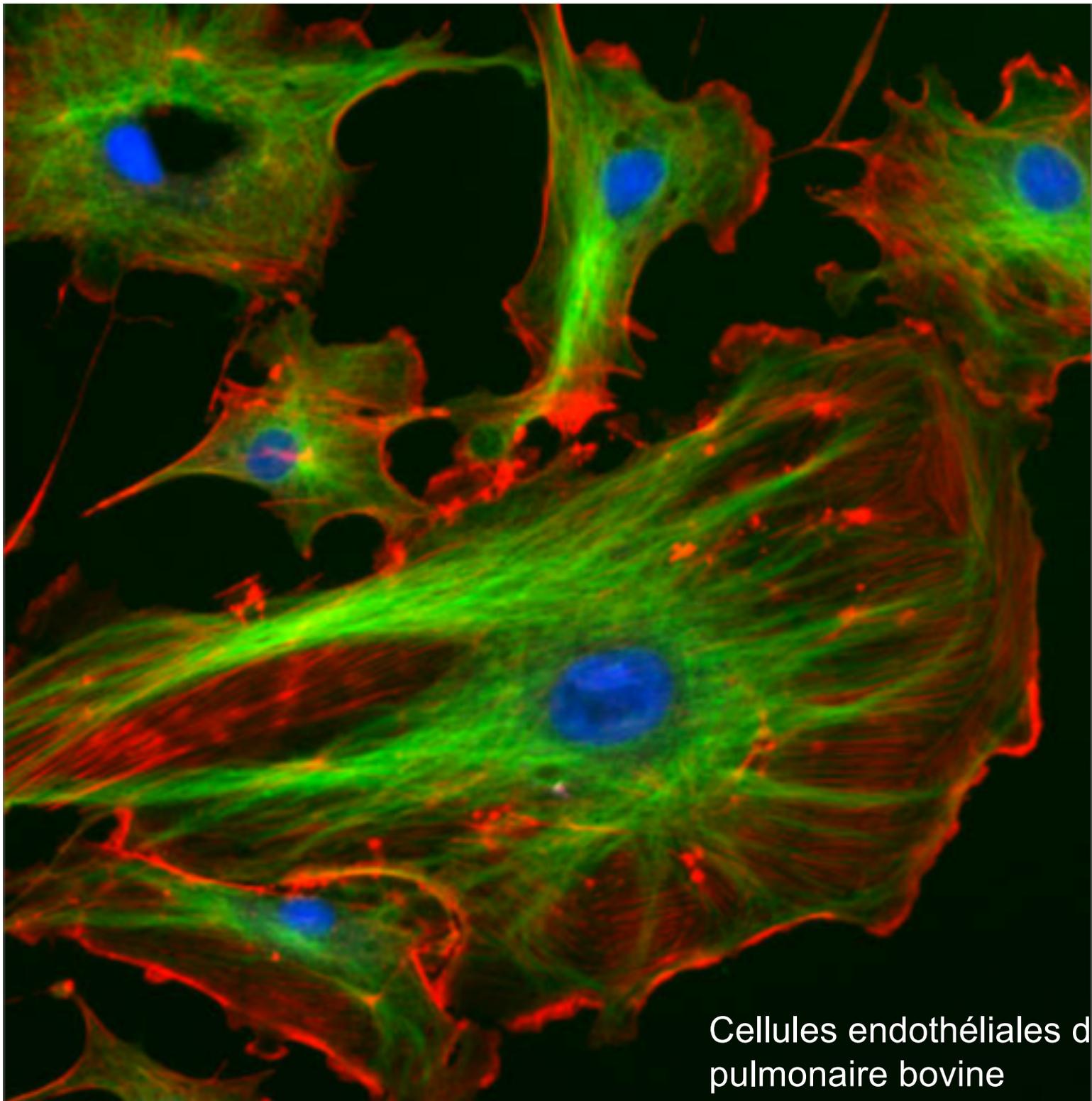
*The jellyfish Aequorea victoria lives in the sea off the west coast of North America (a). The jellyfish's bioluminescent organ is located along the edge of the "umbrella" (b and c).*

On peut connecter la GFP à des protéines spécifiques pour les suivre, comme une lanterne.

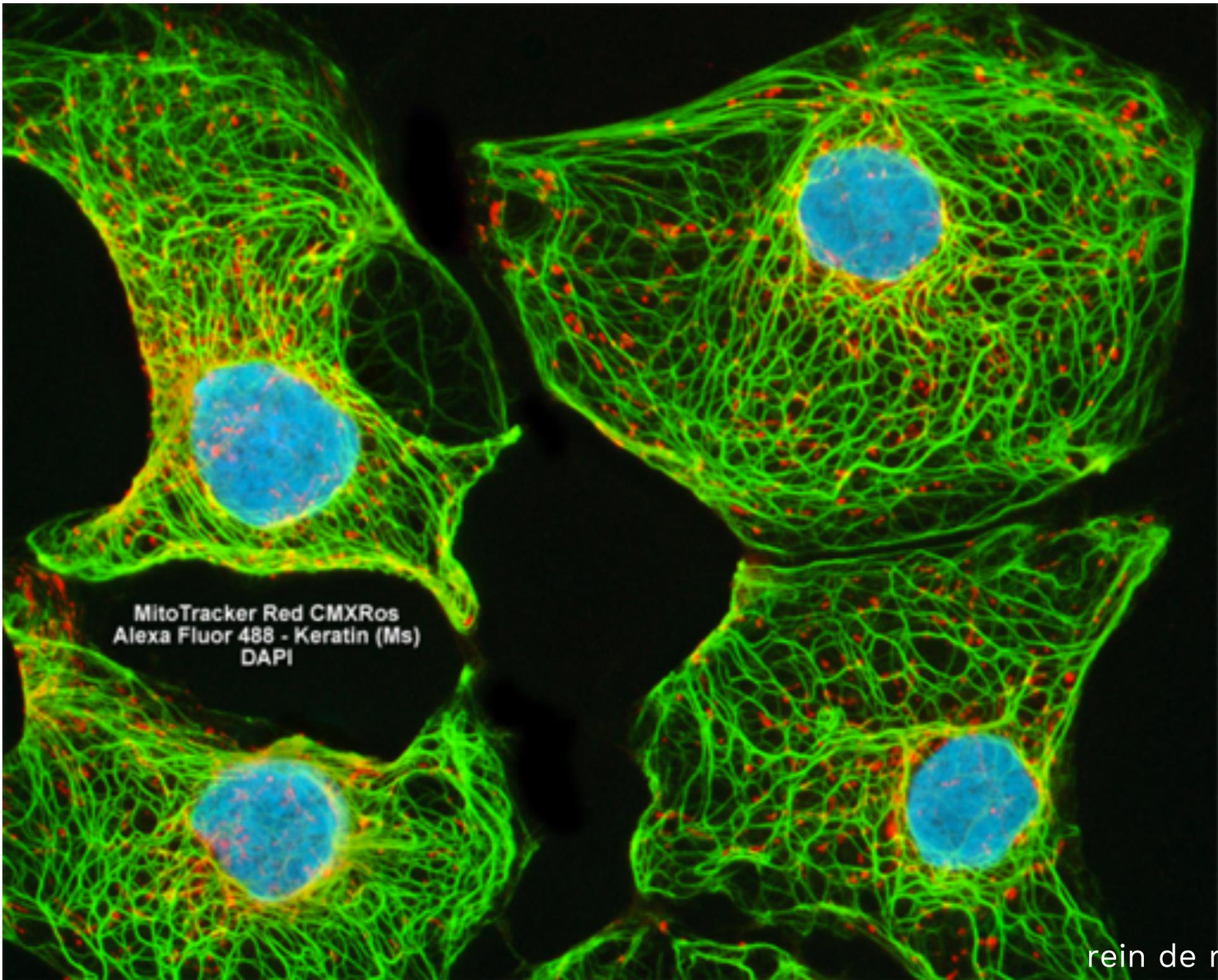
on peut même colorer différemment les GFP  
et donc repérer différentes protéines et  
cellules



*Researchers at Harvard University in the USA have coloured the nerve cells in a mouse's brain so that it fluoresces in all the colours of the rainbow. The nerve cells produce different amounts of three GFP-like proteins that fluoresce yellow, cyan and red, mimicking the colours used in a printer. This enables researchers to see how individual nerve cells in the brain are woven together in a network. Photo: Livet et al (2007) Nature 450 56-63.*



