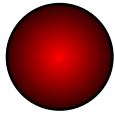


Découvertes Récentes en physique : de l'atome au solide quantique

J. Bobroff, Univ. Paris-Sud

résumé

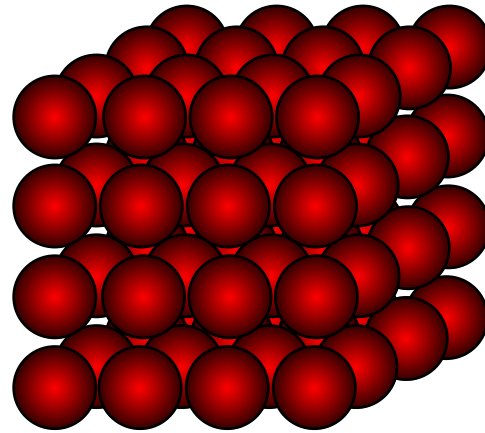
l'atome



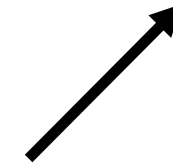
physique
quantique



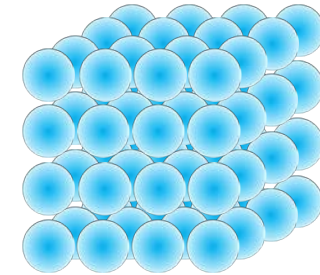
physique des
solides



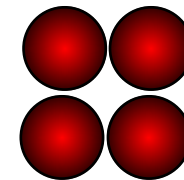
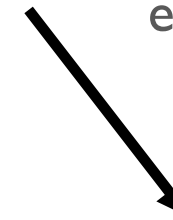
physique classique
mais propriétés
compréhensibles
seulement avec la quantique



technologies
quantiques

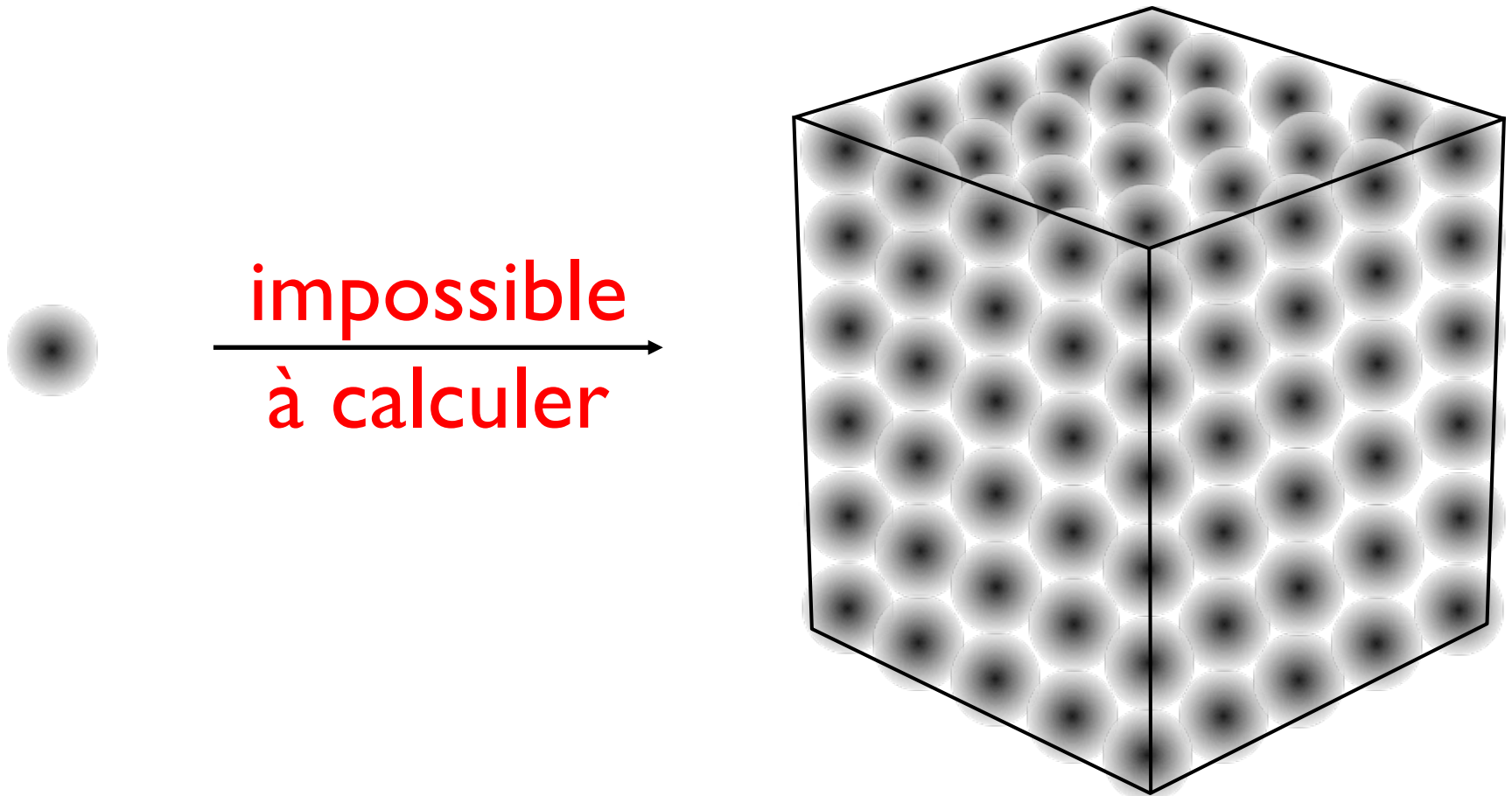


basses températures :
effets quantiques collectifs

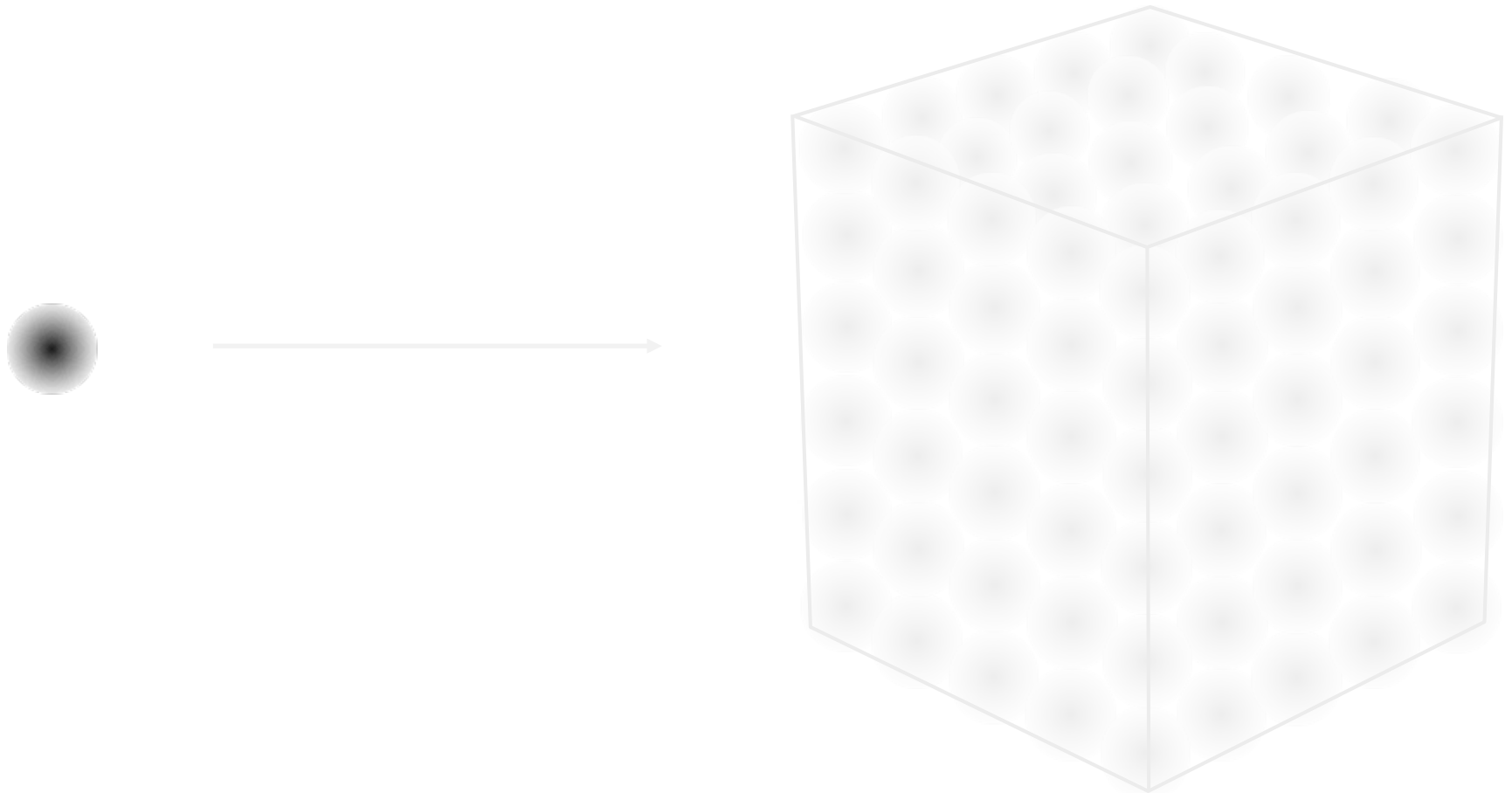


nanophysique :
retour à la quantique

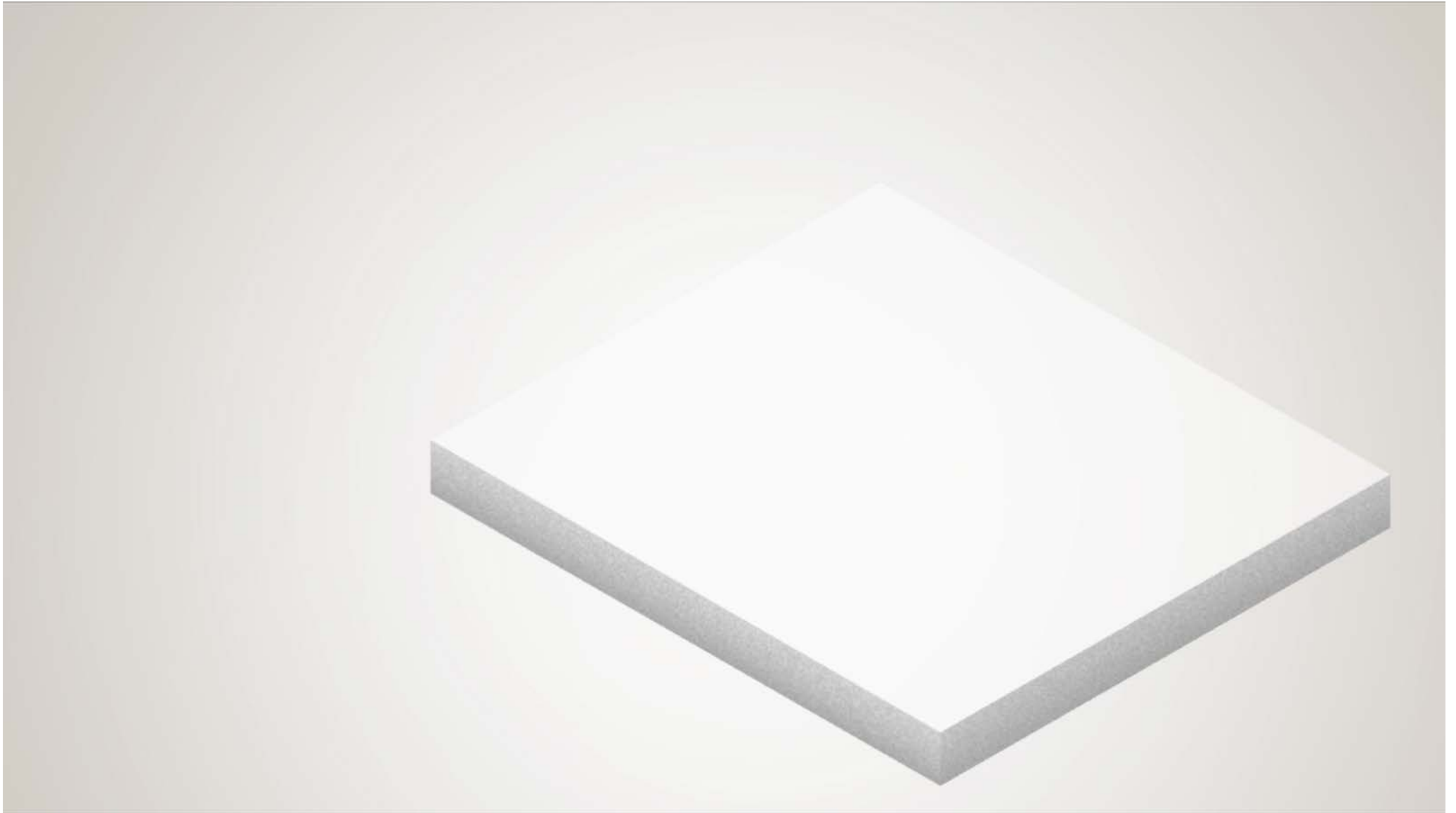
de l'atome au solide quantique



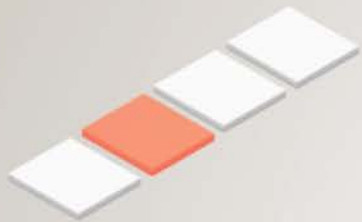
de **l'atome** au solide quantique



L'atome



La quantification



QUANTIFICATION



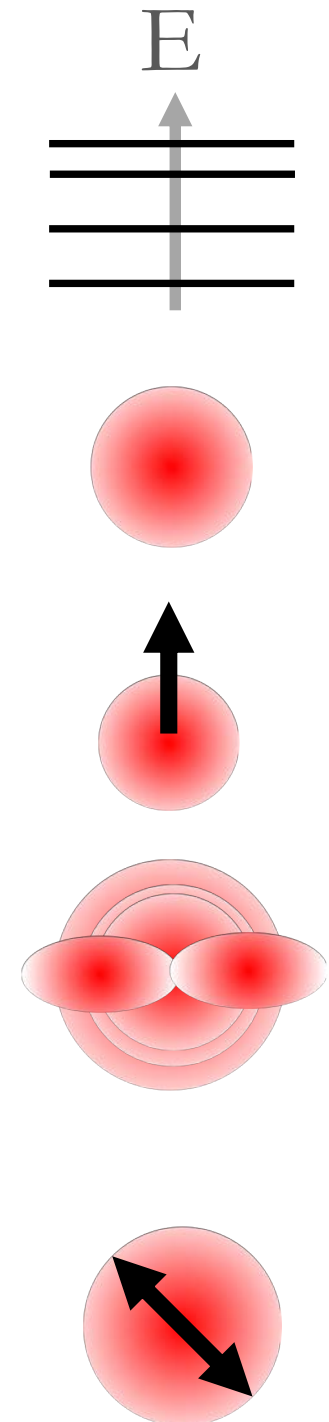
La quantique dans un atome

- quantification des niveaux d'énergie
- les électrons ont une fonction d'onde quantique (orbitale) obéissant à l'équation de Schrödinger
- les électrons portent un spin
- principe d'exclusion de Pauli détermine l'empilement des orbitales
- principe d'Heisenberg détermine la taille

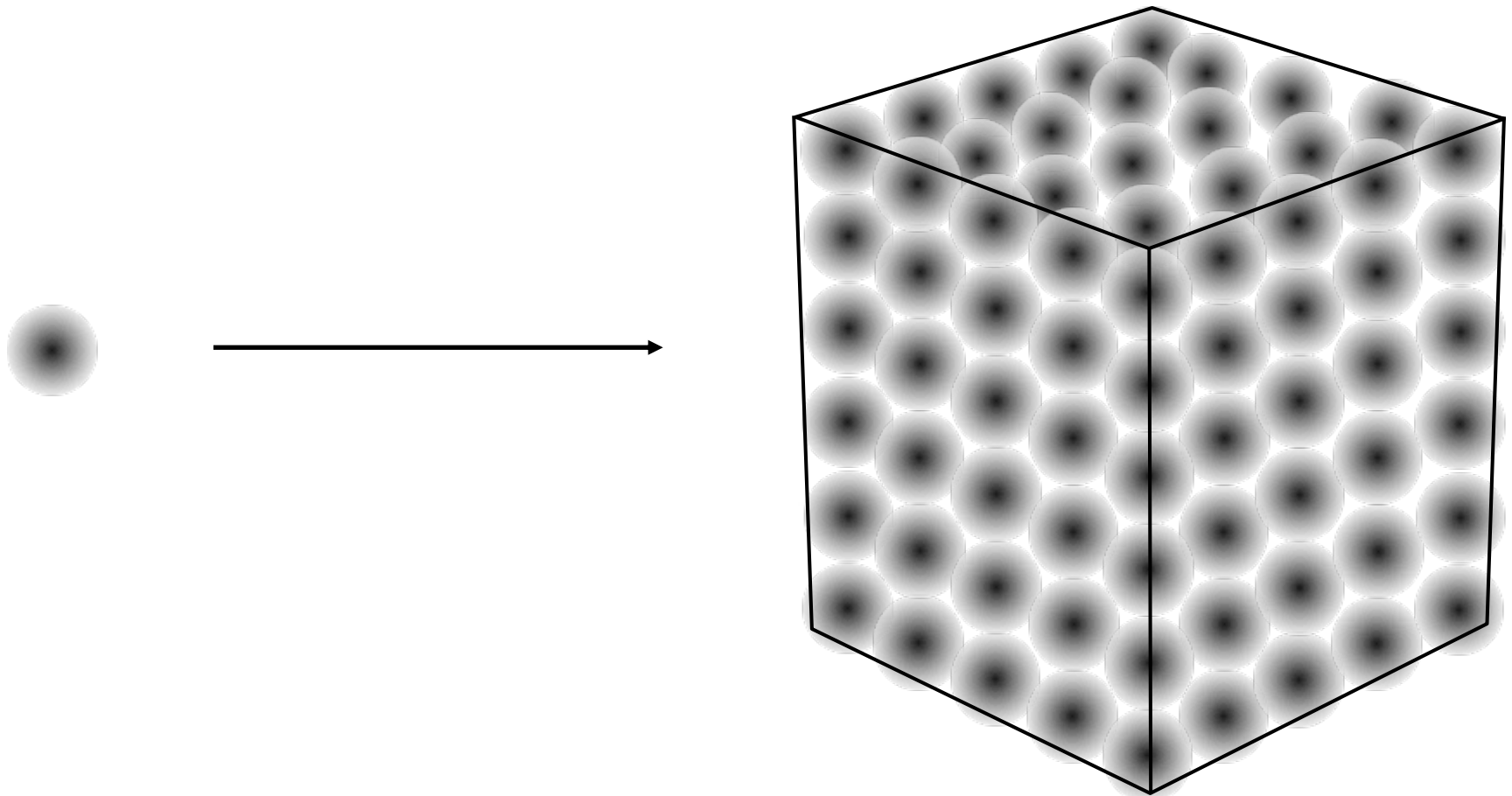
$$\Delta x \Delta p = \hbar \quad \text{d'où } E_{\text{cin}} = \frac{p^2}{2m} = \frac{\hbar^2}{2mr^2}$$

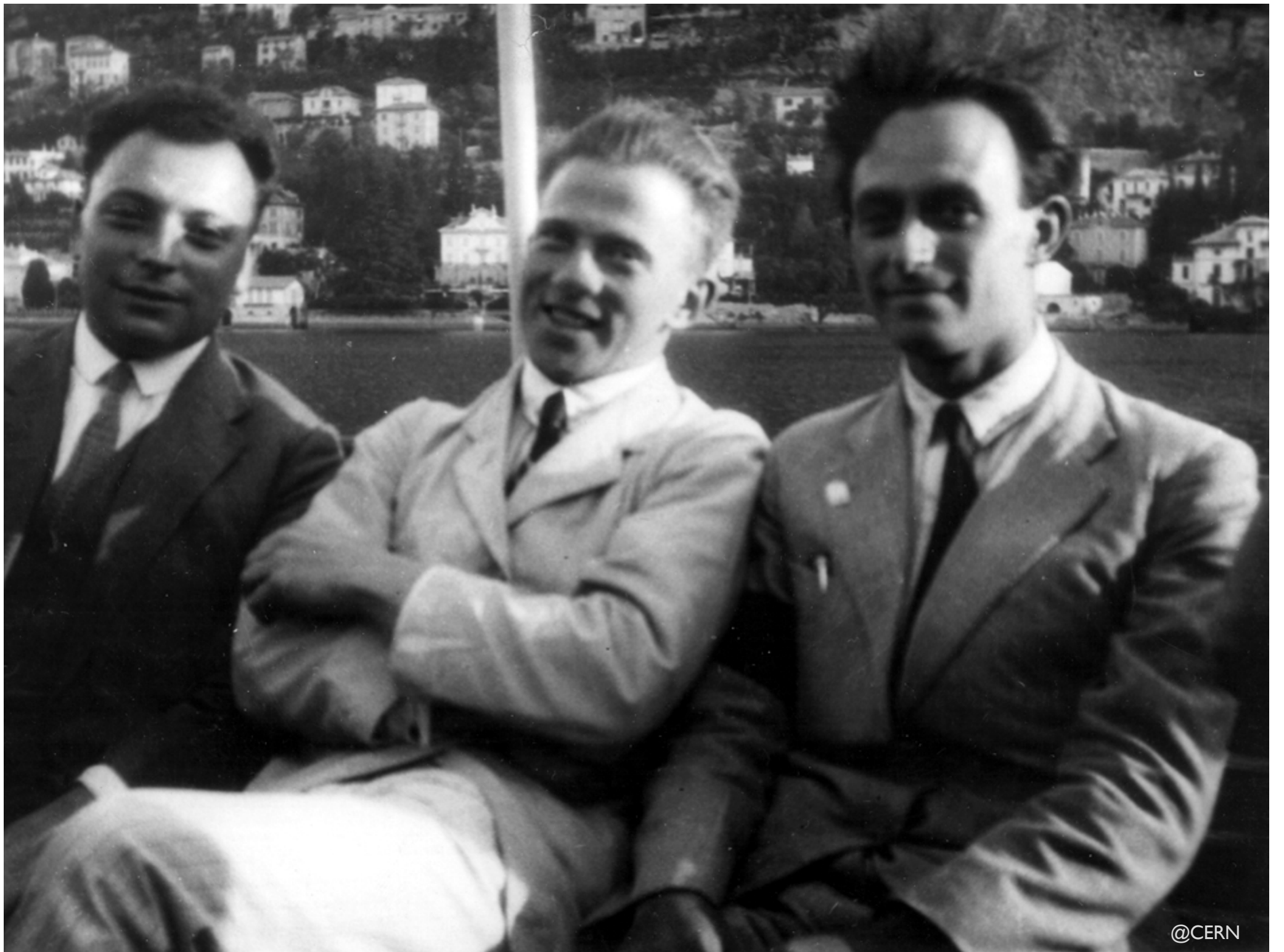
$$\text{On minimise } E_{\text{tot}} = E_{\text{cin}} + E_{\text{Coulomb}} = \frac{\hbar^2}{2mr^2} - \frac{e^2}{r}$$

$$\text{d'où } r = \frac{\hbar^2}{me^2} = 0,5 \text{ \AA}$$



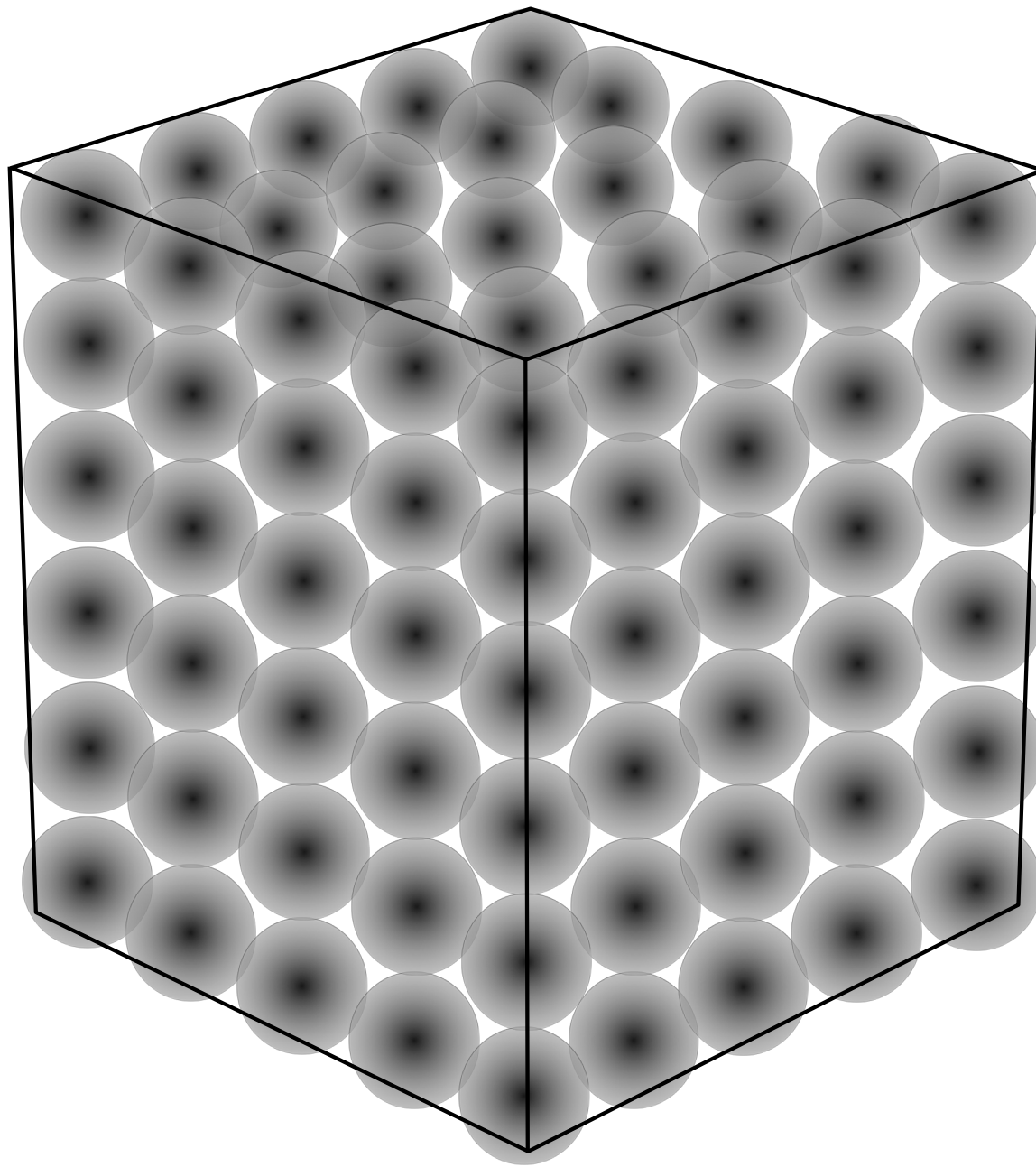
de l'atome au solide

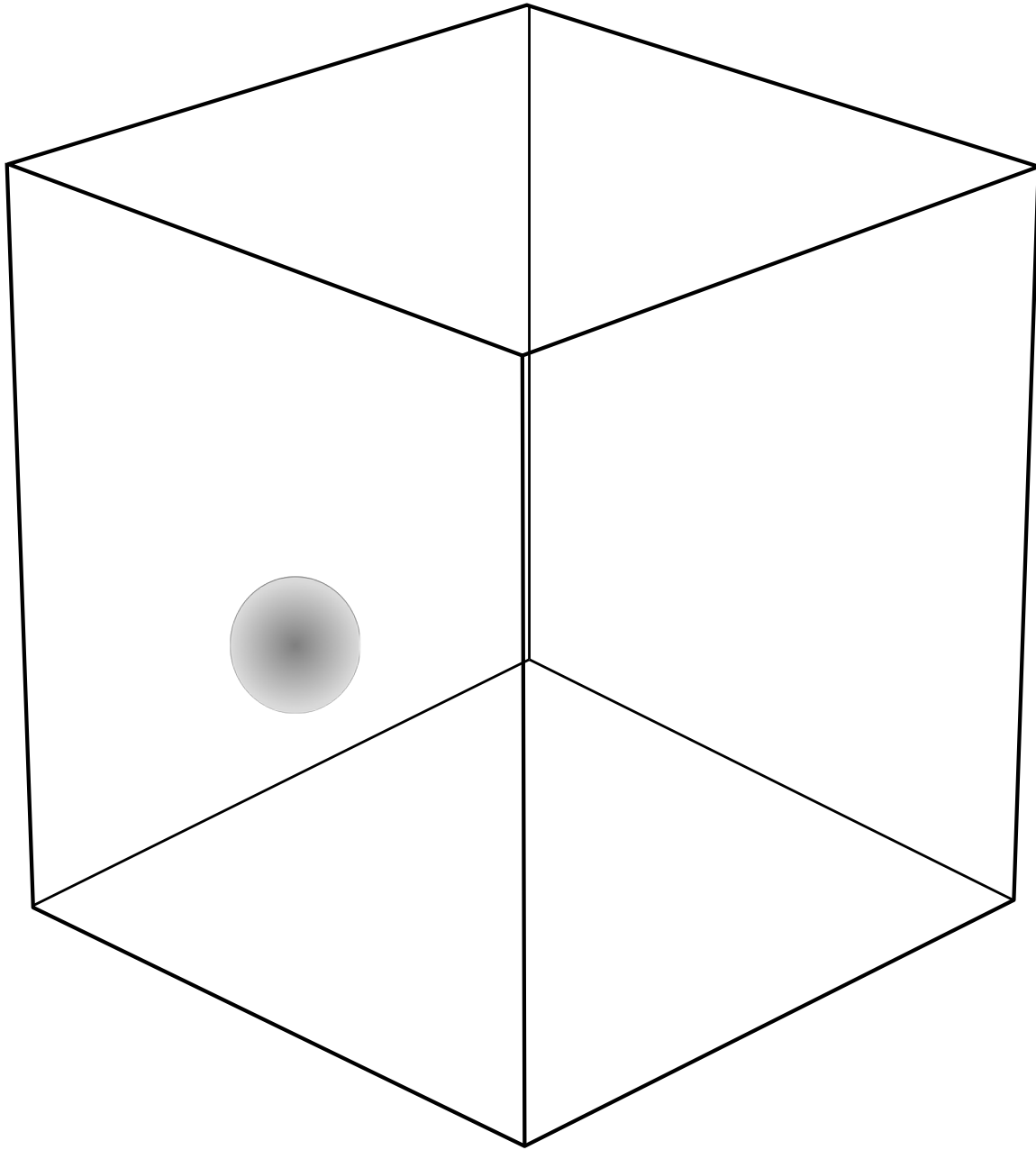




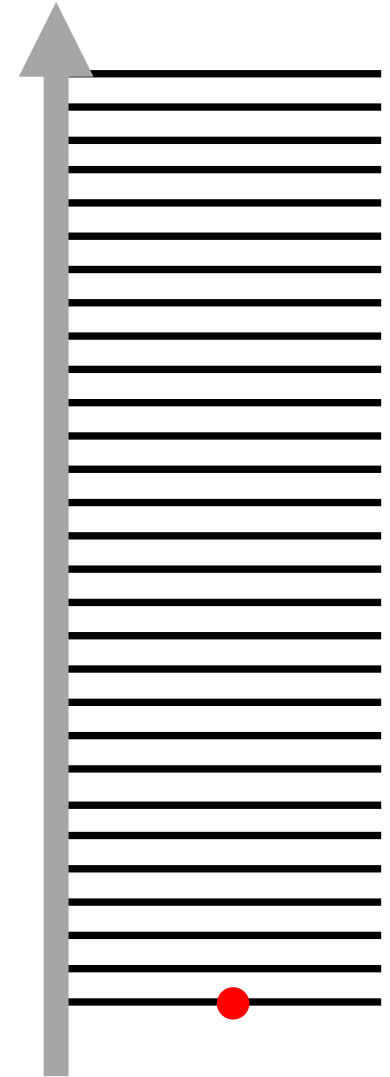
Principe d'exclusion de Pauli :

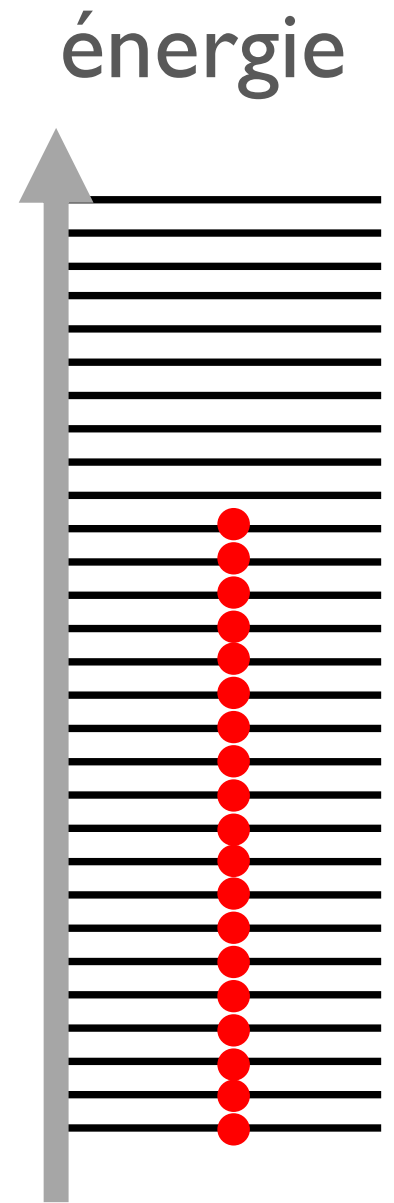
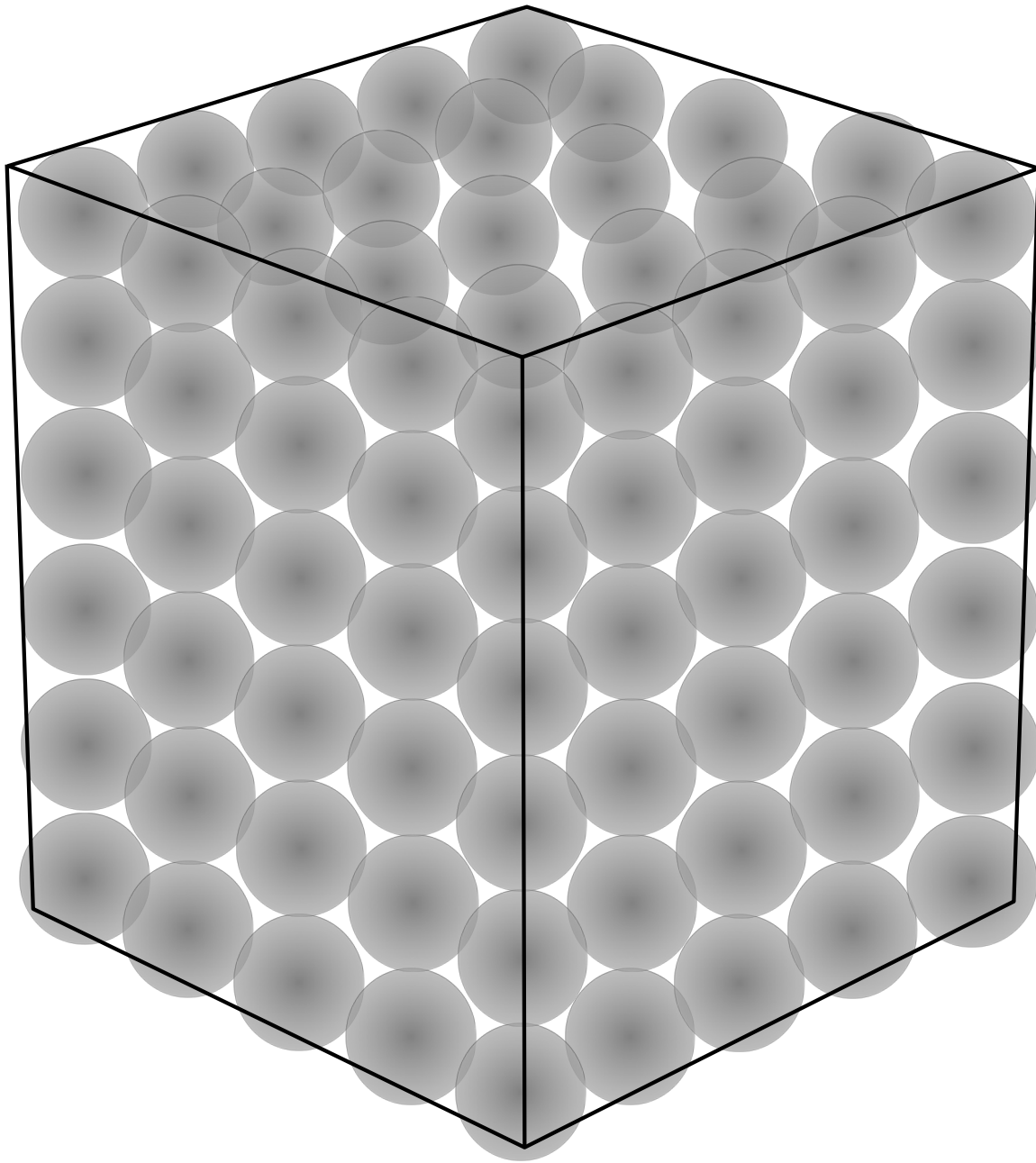
deux électrons ne peuvent pas occuper le même état au même endroit.