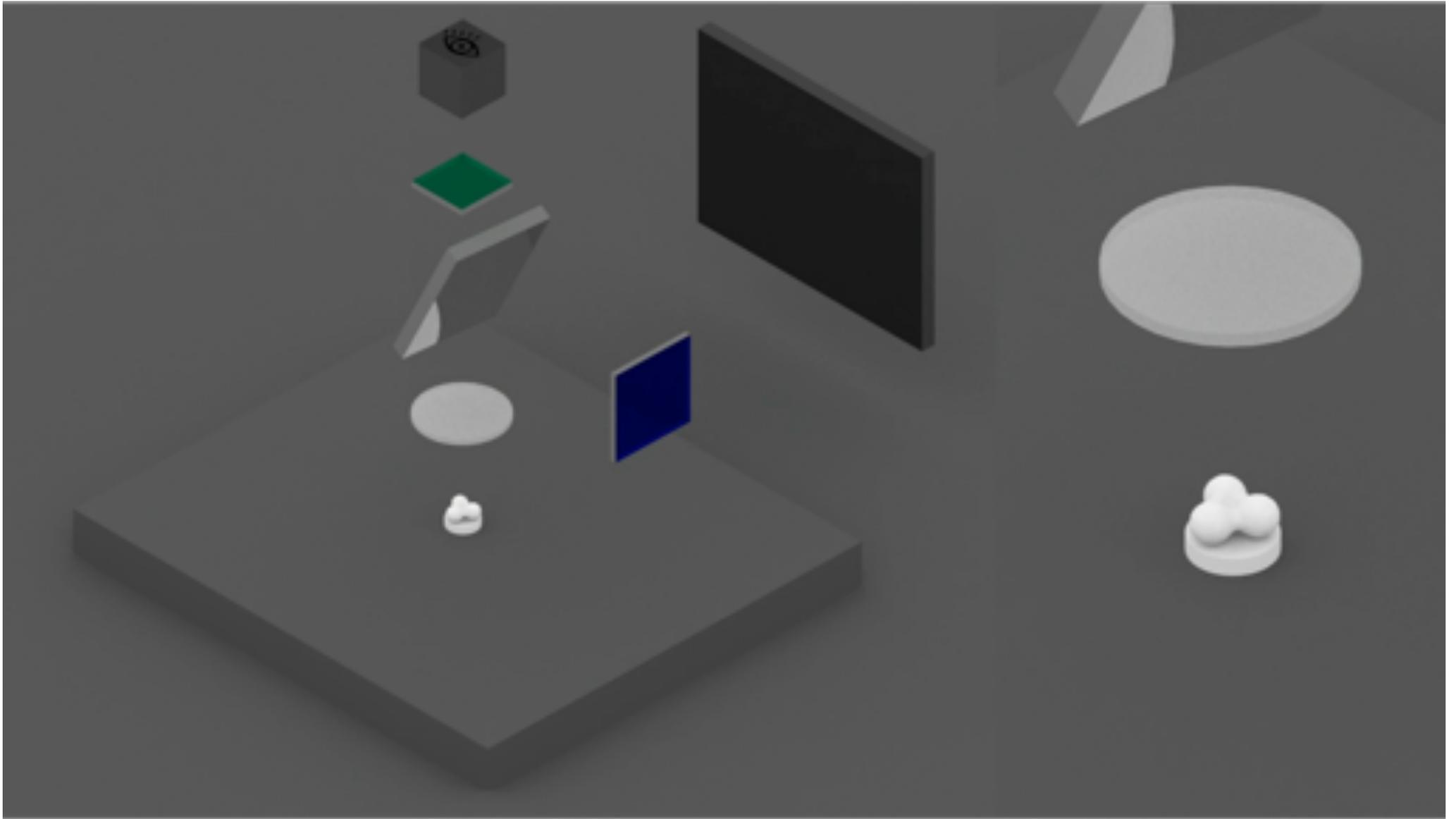
Cellules endothéliales de  
pulmonaire bovine



MitoTracker Red CMXRos  
Alexa Fluor 488 - Keratin (Ms)  
DAPI

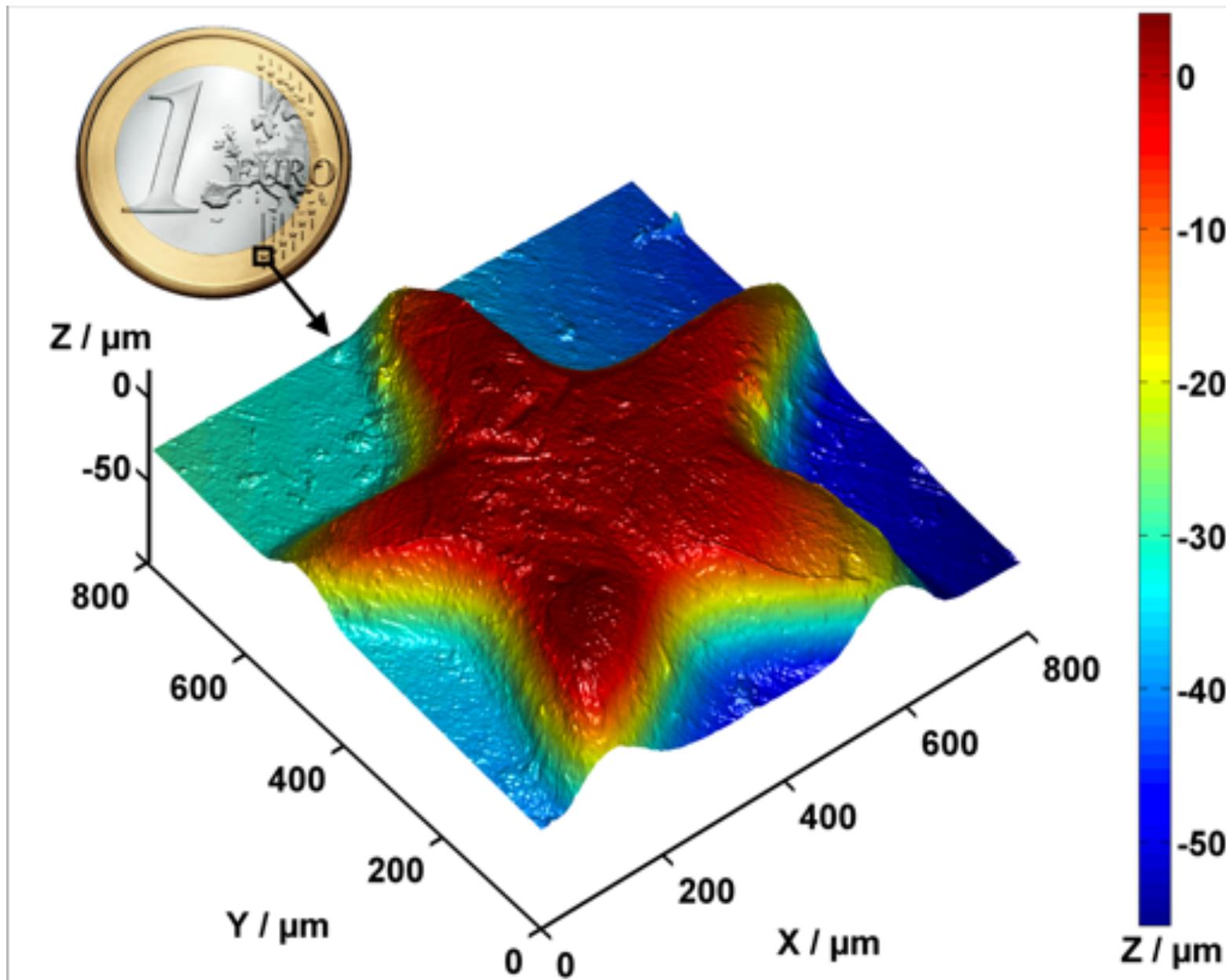
rein de r

une amélioration pour voir en 3D : le  
confocal



[www.toutestquantique.fr](http://www.toutestquantique.fr)