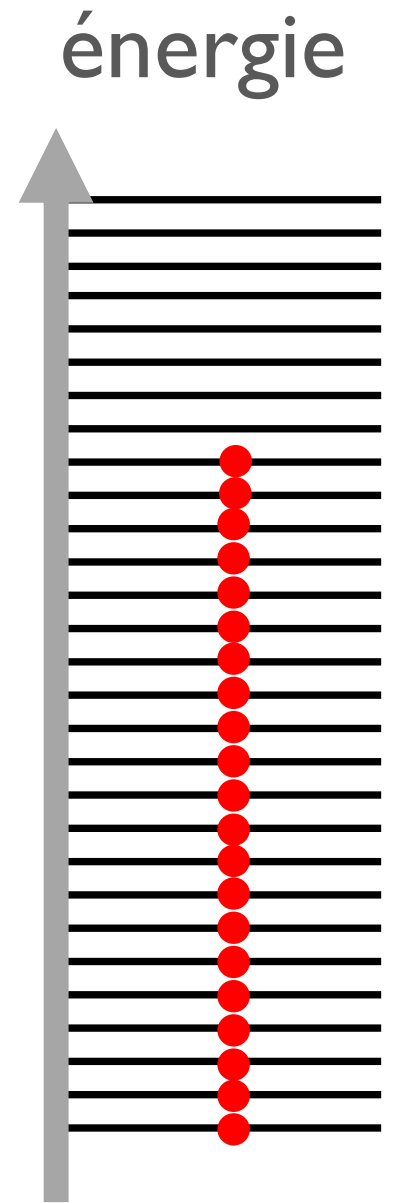
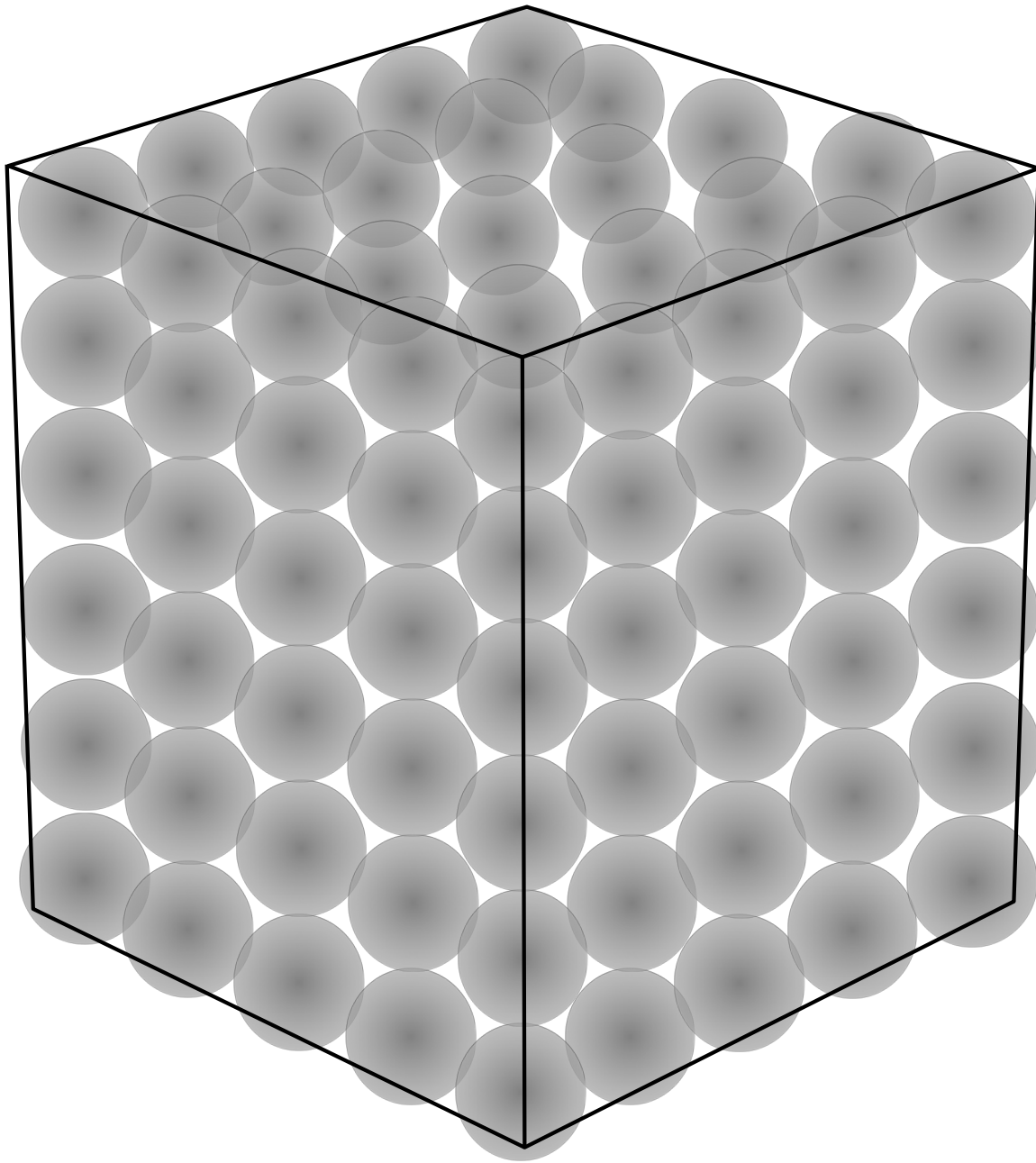


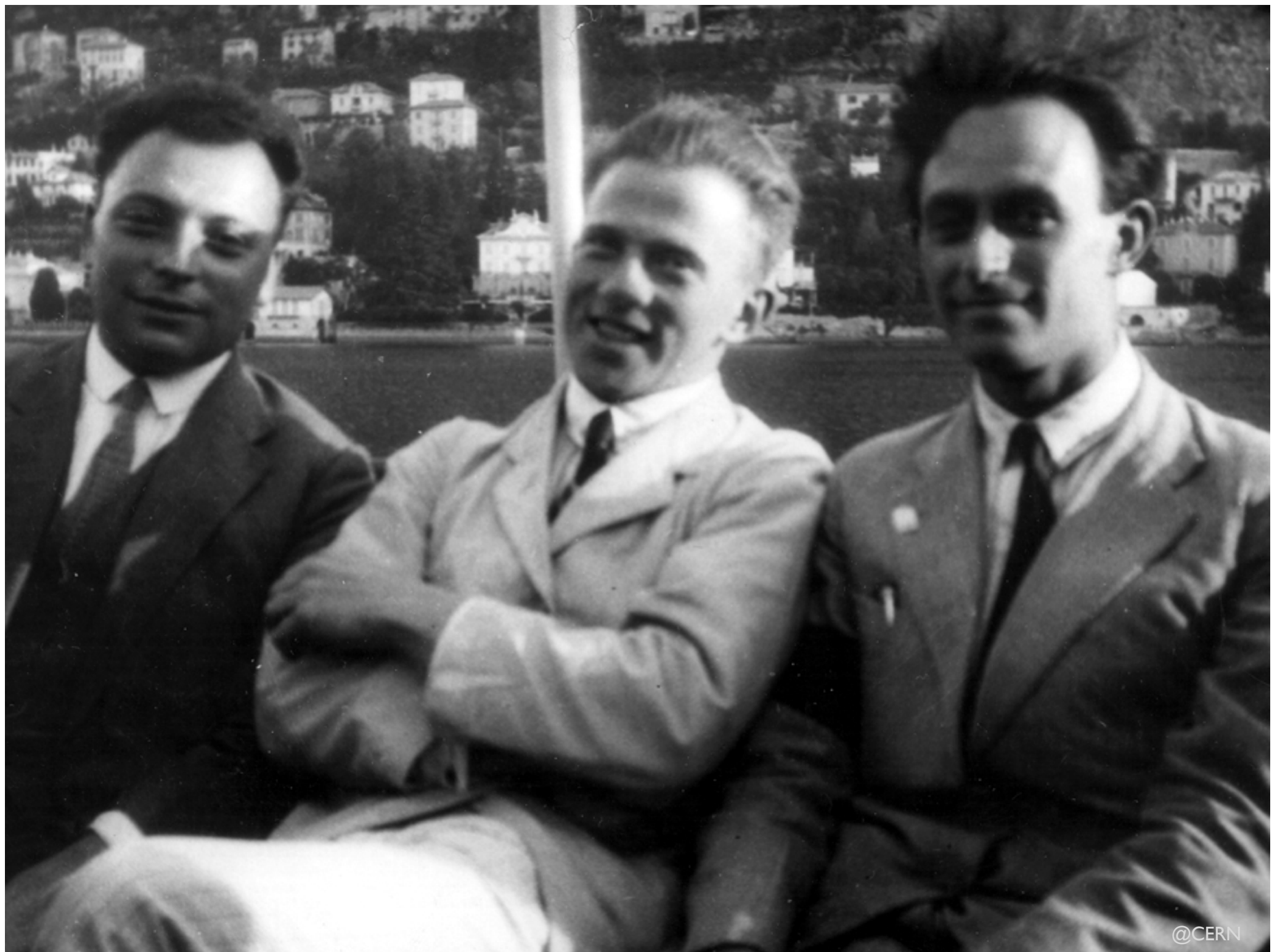


énergie









Über Gasentartung und Paramagnetismus.

Von W. Pauli jr. in Hamburg.

(Eingegangen am 16. Dezember 1926.)

$$\chi_0 = \frac{3}{10} \frac{n \mu^2}{\epsilon_0} \quad (36')$$

Das heißt, es erfolgt beim absoluten Nullpunkt keine Sättigung, sondern die Suszeptibilität behält einen endlichen Restwert.

Wie bereits in § 2 angegeben, wollen wir nun als provisorisches Modell die Leitungselektronen im Metall, die wir mit den Valenzelektronen identifizieren, als ideales Gas behandeln. Wie man leicht nachrechnet, ist dieses bei der tatsächlich vorkommenden Dichte dieser Elektronen stets als völlig entartet anzusehen, und man kann die Formel (36) anwenden. Wenn der Atomrest, der von den übrigen Elektronen des Atoms zusammen mit dem positiven Kerne gebildet wird, eine abgeschlossene Schale bildet, wird dieser keinen Paramagnetismus ergeben. Dagegen wird von dem gemäß (36) berechneten Teile der Suszeptibilität stets noch der vom diamagnetischen Induktionseffekt sowohl des Atomrestes wie der Leitungselektronen herrührende Teil zu subtrahieren sein. Nehmen wir als Beispiel die Alkalimetalle. Dann ist im Ausdruck (31) für μ zu setzen:

$j = 1/2$, $g = 2$, also $G = 2$, $\mu = \sqrt{3} \mu_0$, $\mu_0 = 0,921 \cdot 10^{-20}$,
 m_0 gleich der Elektronenmasse $9,02 \cdot 10^{-28}$, und n ist der Anzahl der Metallatome pro Volumeneinheit gleichzusetzen. Wird n in cm^{-3} gemessen, so ergibt sich aus (36) zunächst

$$\chi_0 = n^{1/3} 2,209 \cdot 10^{-14}.$$

Bei Durchlaufen der Reihe der Alkalimetalle in der Reihenfolge wachsender Atomnummern von Na bis Cs nimmt $n^{1/3}$ von etwa $3 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-1}$ bis $2 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-1}$ ab. Es ergeben sich schließlich die folgenden theoretischen Werte für χ_0 , die mit den darunterstehenden beobachteten zu vergleichen sind:

	Na	K	Rb	Cs
$(\chi_0)_{\text{ber.}}$	$= (6,57;$	$5,2;$	$4,88;$	$4,54) \cdot 10^{-7},$
$(\chi_0)_{\text{beob.}}$	$= (5,8$	$;$	$5,1;$	$0,6 ; -0,5) \cdot 10^{-7}.$



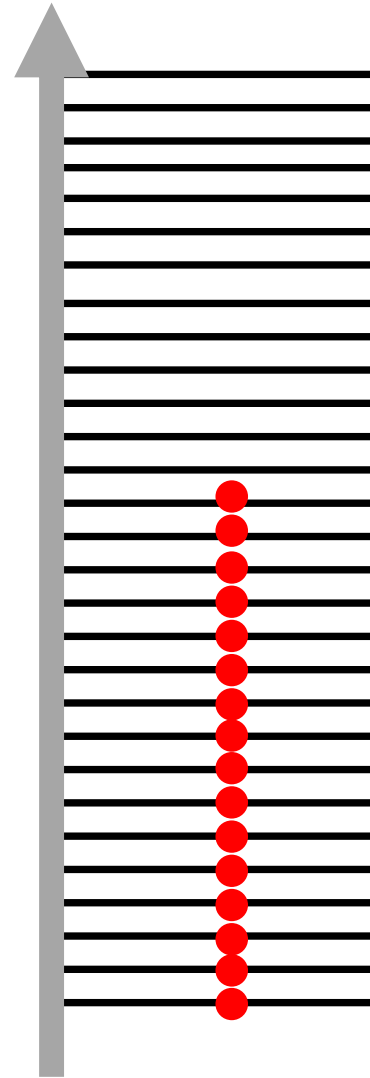
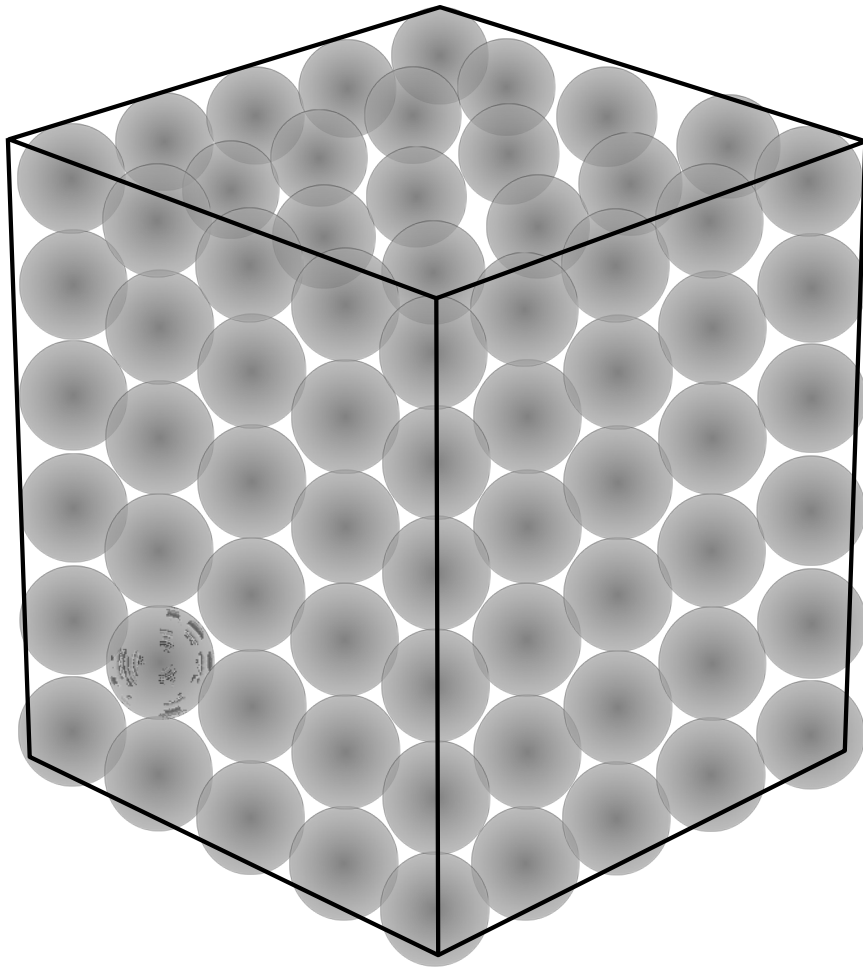


« Je n'aime pas la physique des solides,
même si j'en suis à l'origine. »