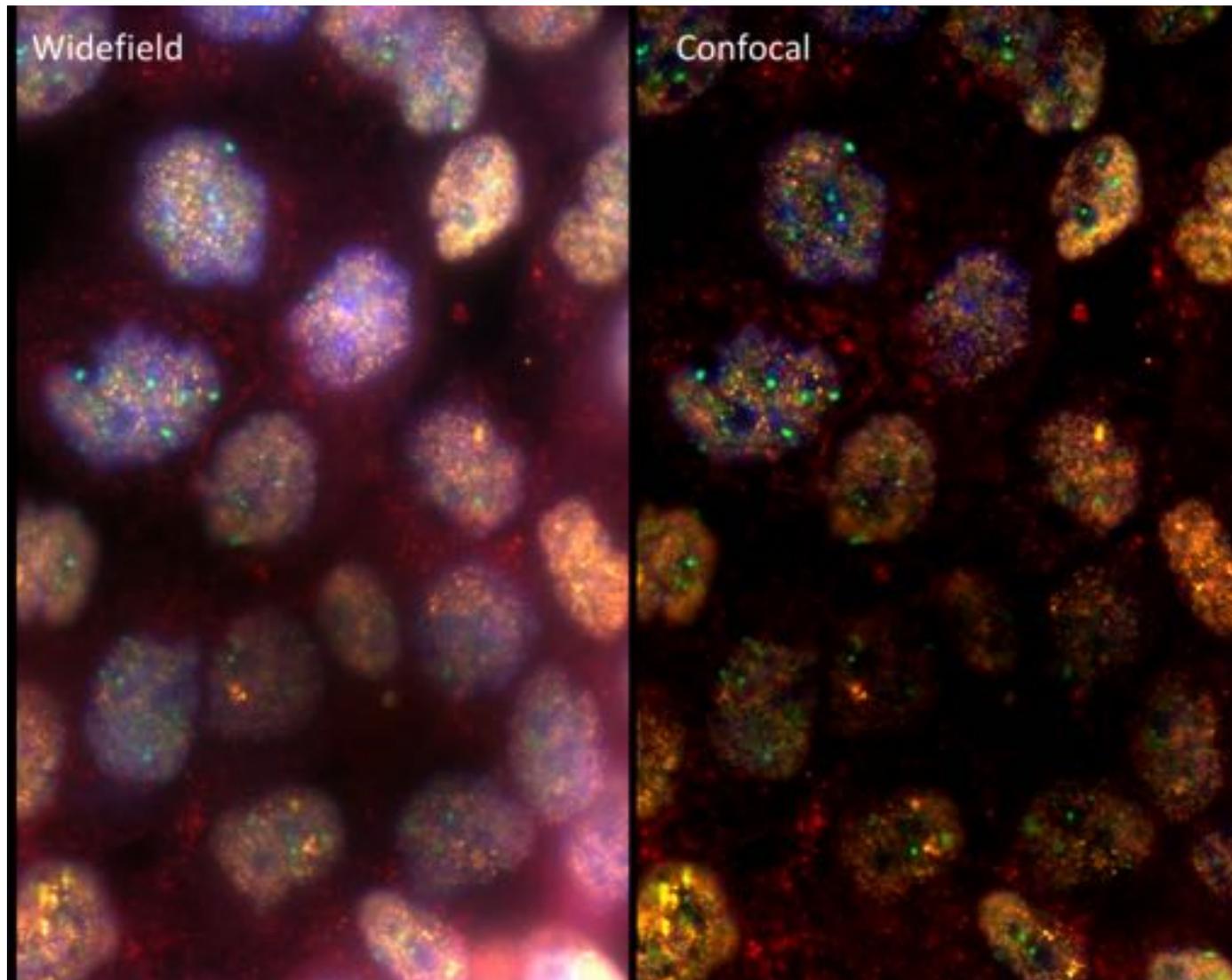
<https://www.youtube.com/watch?v=-HwG98CUpUc>