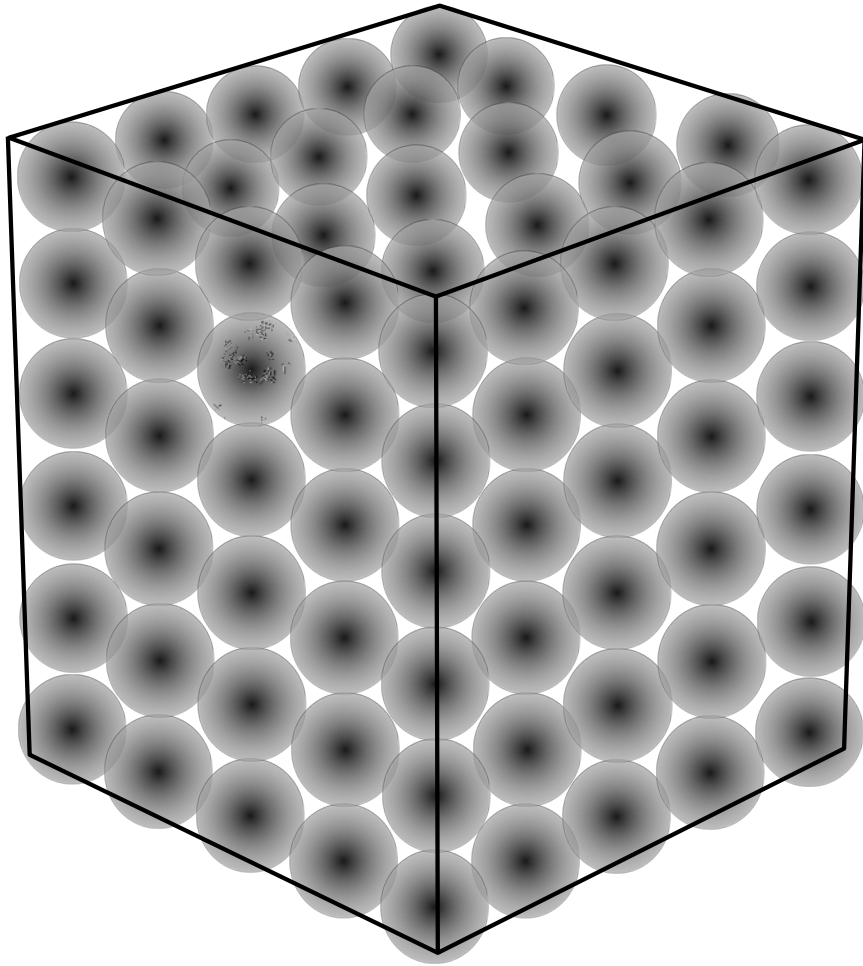
Wolfgang Pauli



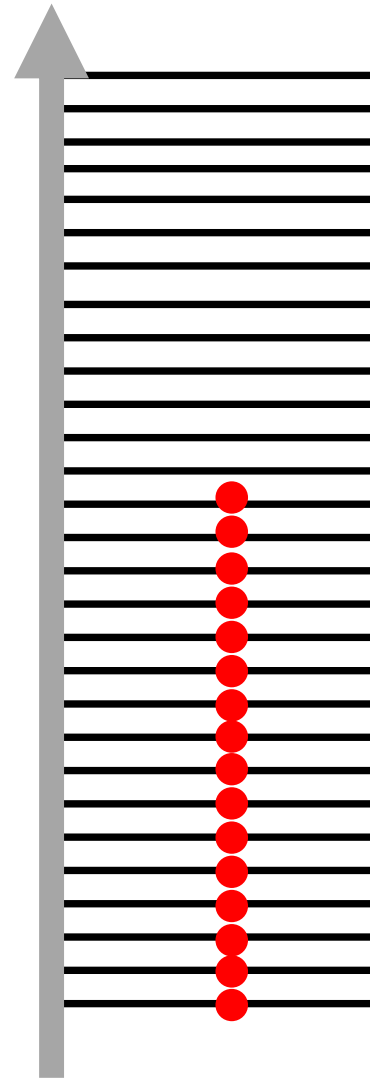
énergie



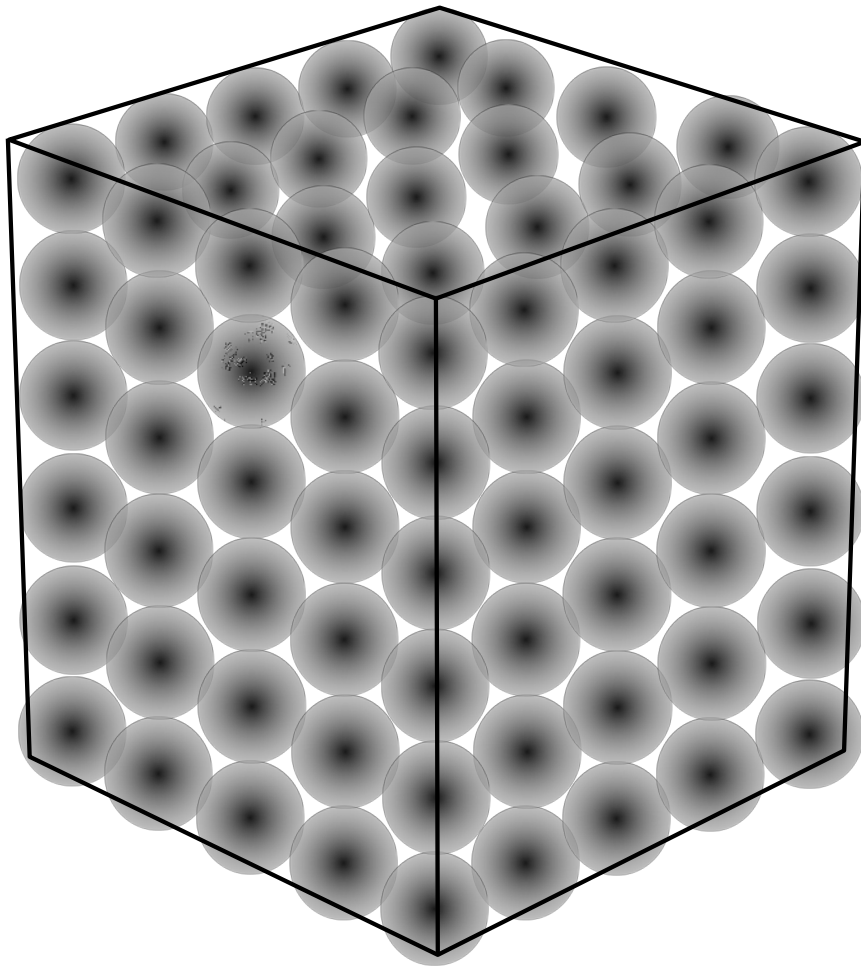
L'effet du réseau d'atomes



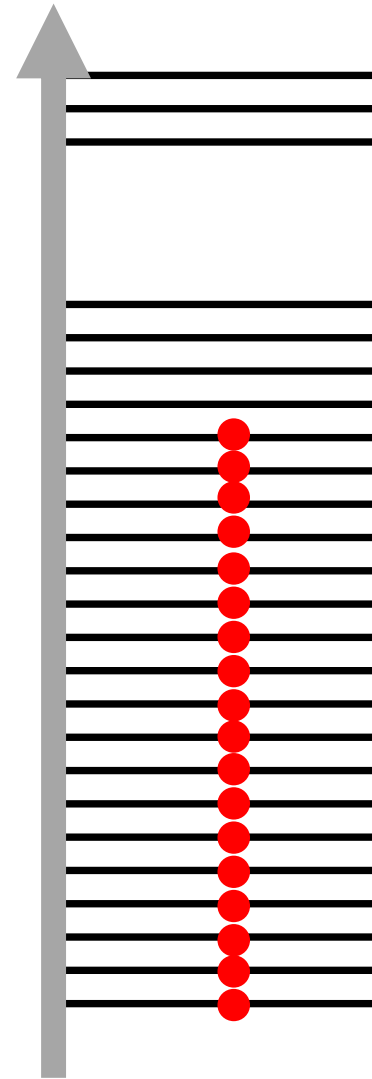
énergie



L'effet du réseau d'atomes

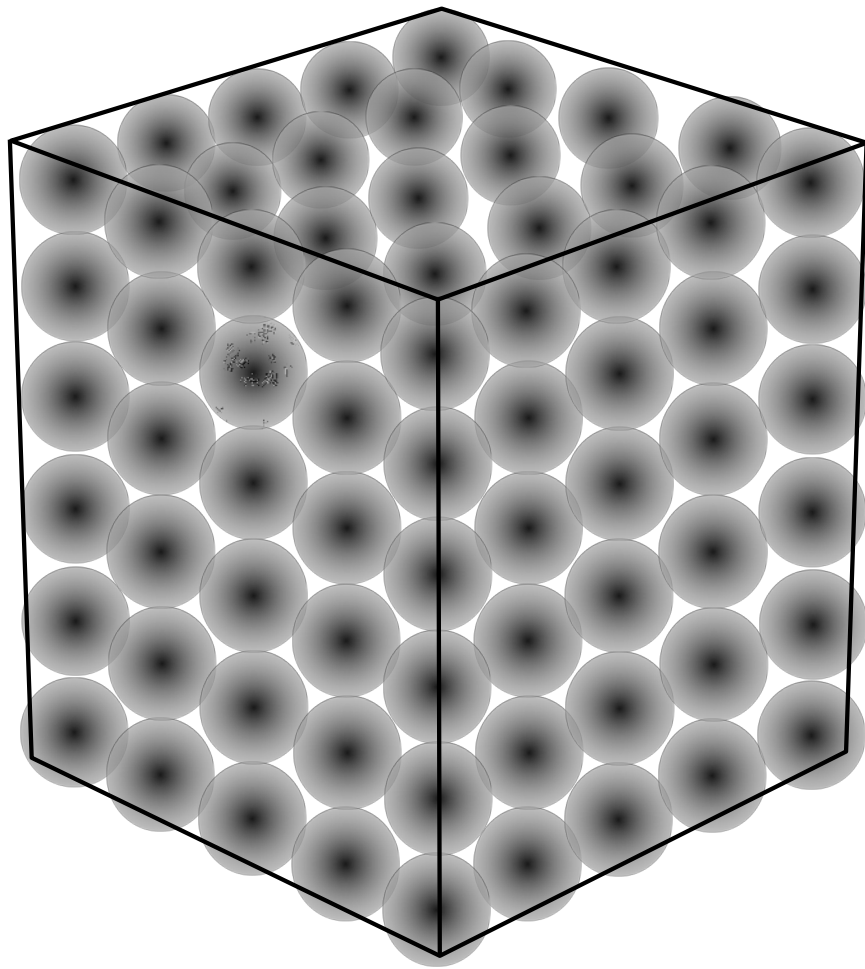


énergie

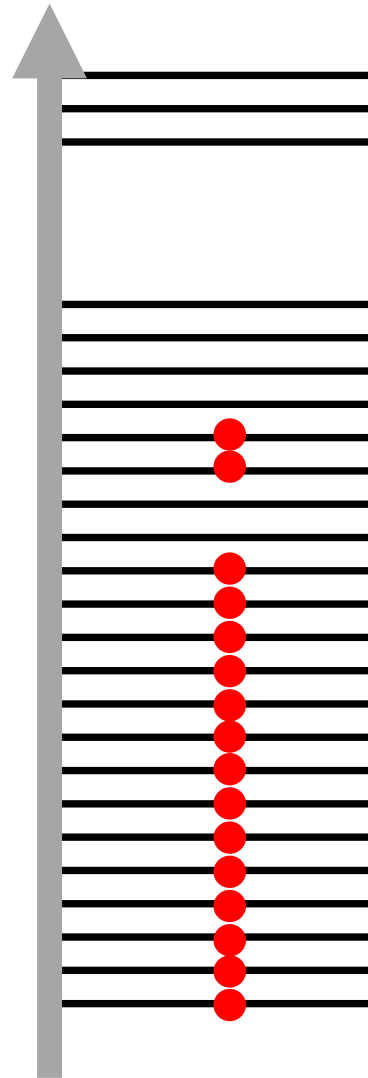


apparition
d'une bande
interdite
ou « gap »