mesure par confocal sur une pièce de 1 euro

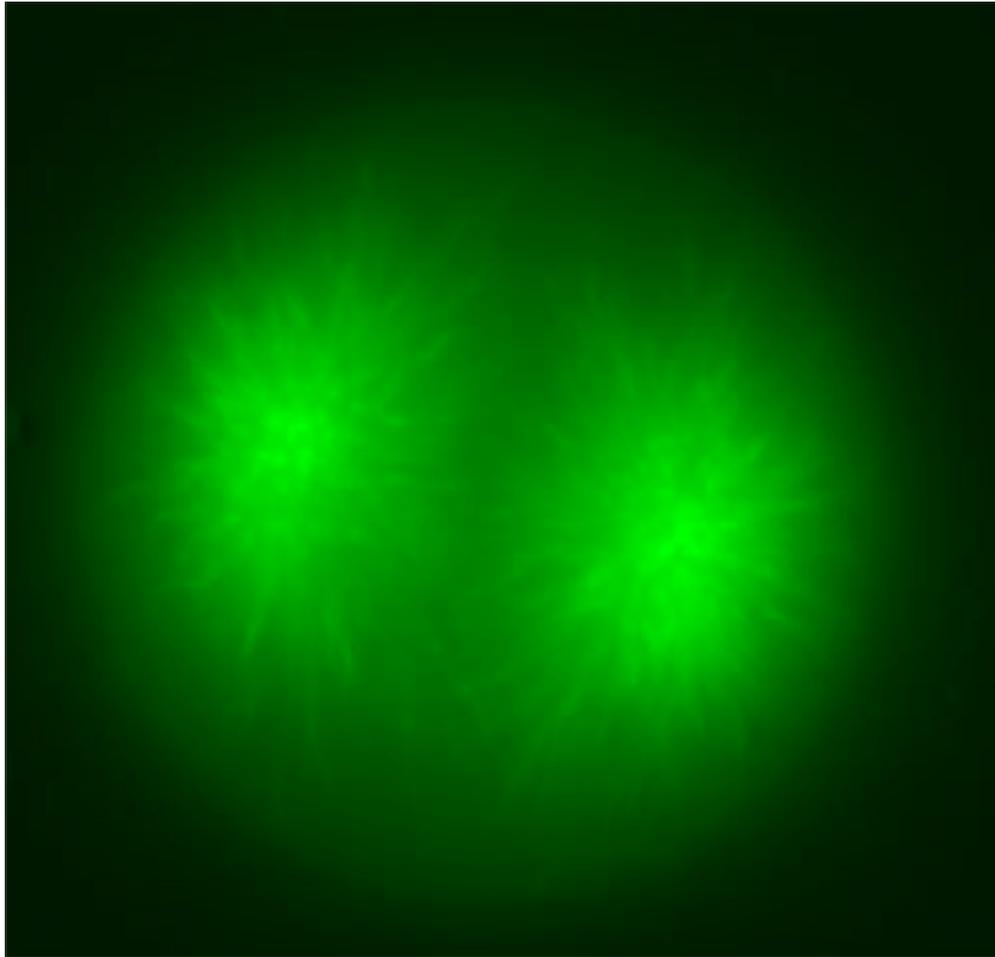
non confocal

confocal

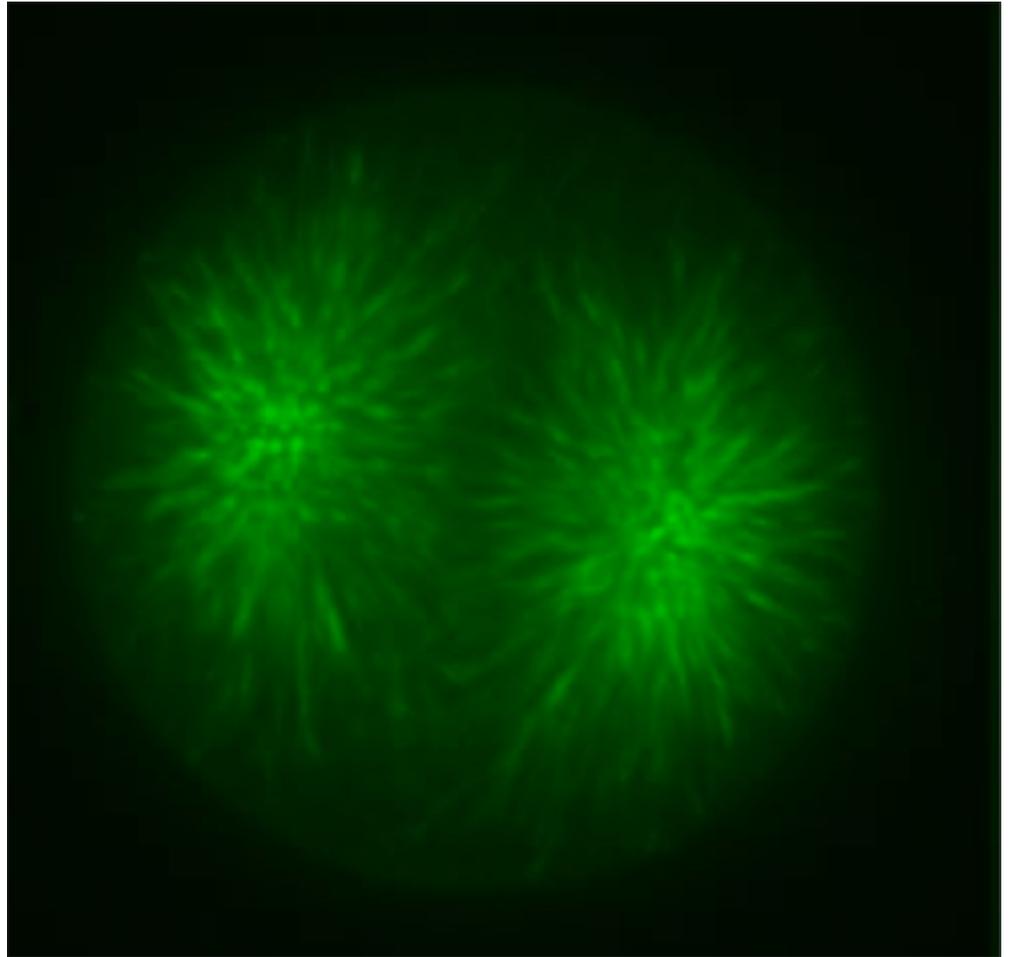


Cells with histones

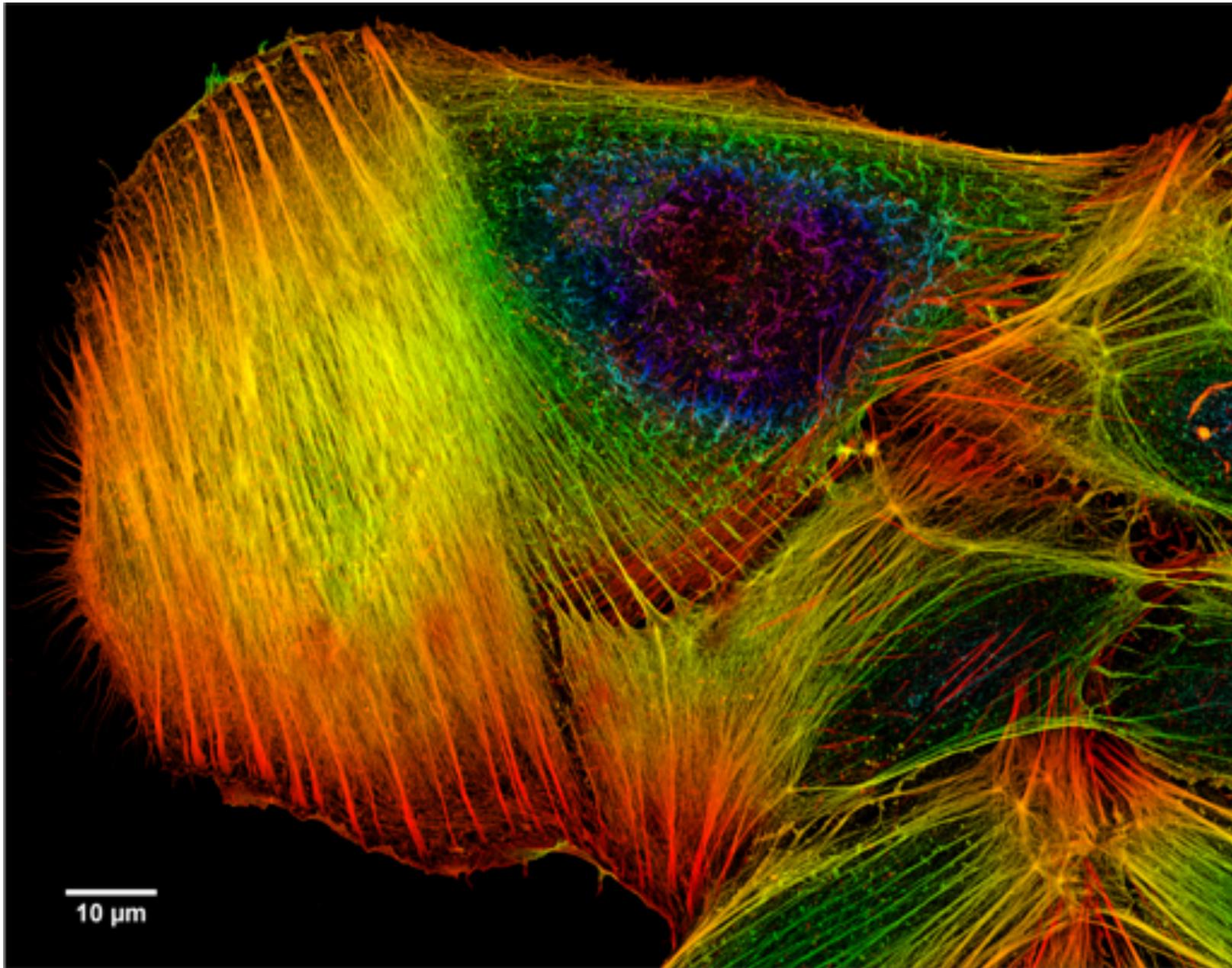
non confocal



confocal



microtubules



filaments d'actine dans une cellule cancéreuse

# Clivage d'embryons unicellulaires de souris



un exemple de recherche récente  
avec un microscope à fluorescence :  
la microscopie super-résolue  
(STED, PALM, ...)



The Nobel Prize in Chemistry 2014

Eric Betzig, Stefan W. Hell, William E. Moerner

Show in:

## The Nobel Prize in Chemistry 2014



Photo: A. Stenlund

**Eric Betzig**

Prize share: 1/3



Photo: A. Stenlund

**Stefan W. Hell**

Prize share: 1/3



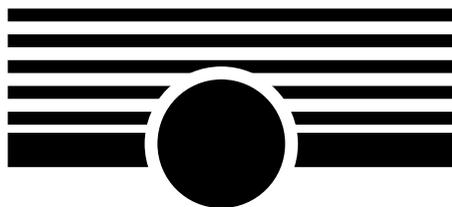
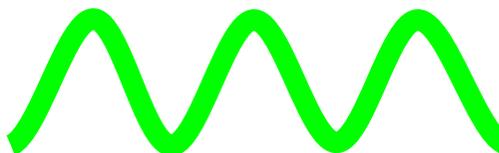
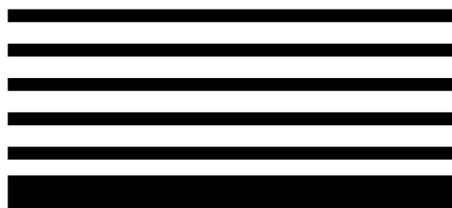
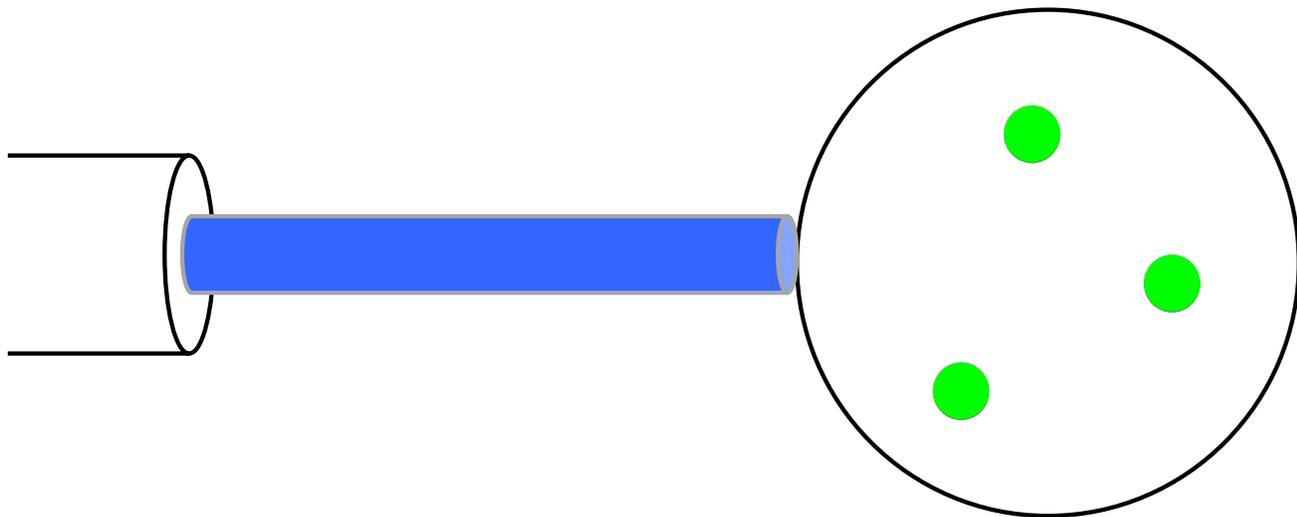
Photo: A. Stenlund