métal

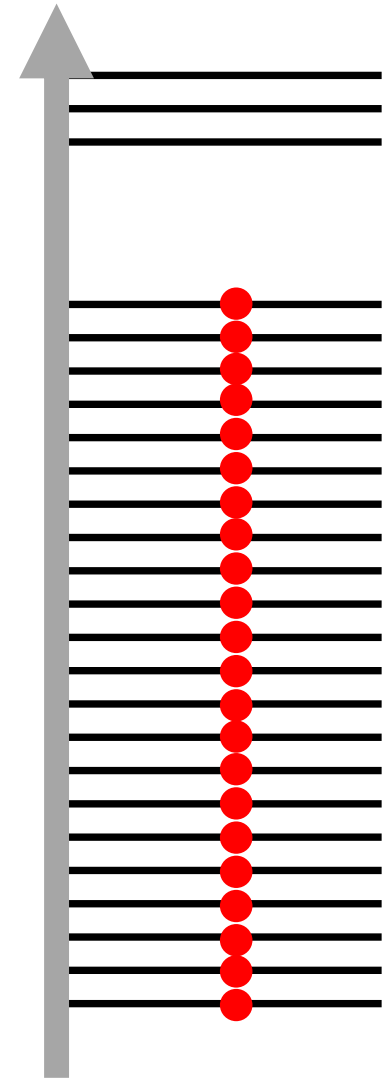


énergie



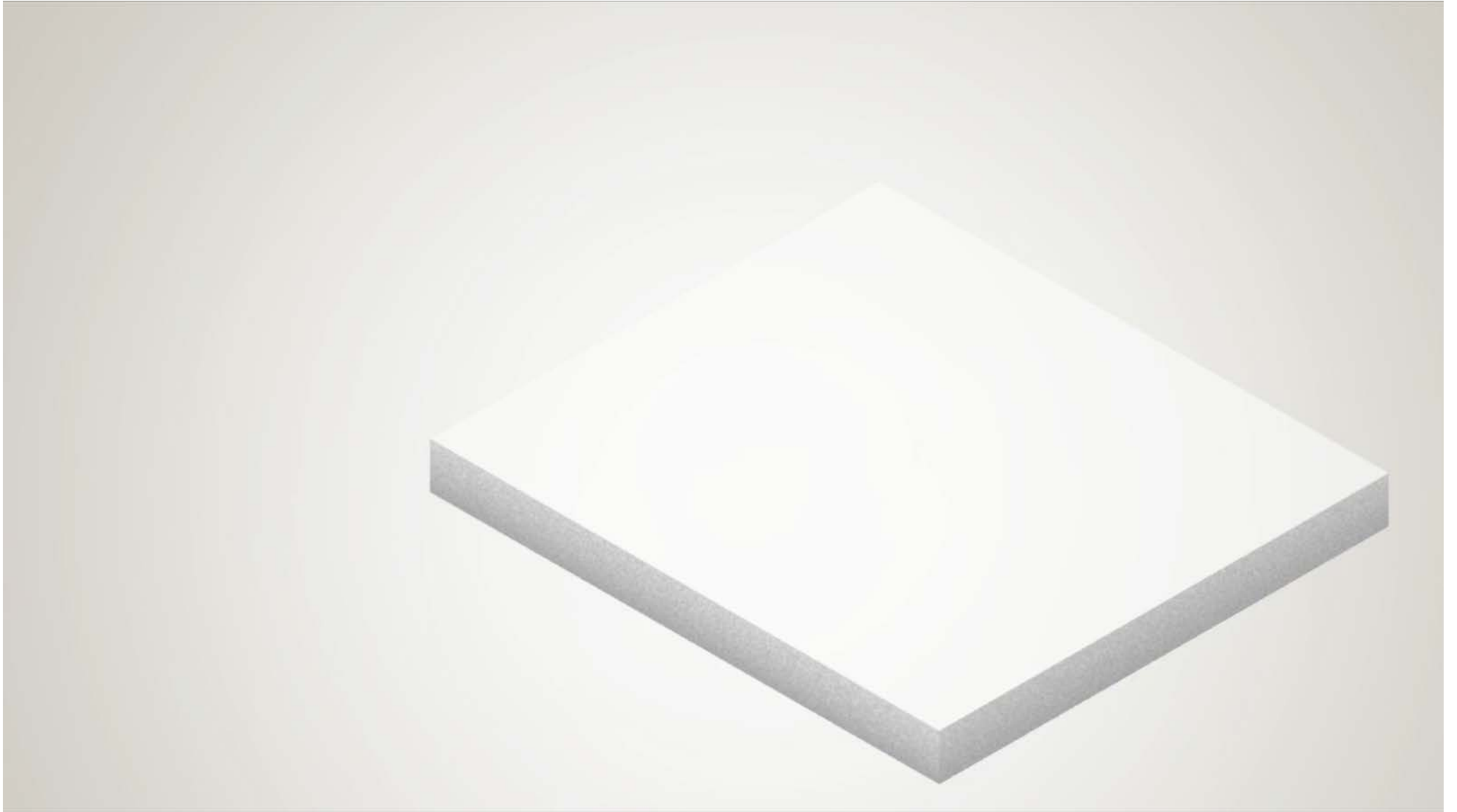
métal

énergie



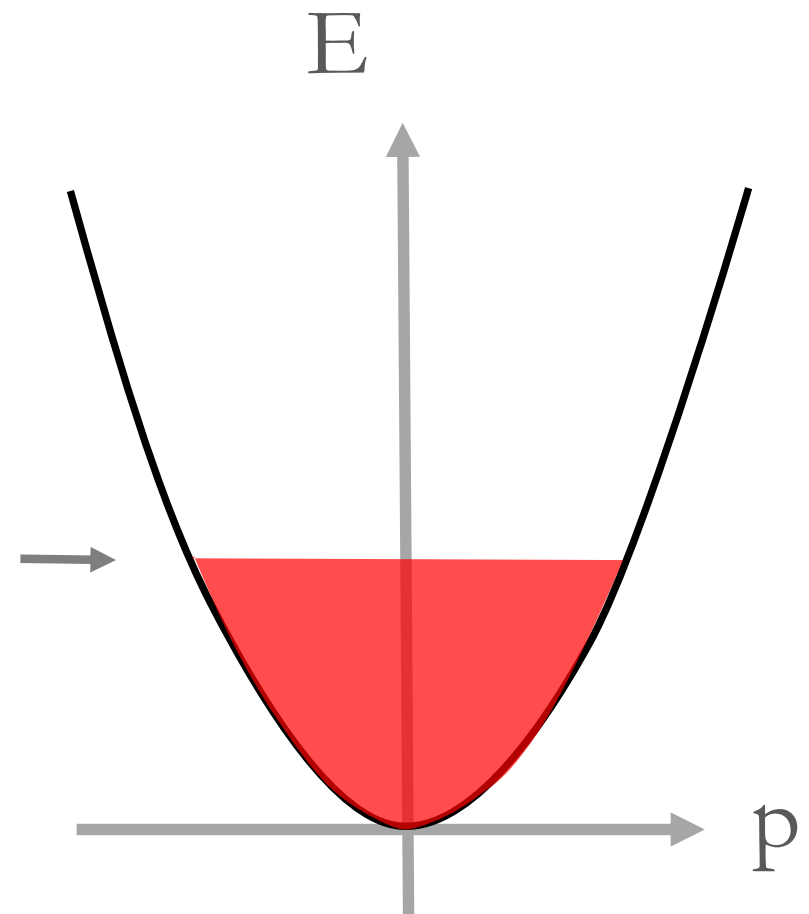
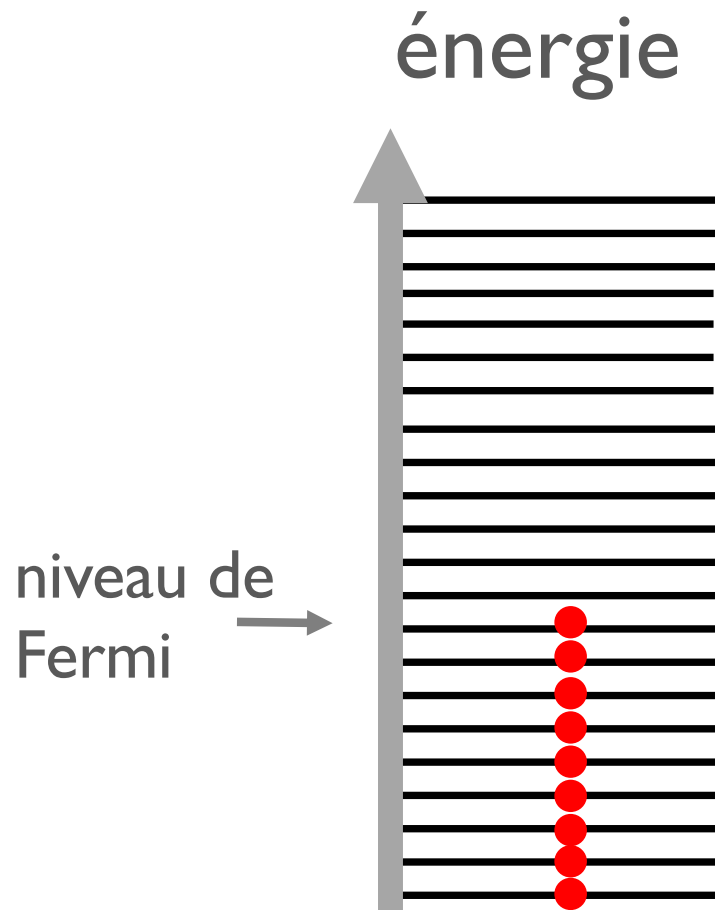
isolant

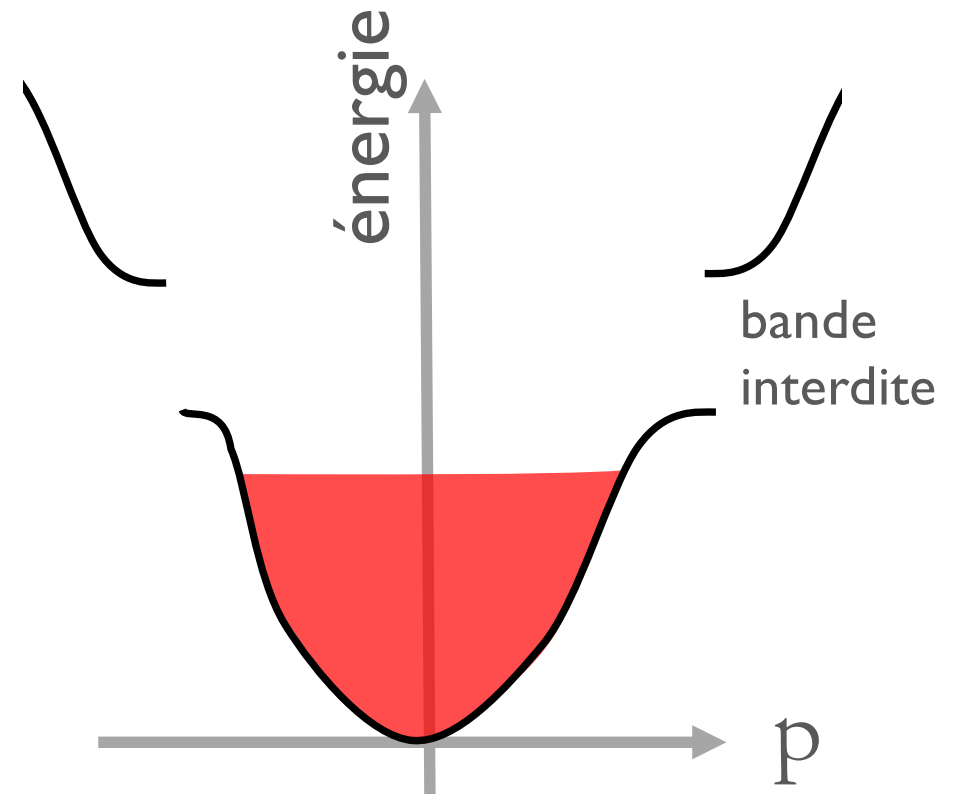
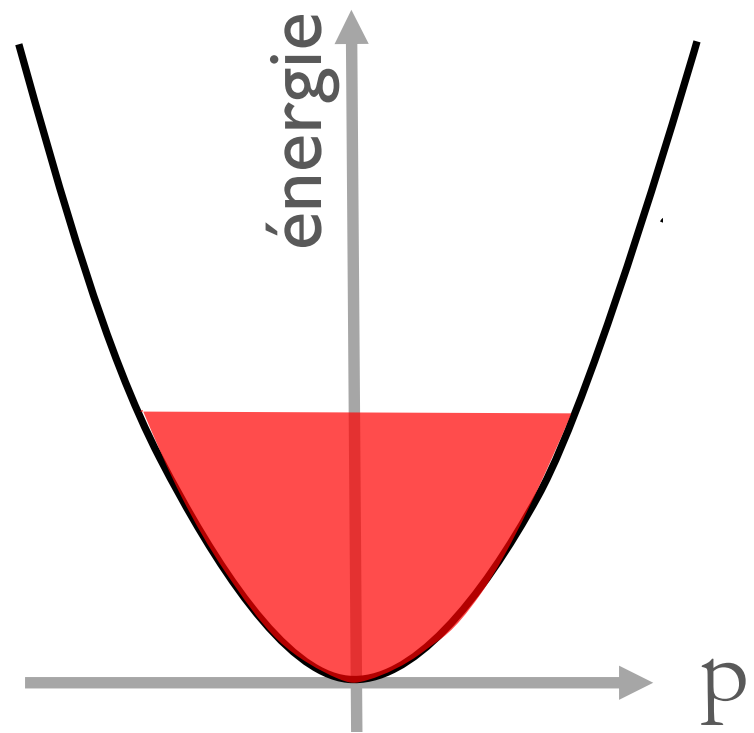
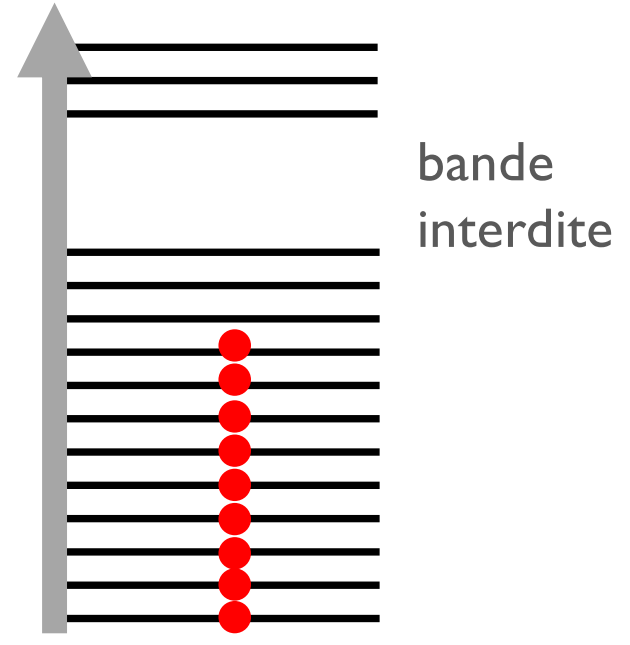
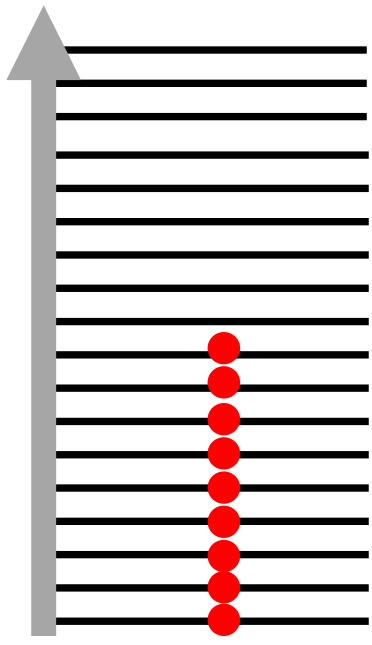
formation des bandes



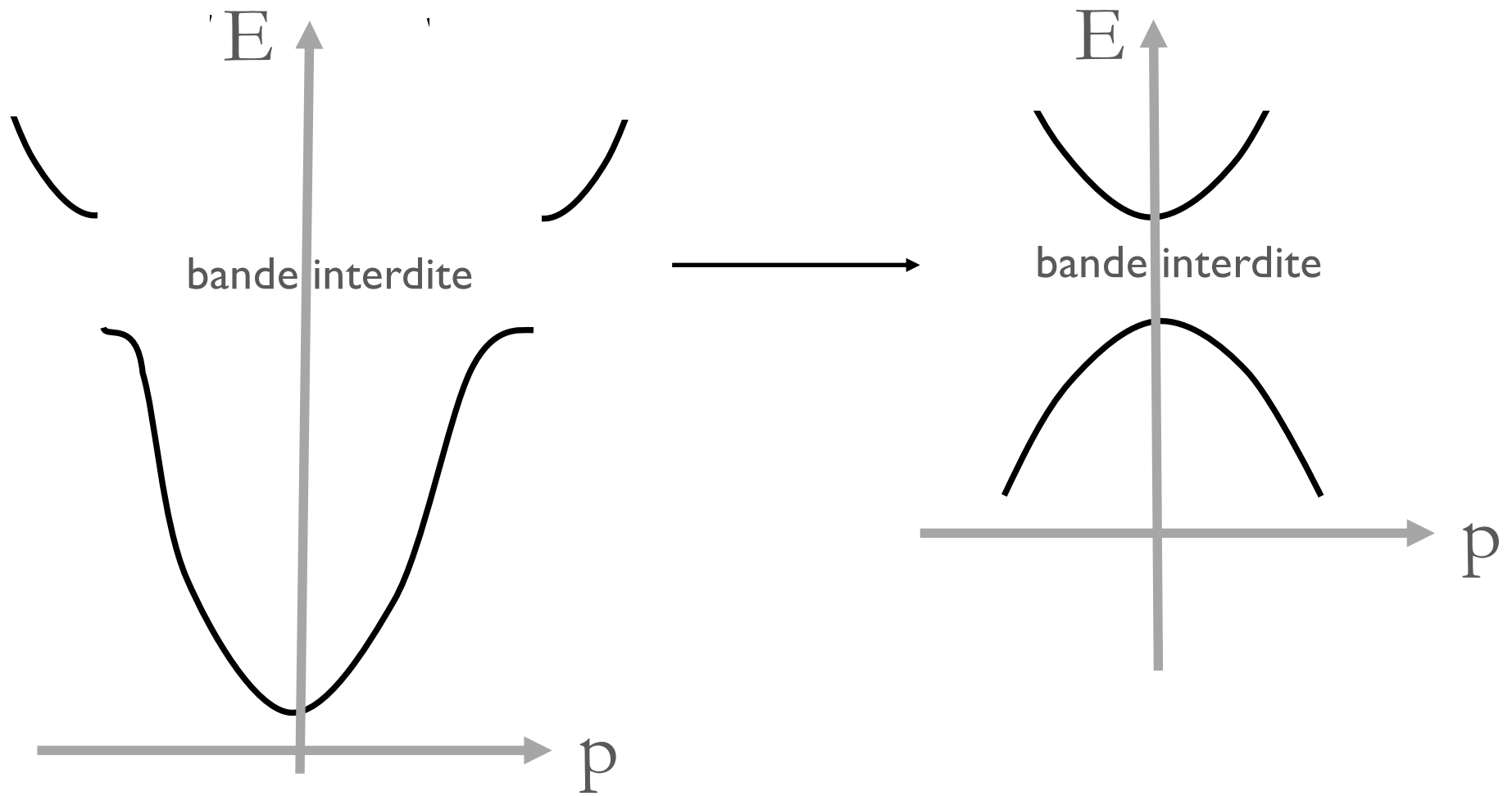
dépendance de E avec l'impulsion p

les électrons sont libres: $E = \frac{1}{2} m v^2 = p^2 / 2m$

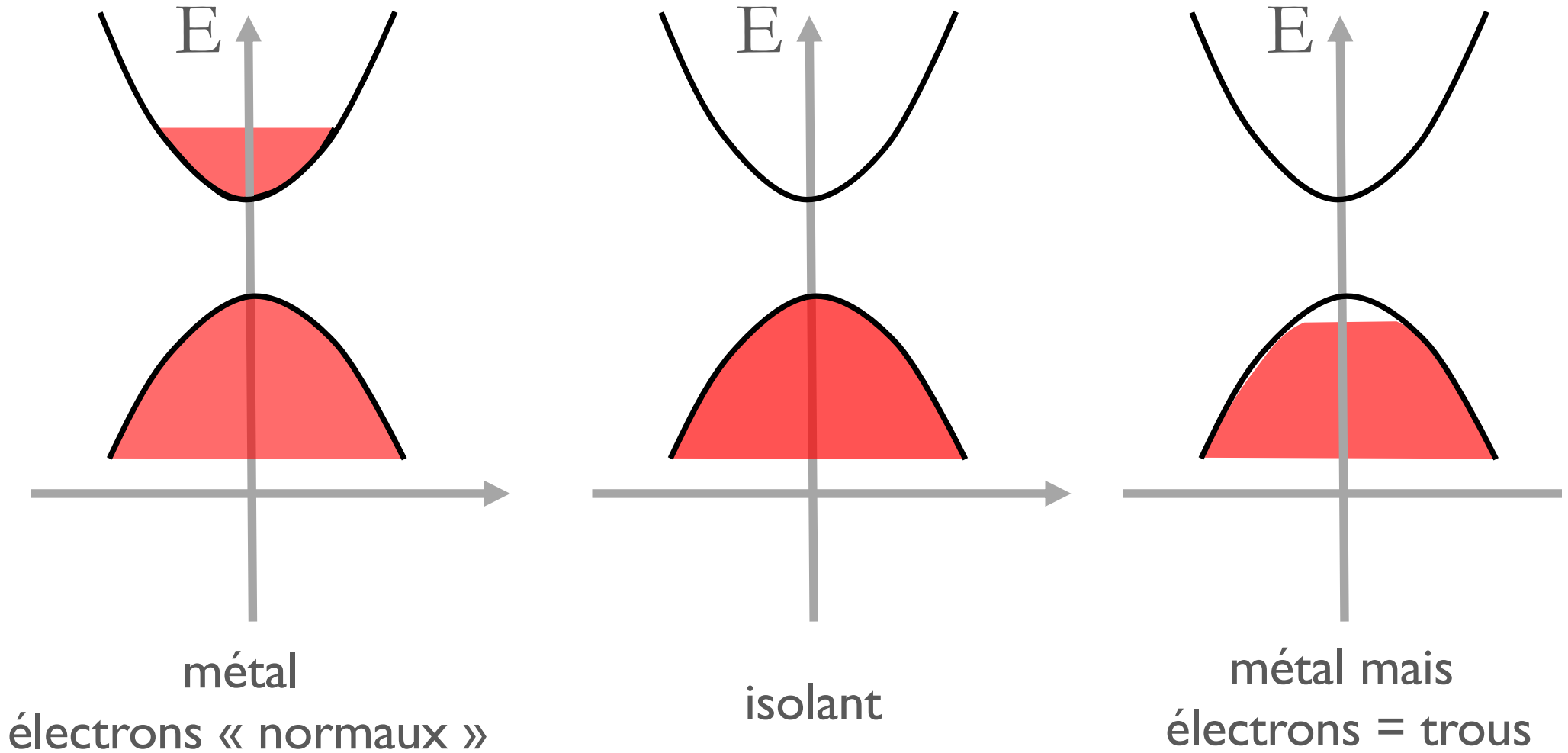




repliement :



plusieurs cas selon le niveau du remplissage :



de l'atome au solide : en résumé

atomes
et orbitales
des électrons

+

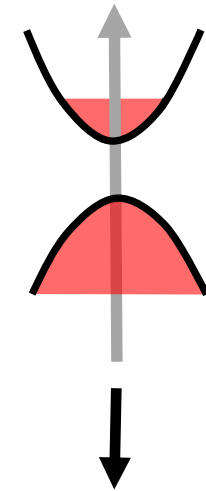
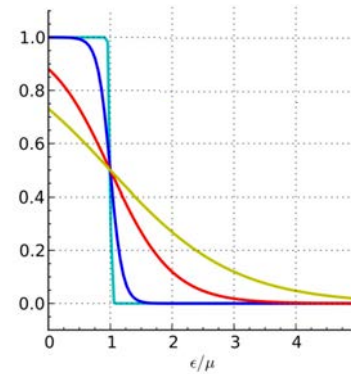
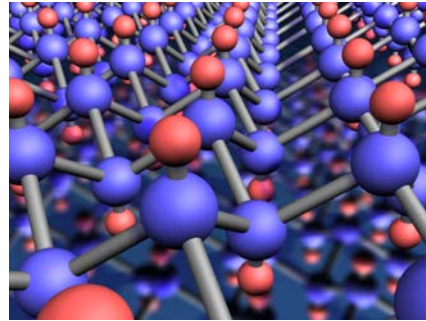
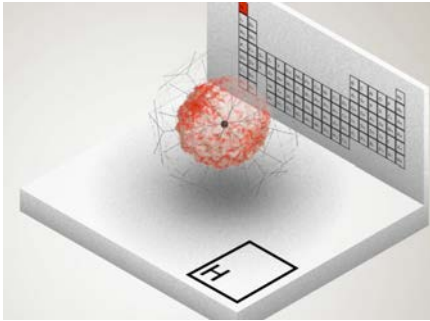
arrangement
cristallo

+

statistique
de
Fermi-Dirac

→

structure de
bande
des électrons



propriétés
des solides



La quantique dans les solides permet de comprendre...

- la métallicité
- la solidité par le principe de Pauli
- la couleur via l'absorption des atomes
- le magnétisme via les spins des électrons au niveau de Fermi
- les liaisons chimiques et propriétés mécaniques

et les interactions entre électrons ?

Les liquides de Fermi

Т. 30. Журнал экспериментальной и теоретической физики. Вып. 6
1956

ТЕОРИЯ ФЕРМИ-ЖИДКОСТИ

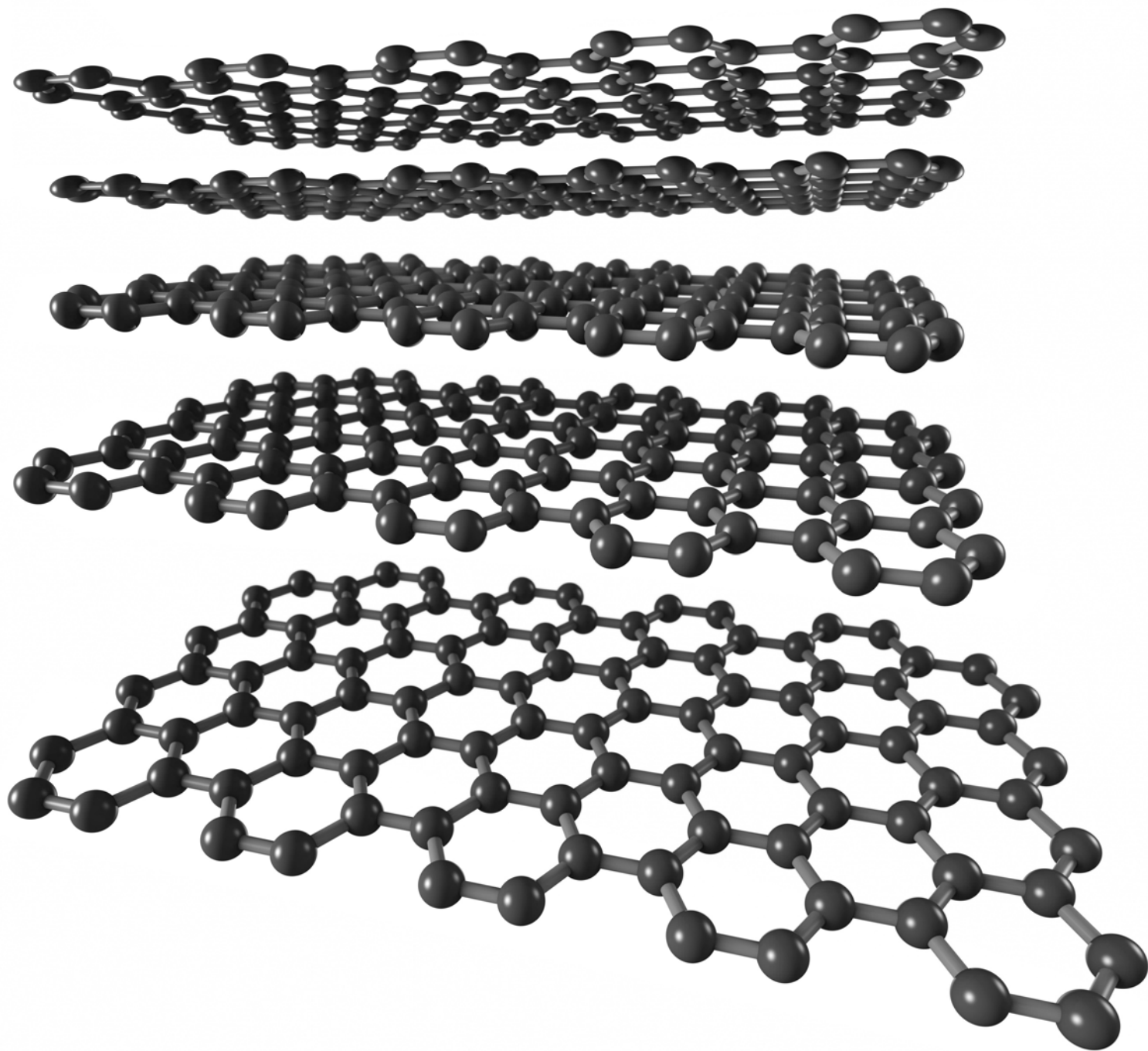
Л. Д. Ландау

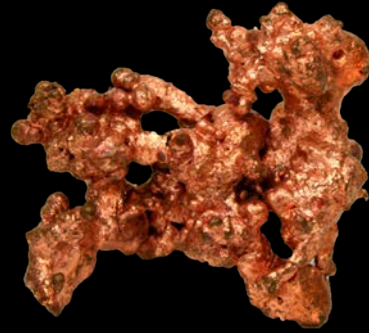
Построена теория ферми-жидкости, основанная на представлении энергии возбуждений, как функционала от функции распределения. Находятся эффективная масса возбуждений, сжимаемость и магнитная восприимчивость ферми-жидкости. Получены выражения для потока импульса и потока энергии.



Lev Landau

un sujet de recherche actuel :
le graphite





cuivre



graphite

nb d'électrons
qui « répondent »

$8 \cdot 10^{22} \text{ e}^-/\text{cm}^3$

$0,0003 \cdot 10^{22} \text{ e}^-/\text{cm}^3$



cuivre



graphite

masse d'un électron $9,2 \cdot 10^{-31}$ kg

$0,46 \cdot 10^{-31}$ kg

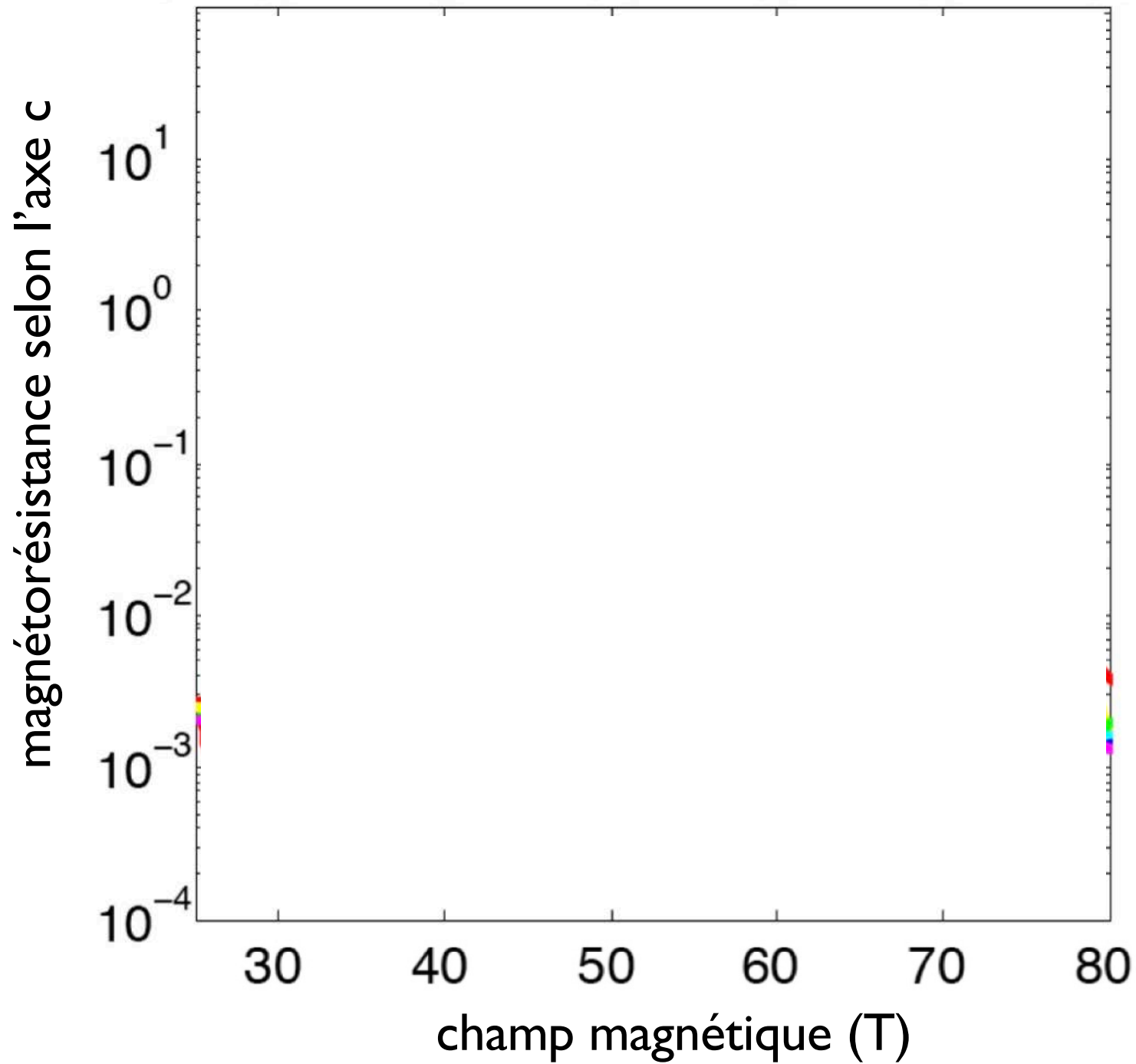
des propriétés magnétiques
curieuses...

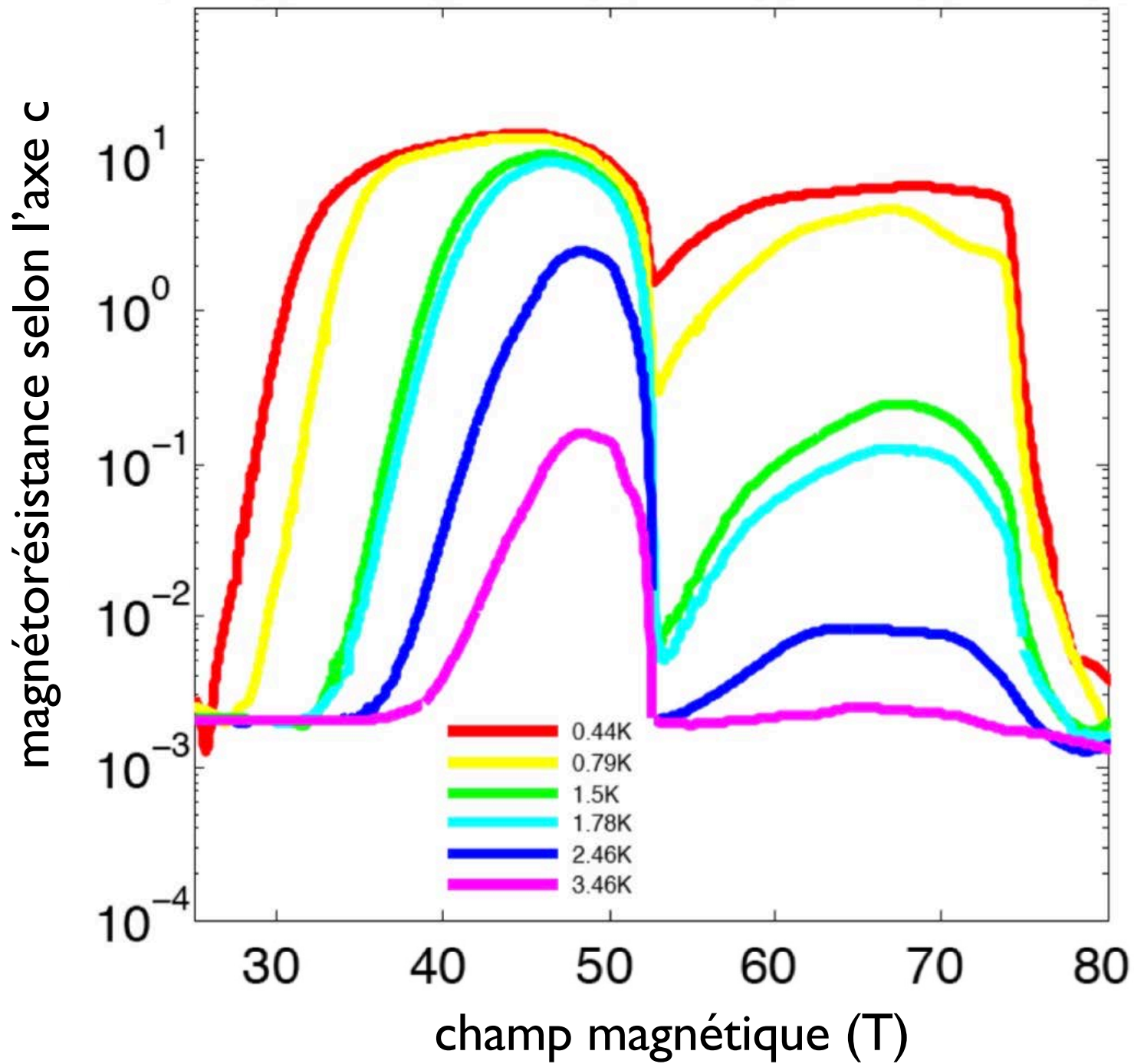


LNCMI
Toulouse



LNCMI
Toulouse

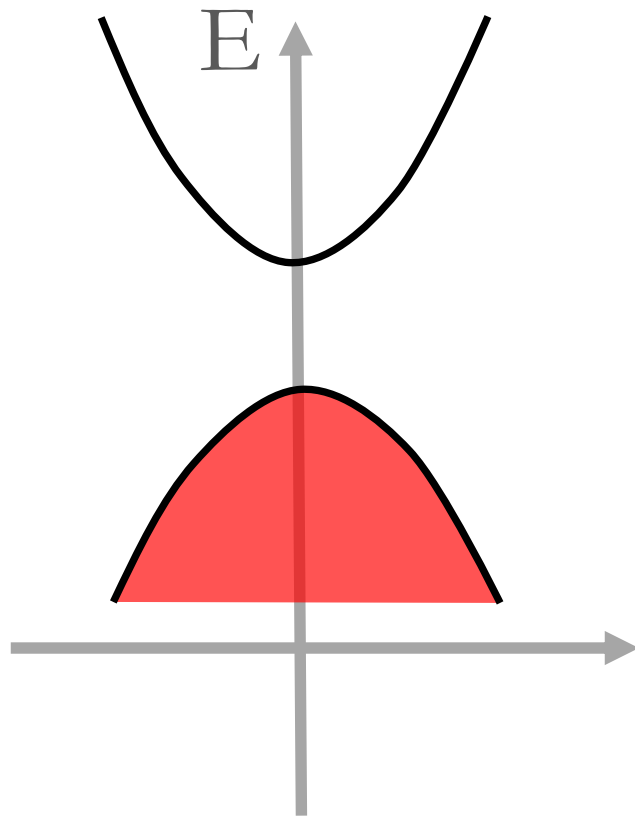




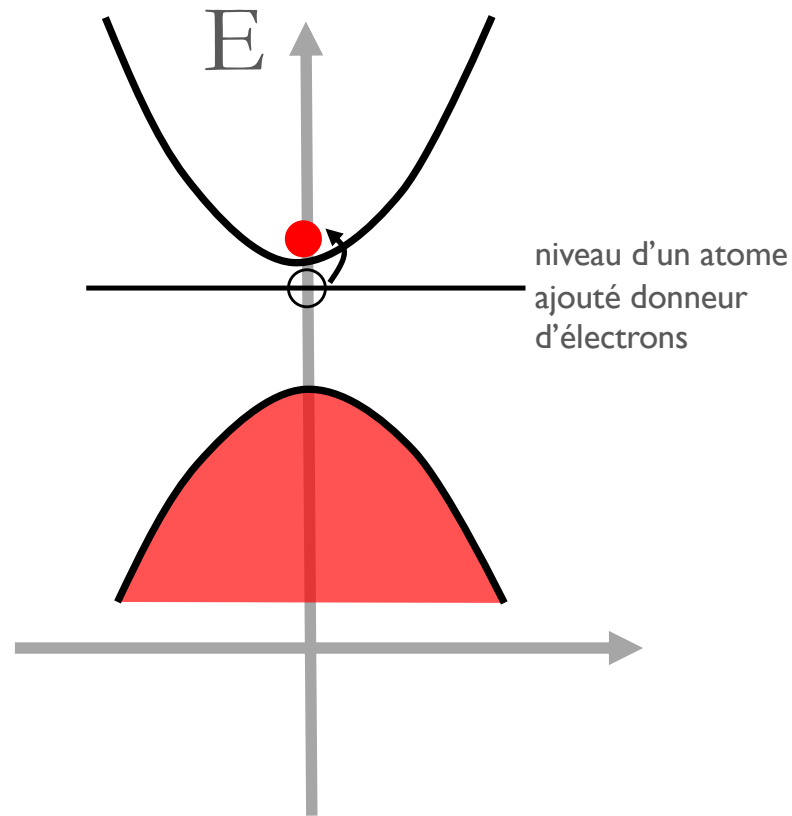
Du solide quantique aux technologies quantiques

le dopage : ajouter des électrons sur mesure

dopage électrons :