**William E. Moerner**

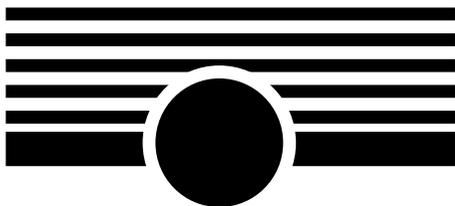
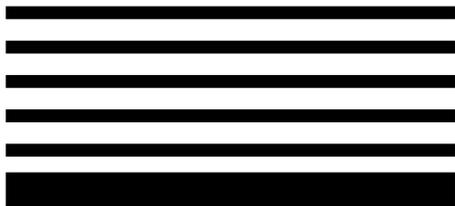
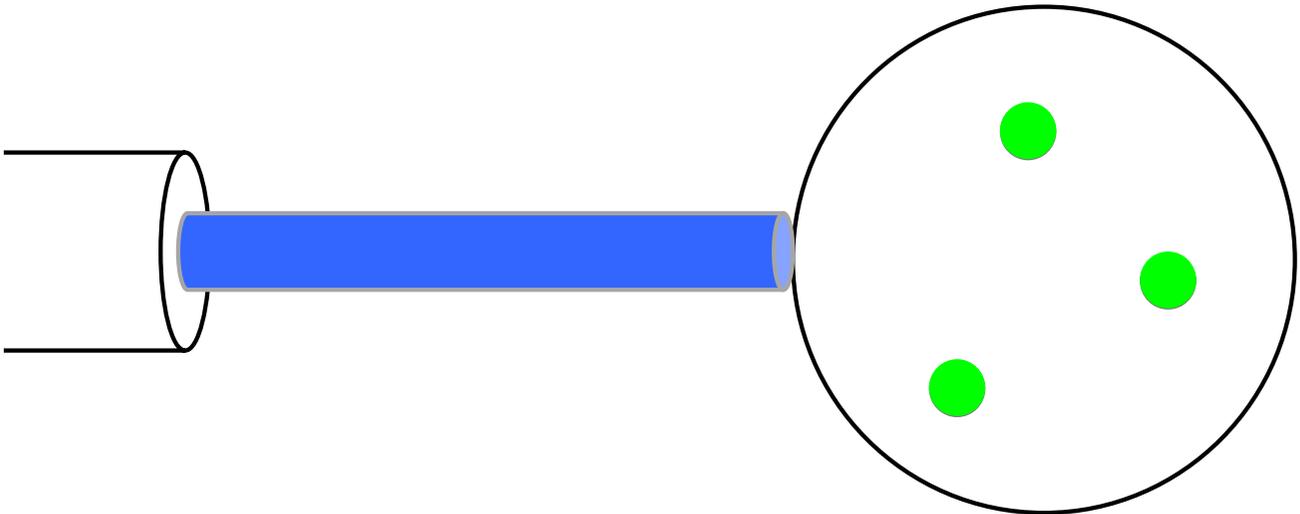
Prize share: 1/3

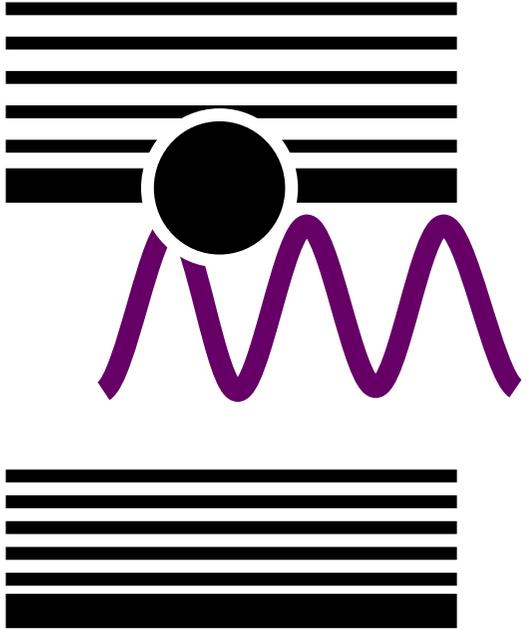
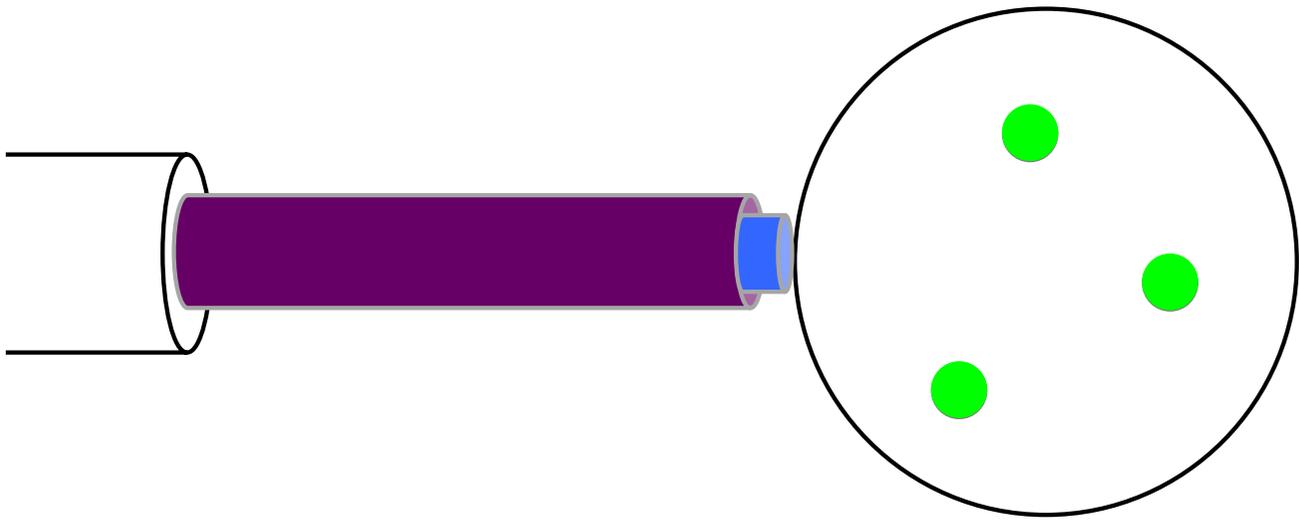
The Nobel Prize in Chemistry 2014 was awarded jointly to Eric Betzig, Stefan W. Hell and William E. Moerner "for the development of super-resolved fluorescence microscopy".

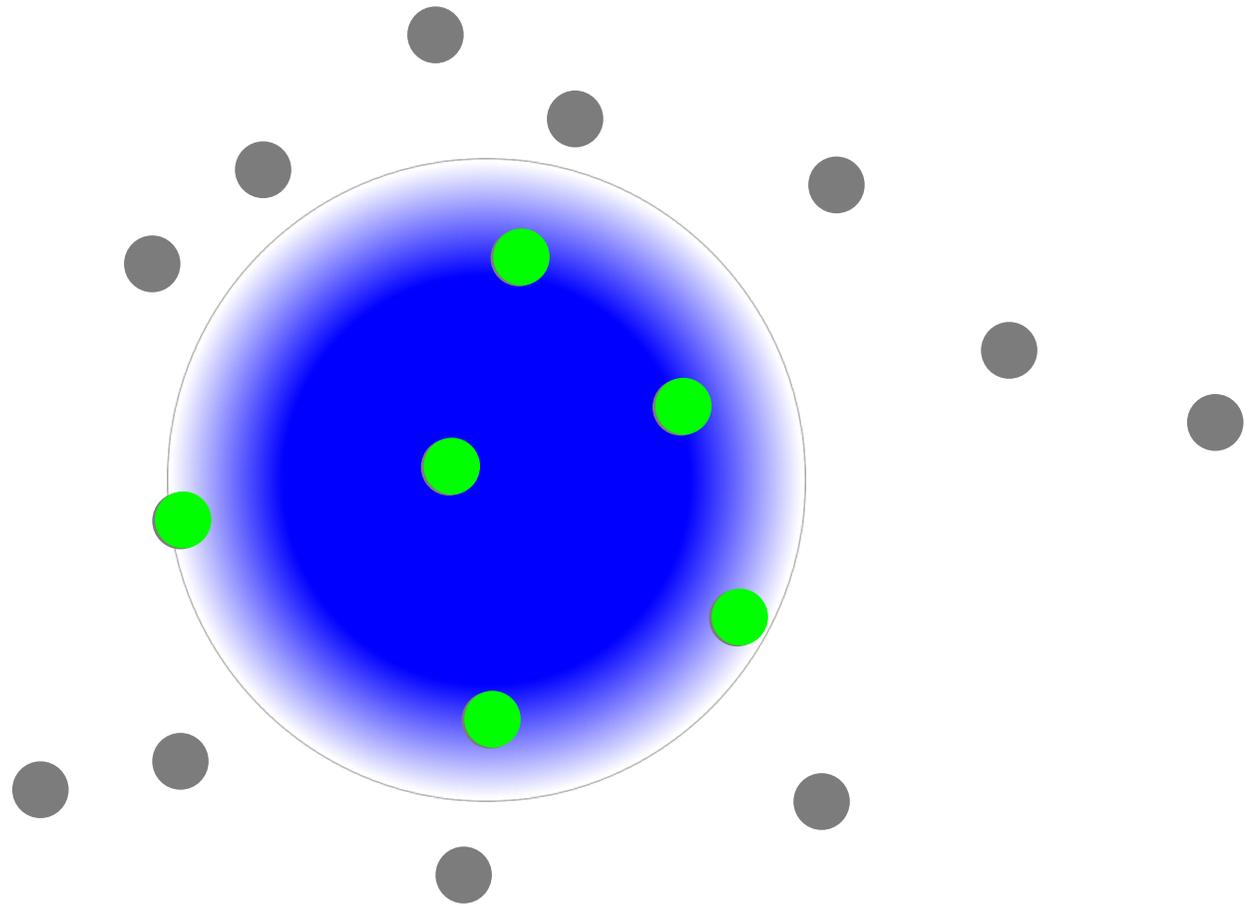
# La microscopie STED

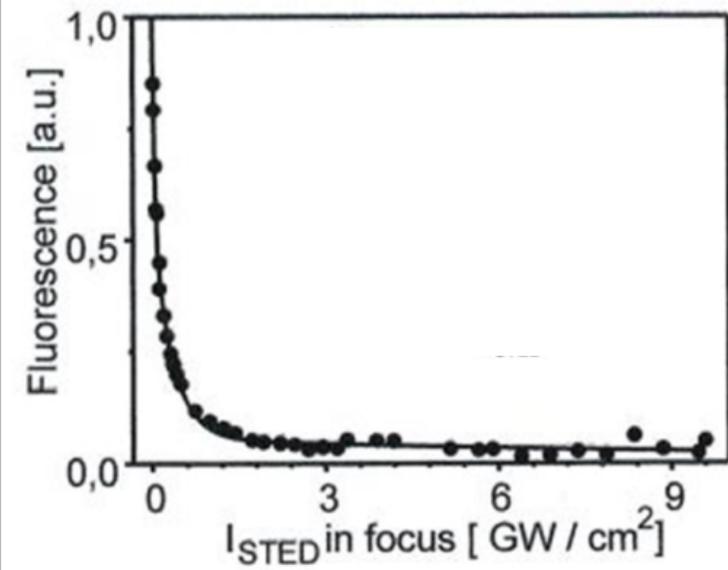
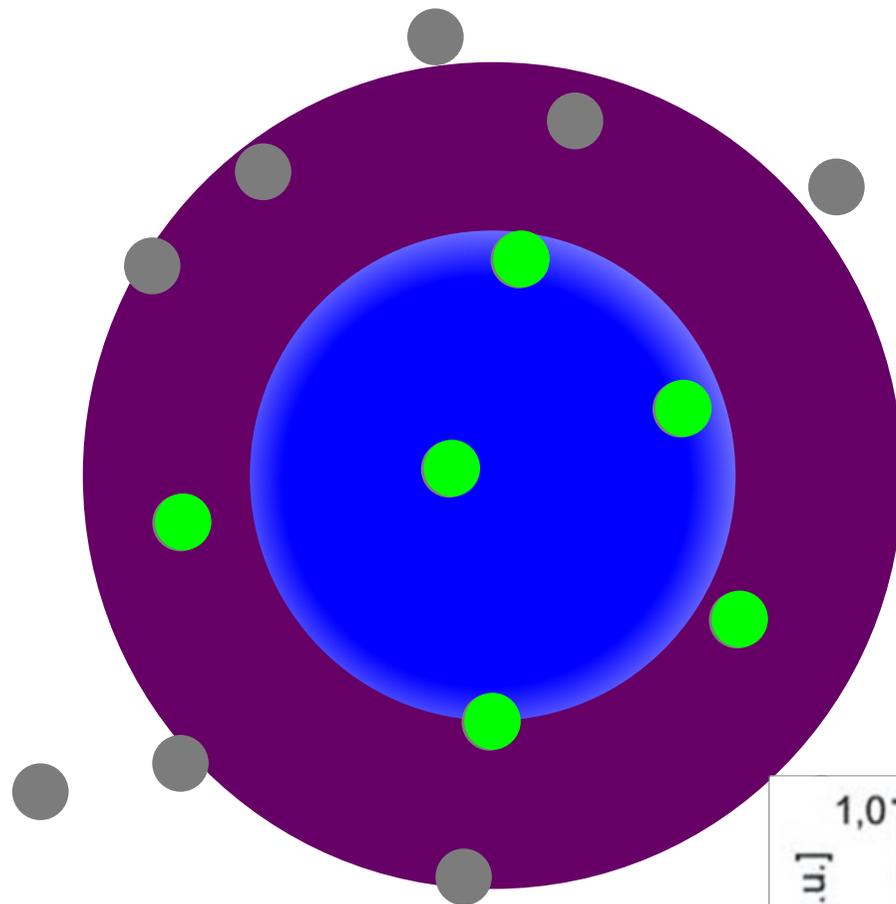


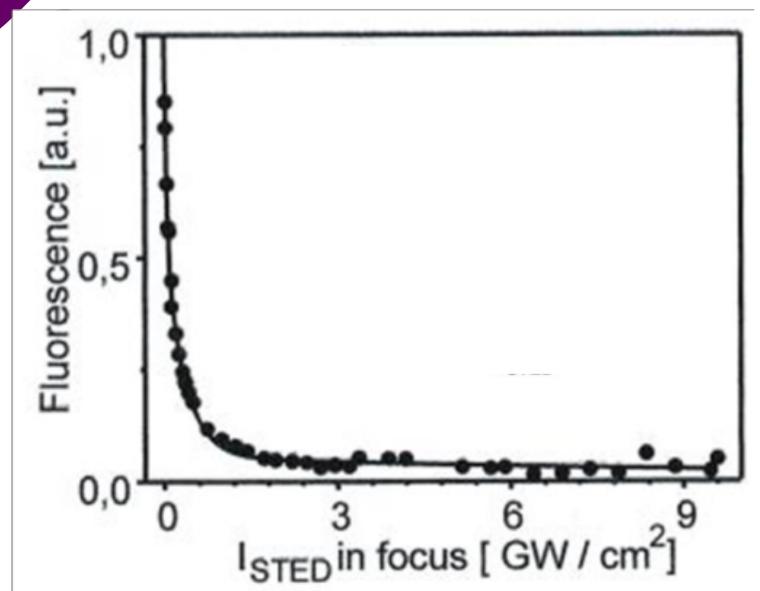
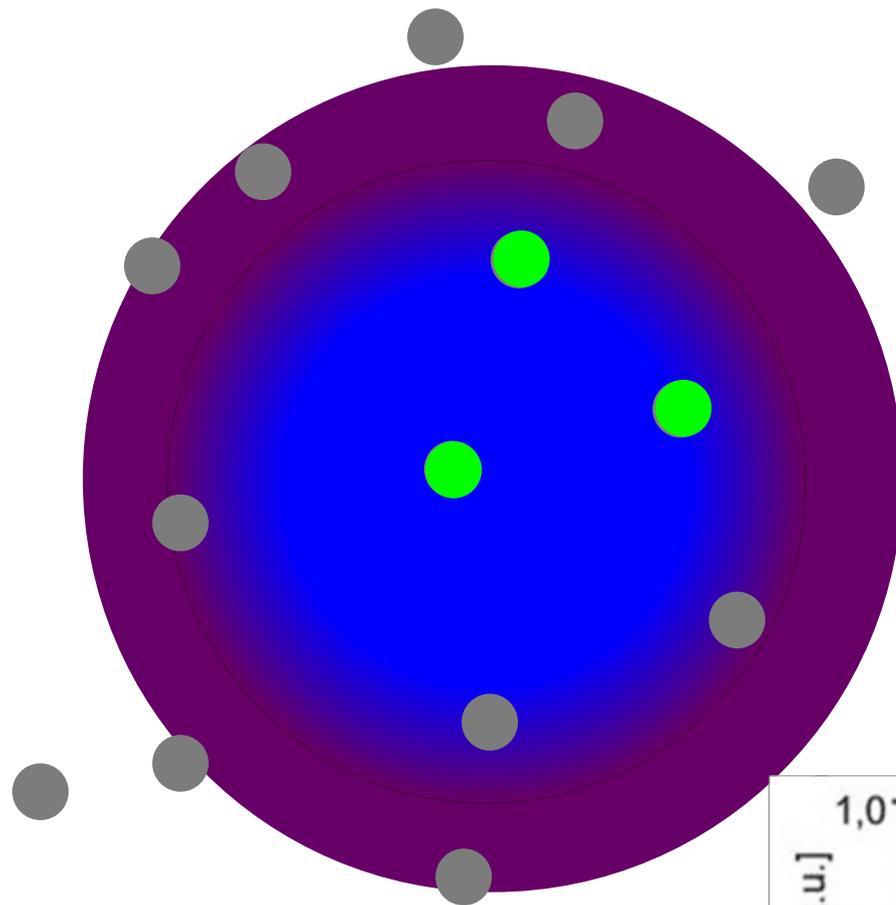
Vertical text on the right side of the page, possibly a page number or label.