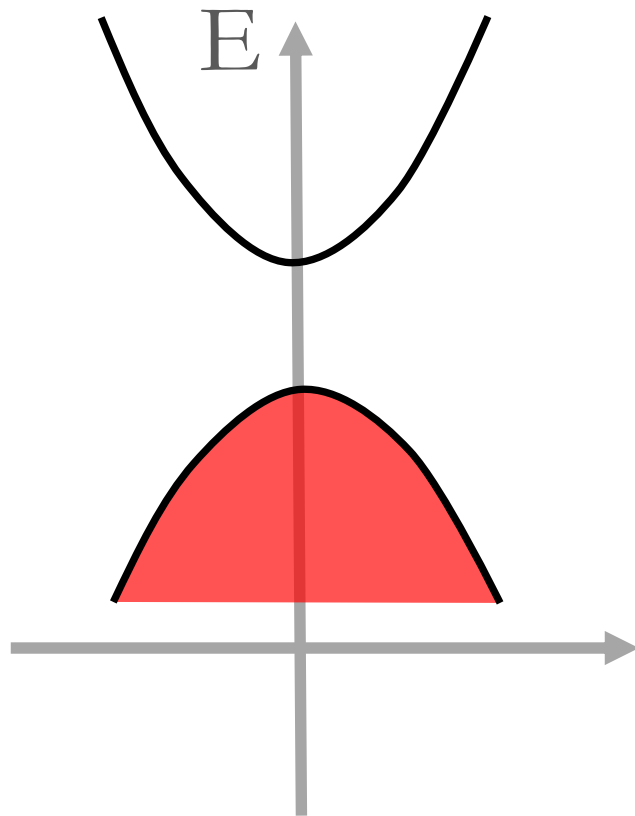
isolant



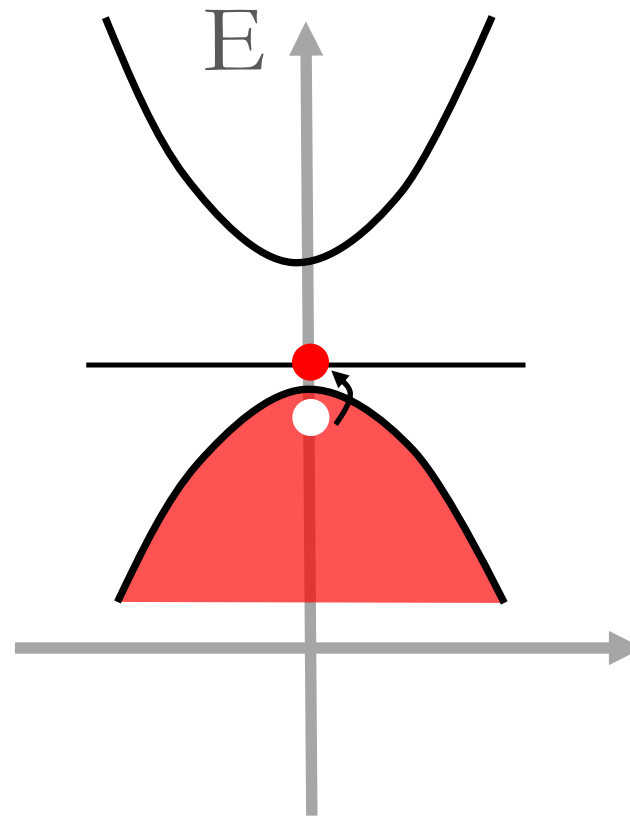
on ajoute un atome juste sous la bande du haut, et qui donne des électrons

le dopage : ajouter des électrons sur mesure

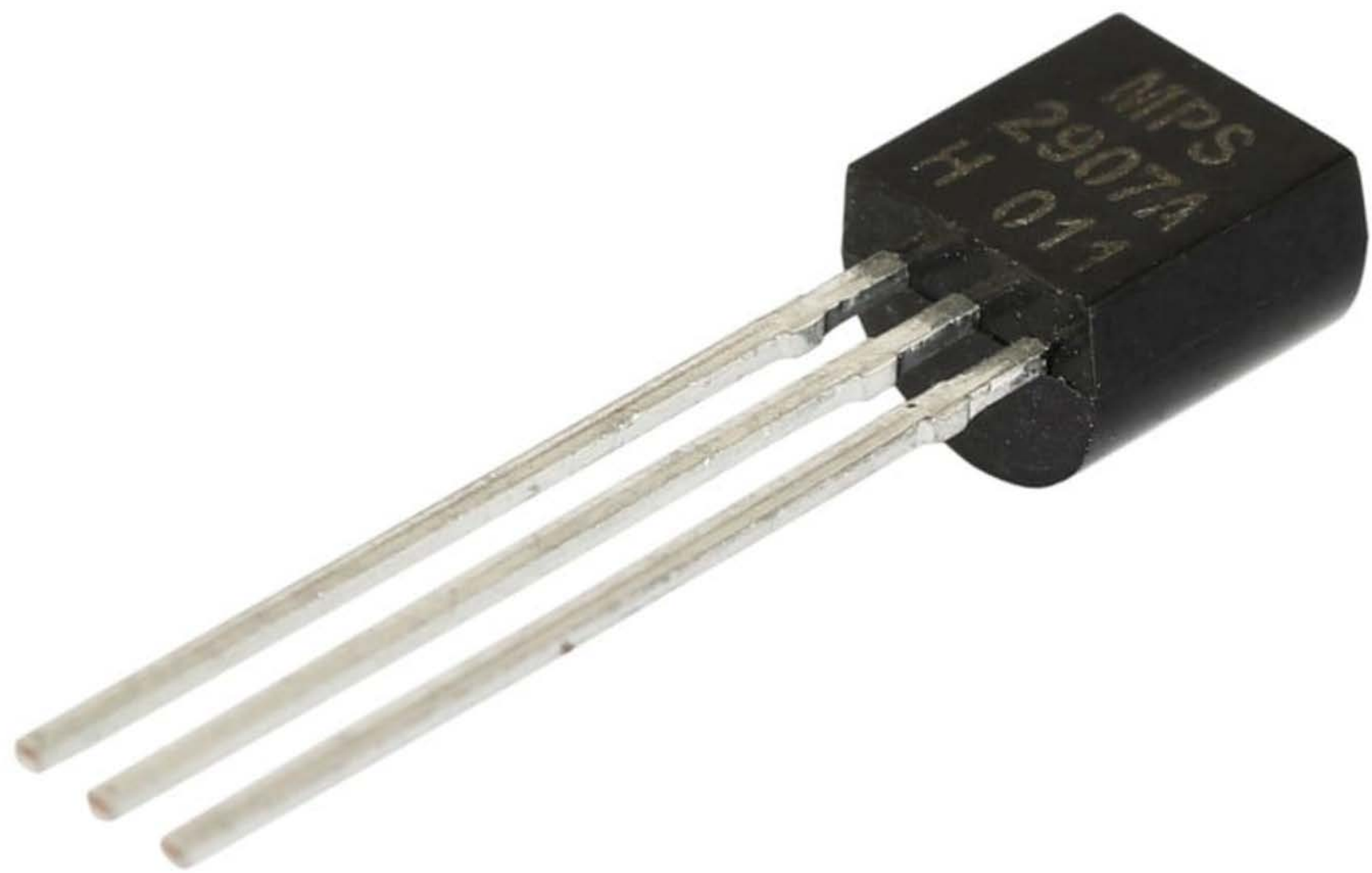
dopage trous :

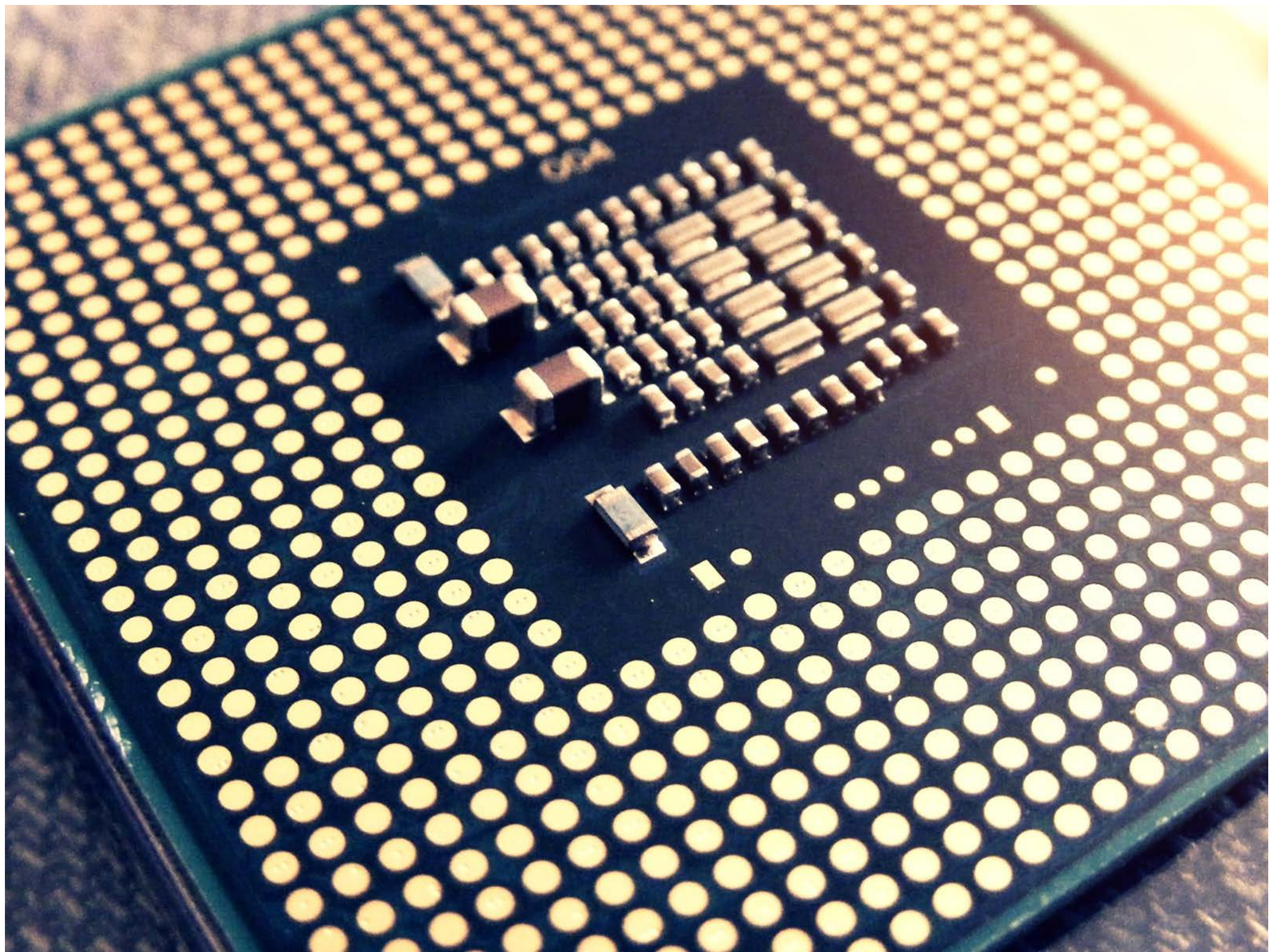


isolant

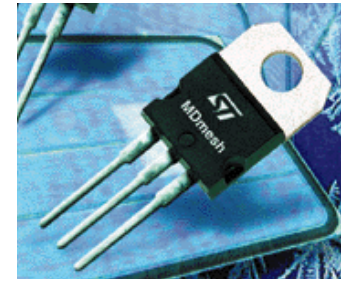


on ajoute un atome juste au dessus
de la bande de valence : on libère un trou

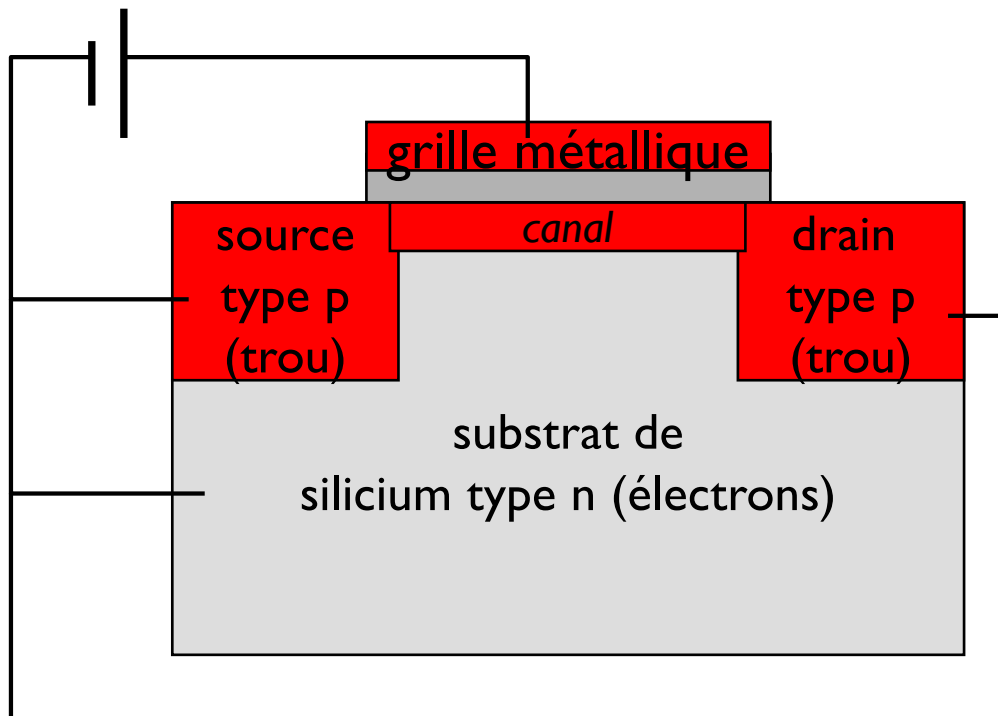




le transistor



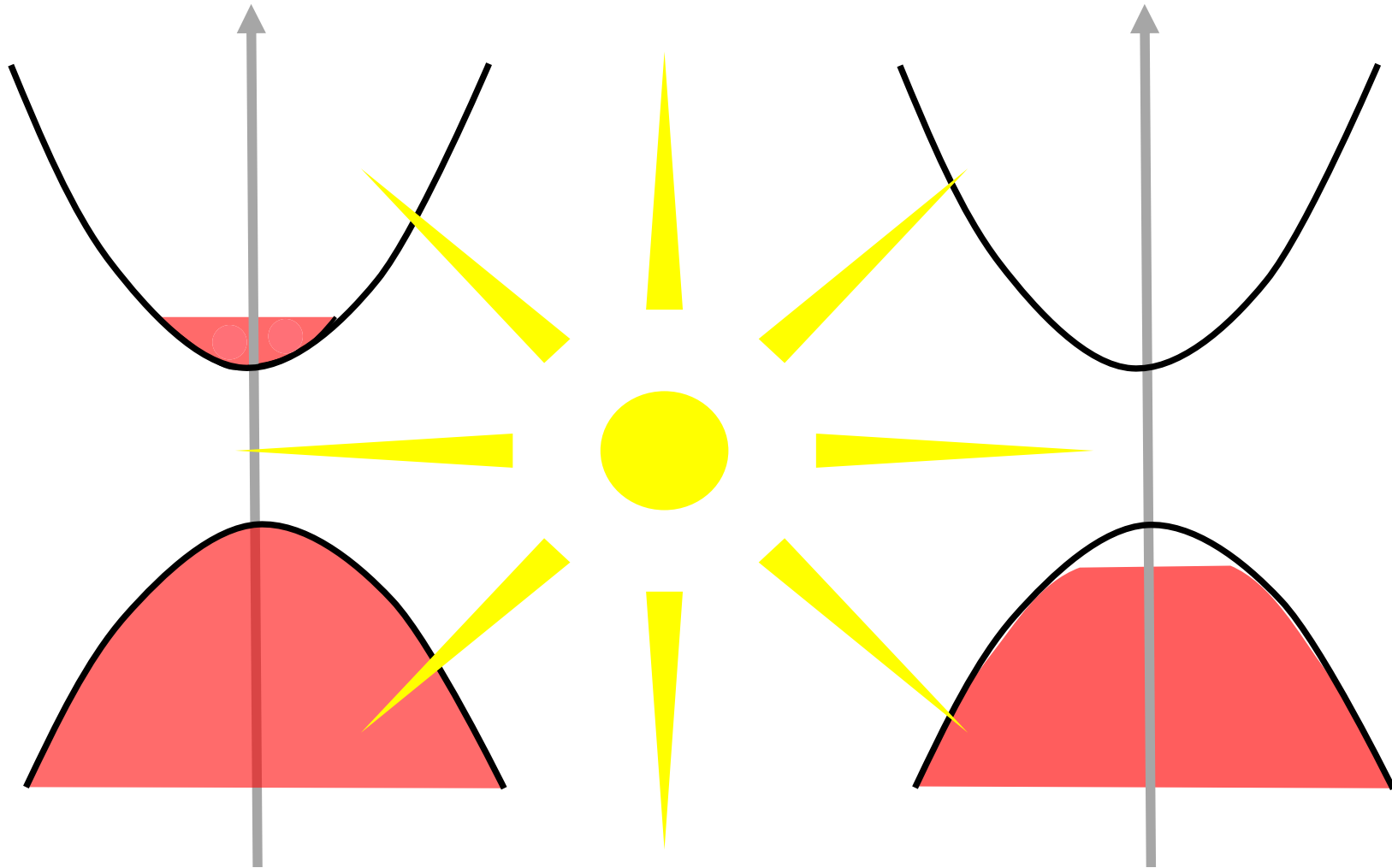
permet de faire de petits interrupteurs ou amplificateurs ou portes logiques