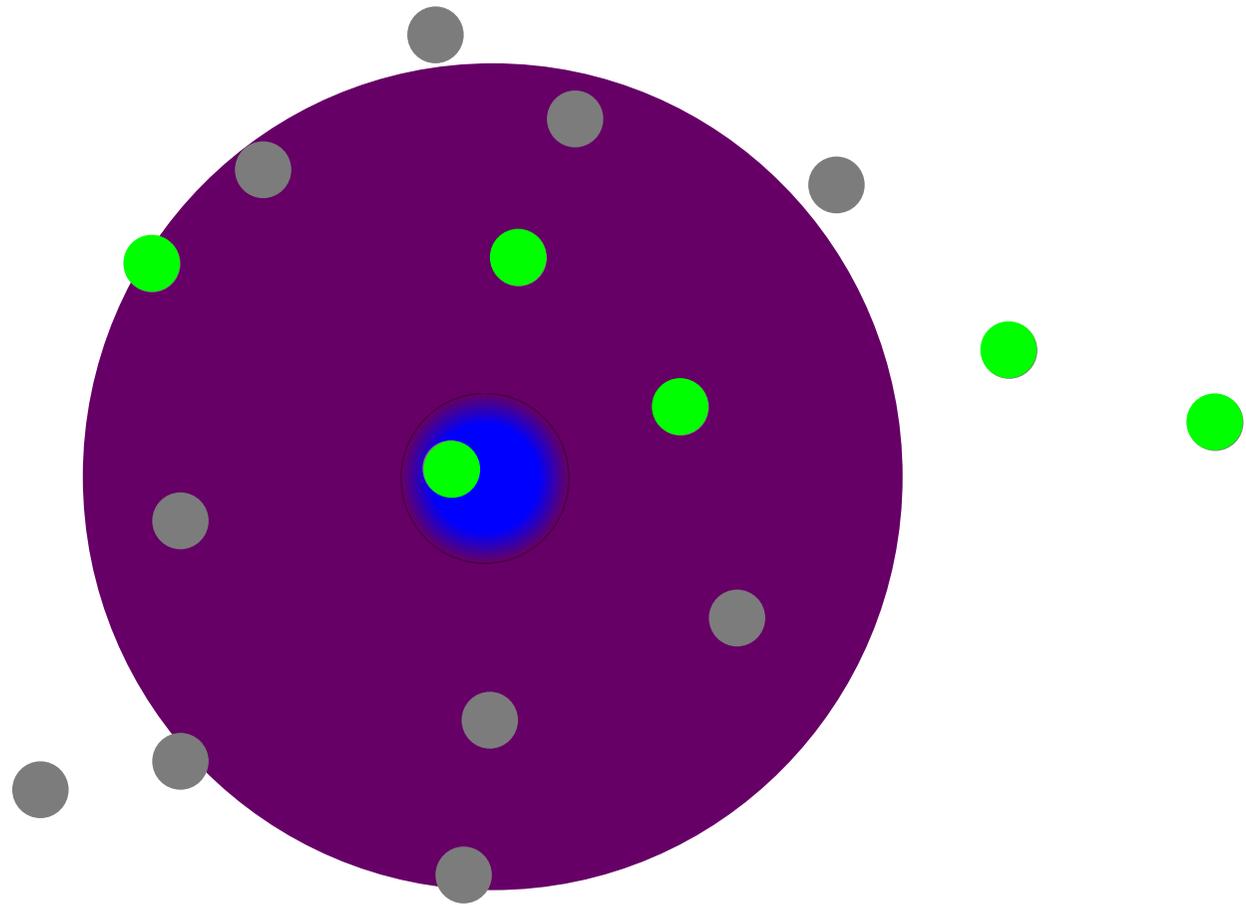




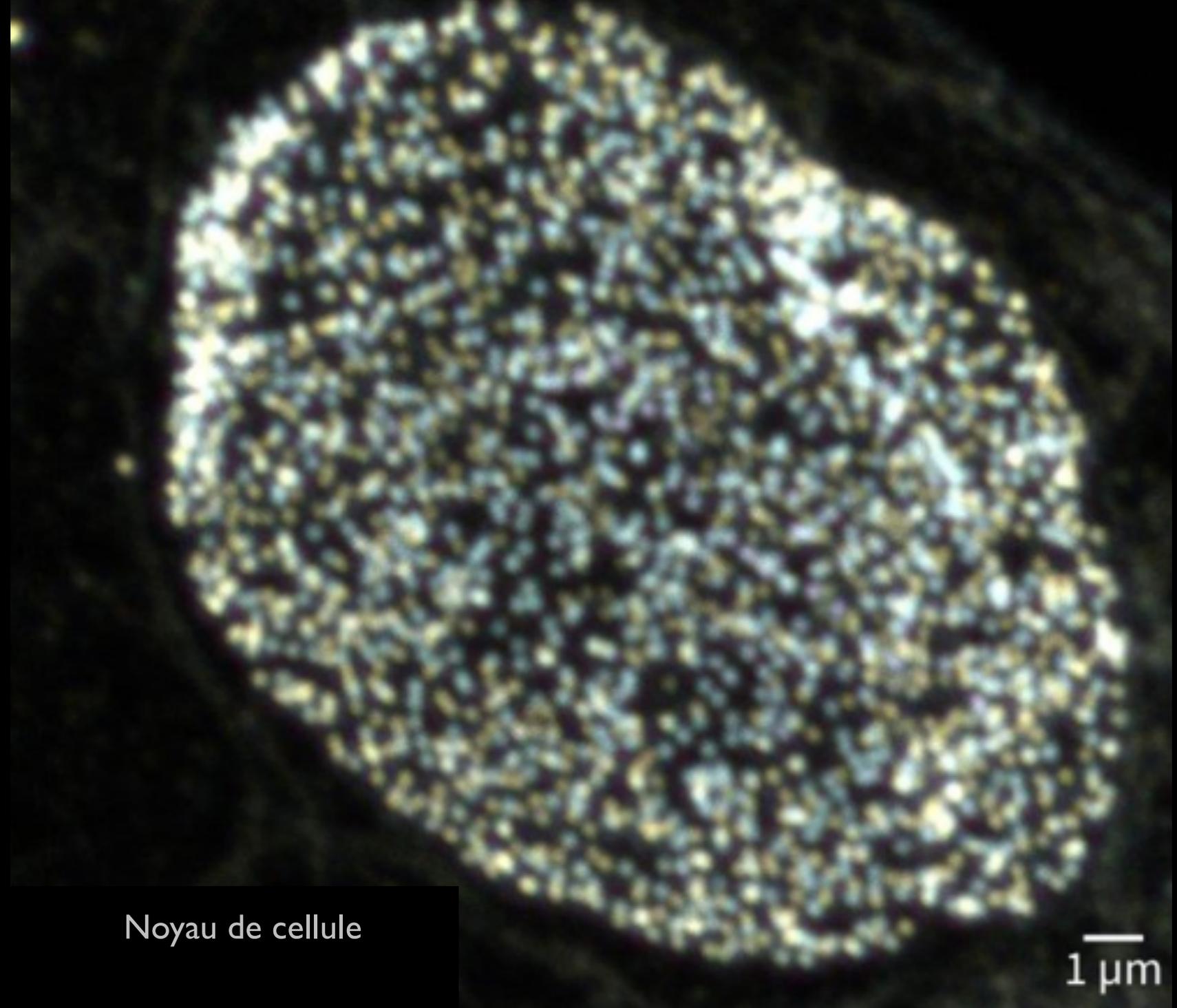








Confocal



Noyau de cellule

1  $\mu$ m

easy3D STED



Noyau de cellule

1  $\mu\text{m}$

@Abberior inst.

# Les nouveaux microscopes

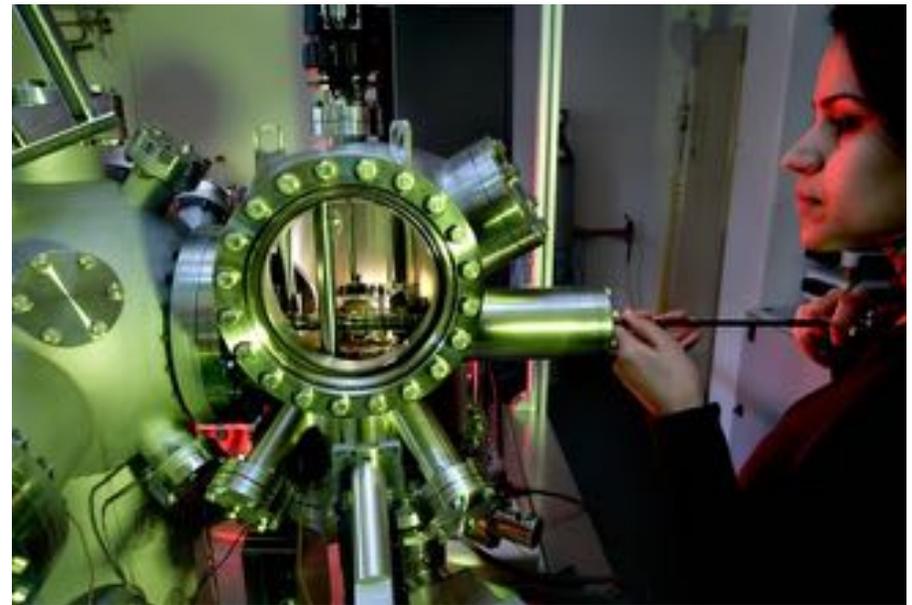
- les échelles
- quatre microscopies modernes  
*(une par groupe)*
- La question de l'image

# La question de l'image

# voit-on vraiment des atomes avec ces nouveaux microscopes?



microscope optique

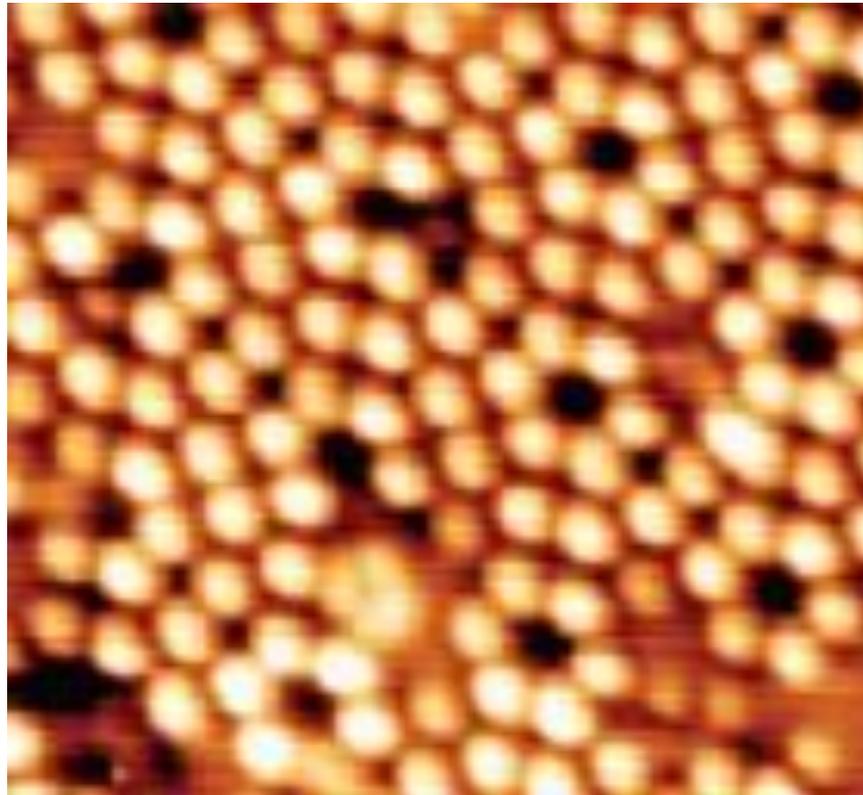


microscope à effet tunnel

# le microscope à effet tunnel

On ne pourra pourtant *jamais* voir des atomes avec nos yeux.

Les atomes sont-ils « réels » ?



la première image d'atomes par STM (1982)

et maintenant :

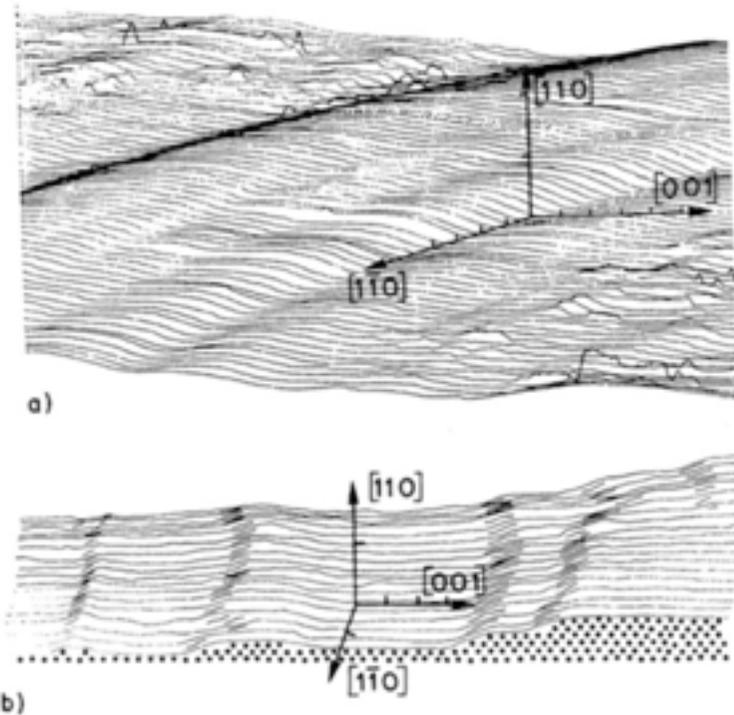
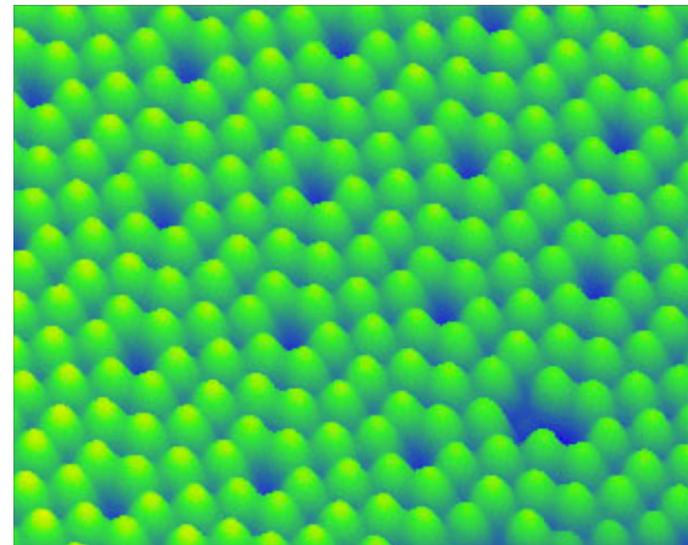
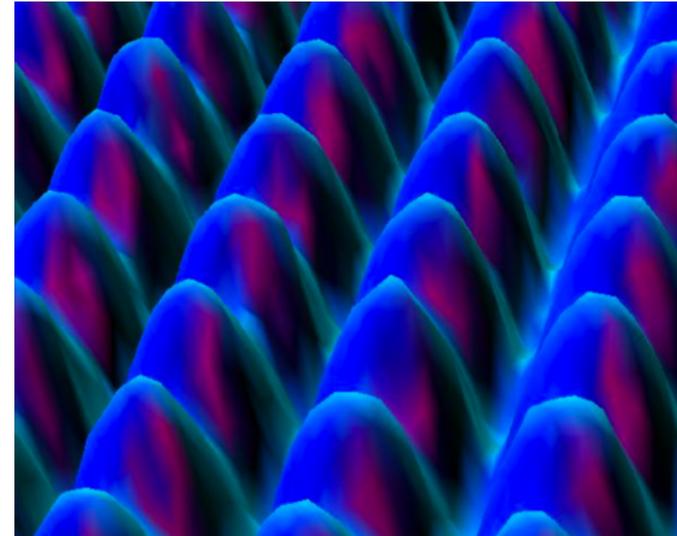


FIG. 3. Two examples of scanning tunneling micrographs of a Au (110) surface, taken at (a) room temperature, and (b) 300°C after annealing for 20 h at the same temperature (and essentially constant work function). The sensitivity is 10 Å/div everywhere. Because of a small thermal drift, there is some uncertainty in the crystal directions in the surface. In (a), the surface is gently corrugated in the  $[001]$  direction, except for a step of four atomic layers ( $\cong 2$  atomic radii) along the  $[1\bar{1}0]$  direction, as indicated by the discontinuity of the shaded ribbon. The steps in (b), which were always found along the  $[1\bar{1}0]$  direction, are visualized by the possible positions of the Au atoms (dots).



Un nouvel outil scientifique est jugé :

- sur sa robustesse et ses performances dans le temps
- si il est compatible avec d'autres théories/instruments/procédures
- si il permet des avancées dans d'autres domaines que celui dont il est issu (biologie, physique des matériaux, chimie...)
- si il améliore les connaissances

Le microscope à effet tunnel ne « voit » pas les atomes, mais permet d'intervenir, de mesurer, de manipuler les atomes.