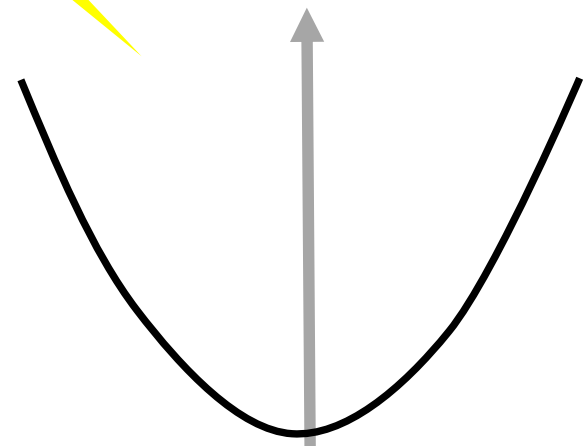
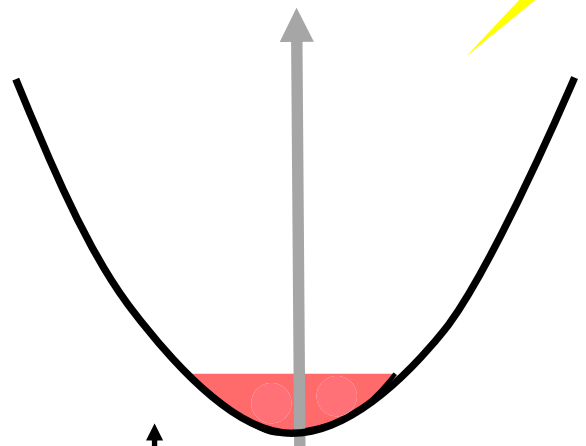
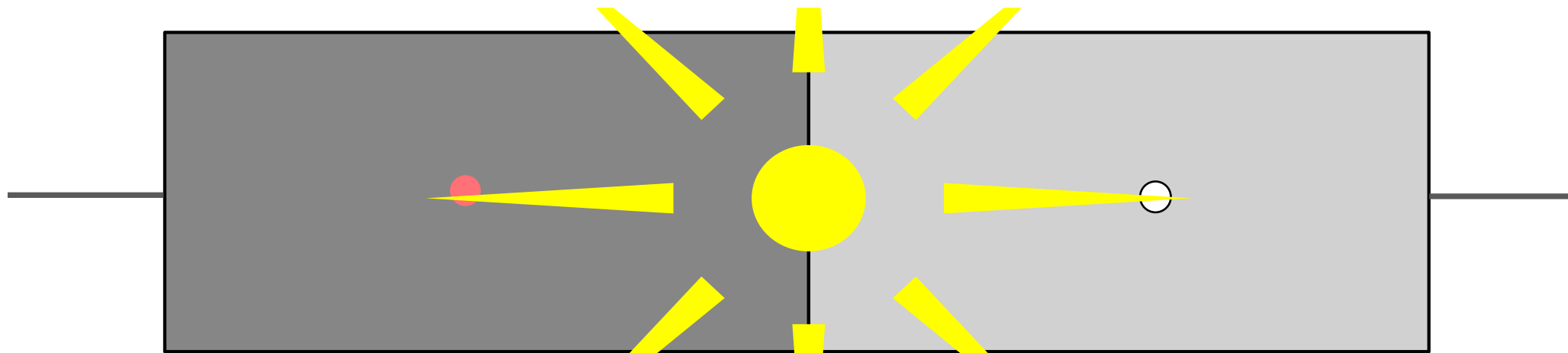


le mosfet : Metal Oxyde
Semiconductor Field Effect
Transistor de l'ordre de 50
à 100 nm

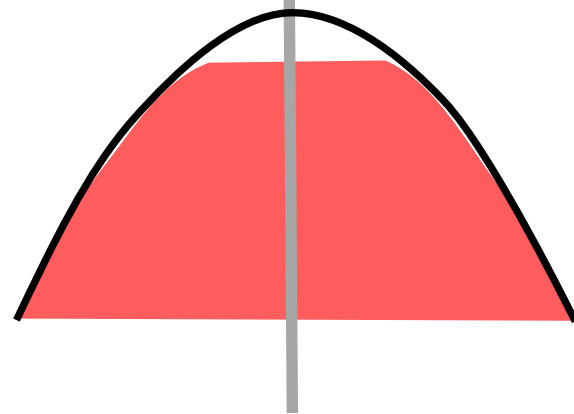
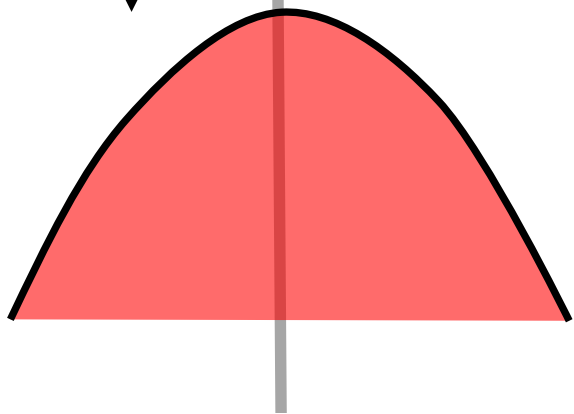
- On veut contrôler le passage de charges de la source vers le drain
- On commande le courant entre source et drain via la ddp entre grille et substrat: si suffisante, il apparaît un courant via un canal qu'on contrôle via cette ddp.

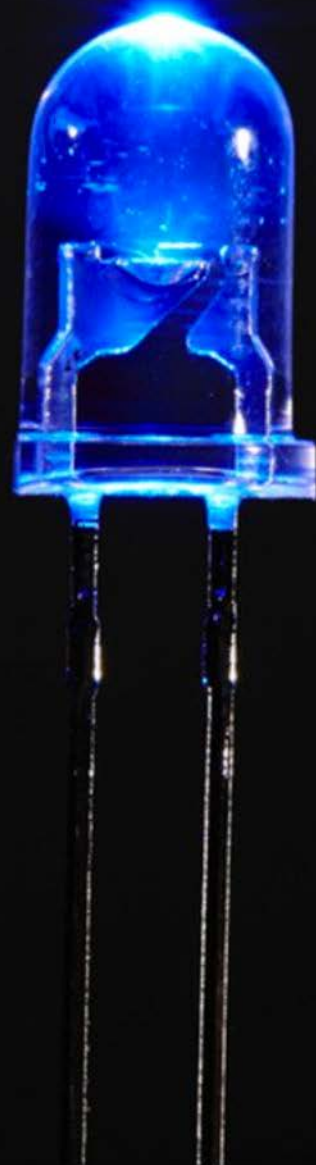
les LEDS



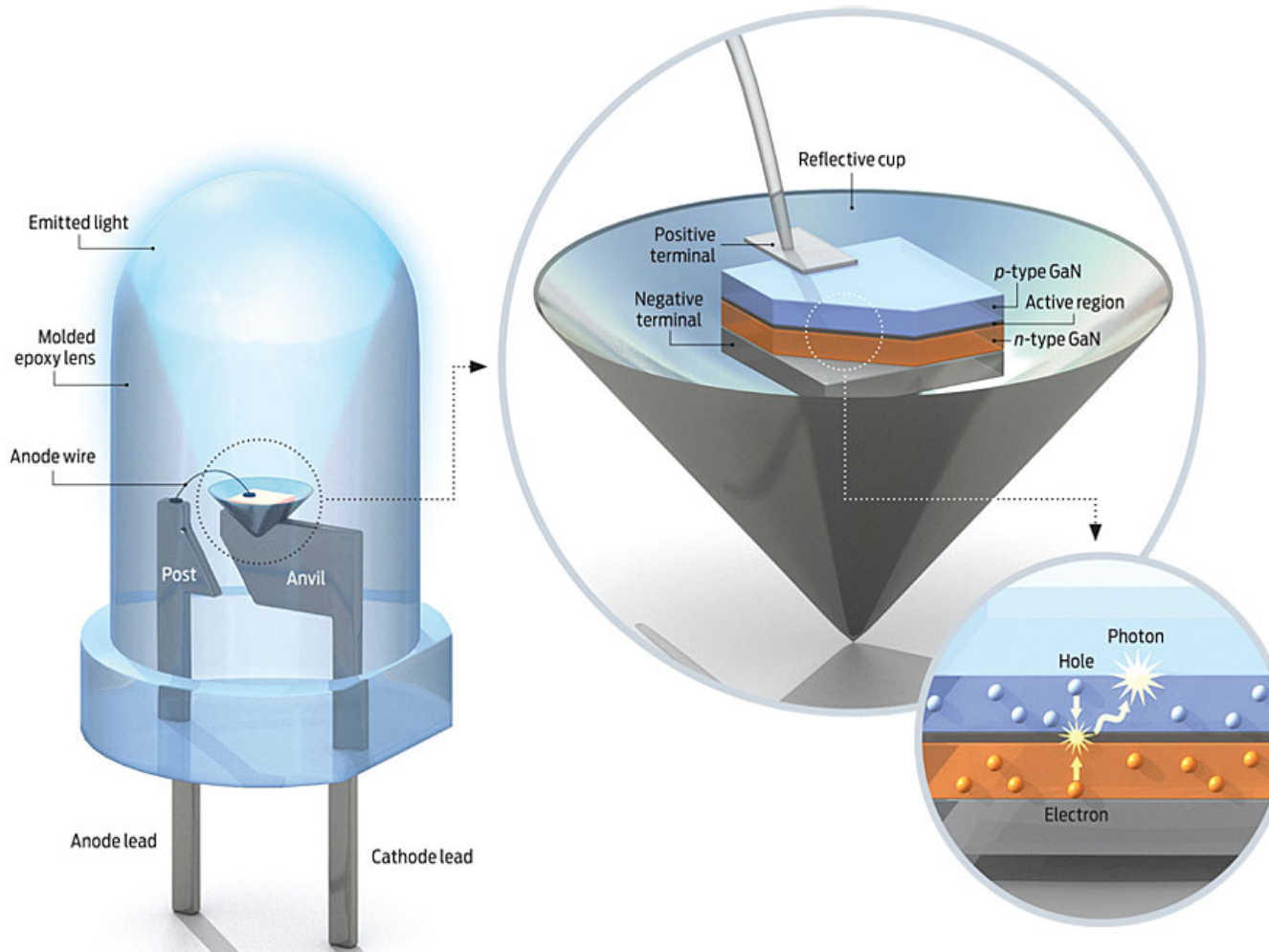


ce gap impose
la couleur:
 $E_{\text{gap}} = h c / \lambda$





les LEDs (diodes électroluminescentes)



Le courant électrique sur la LED provoque le déplacement d'électrons et de « trous » qui se rencontrent et se recombinent en produisant de la lumière

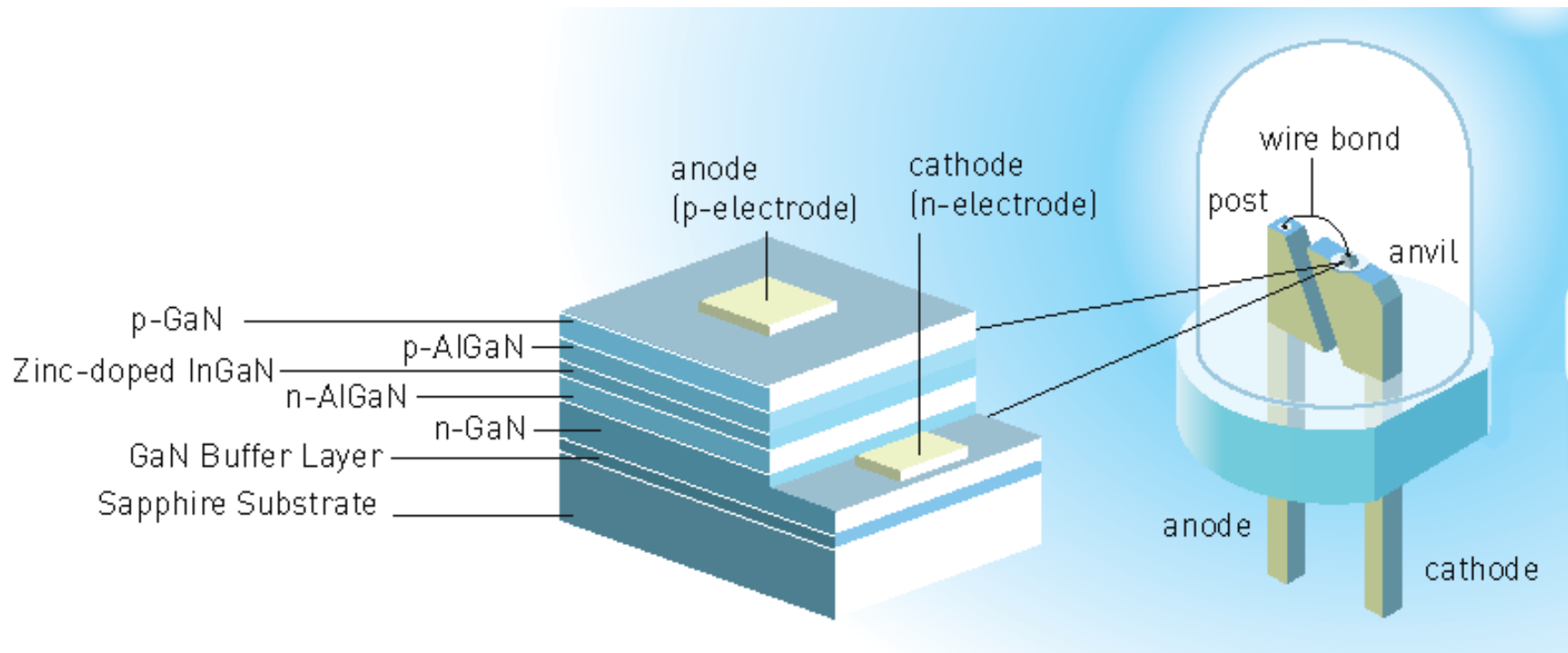
The Nobel Prize in Physics 2014



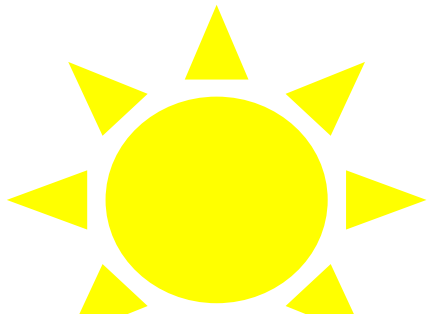
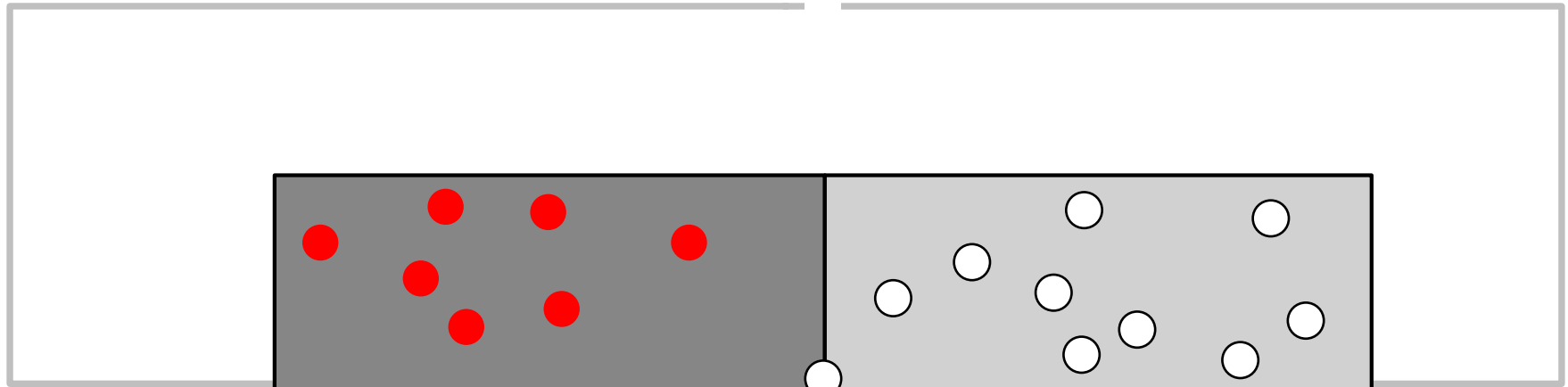
The Nobel Prize in Physics 2014



« Pour Isamu Akasaki, Hiroshi Amano et Shuji Nakamura pour l'invention de LEDs bleues efficaces qui ont permis de créer des sources de lumière blanches lumineuses et économes en énergie. »



les cellules photovoltaïques

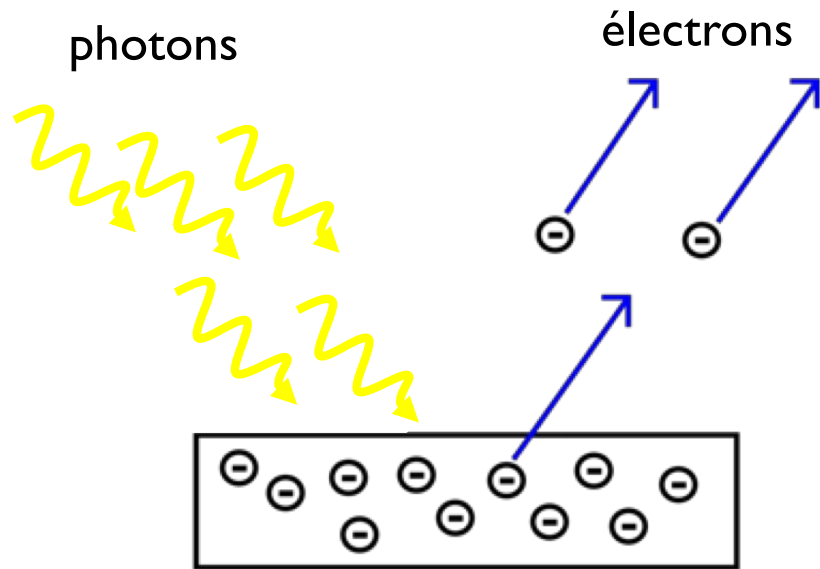


trous

électrons

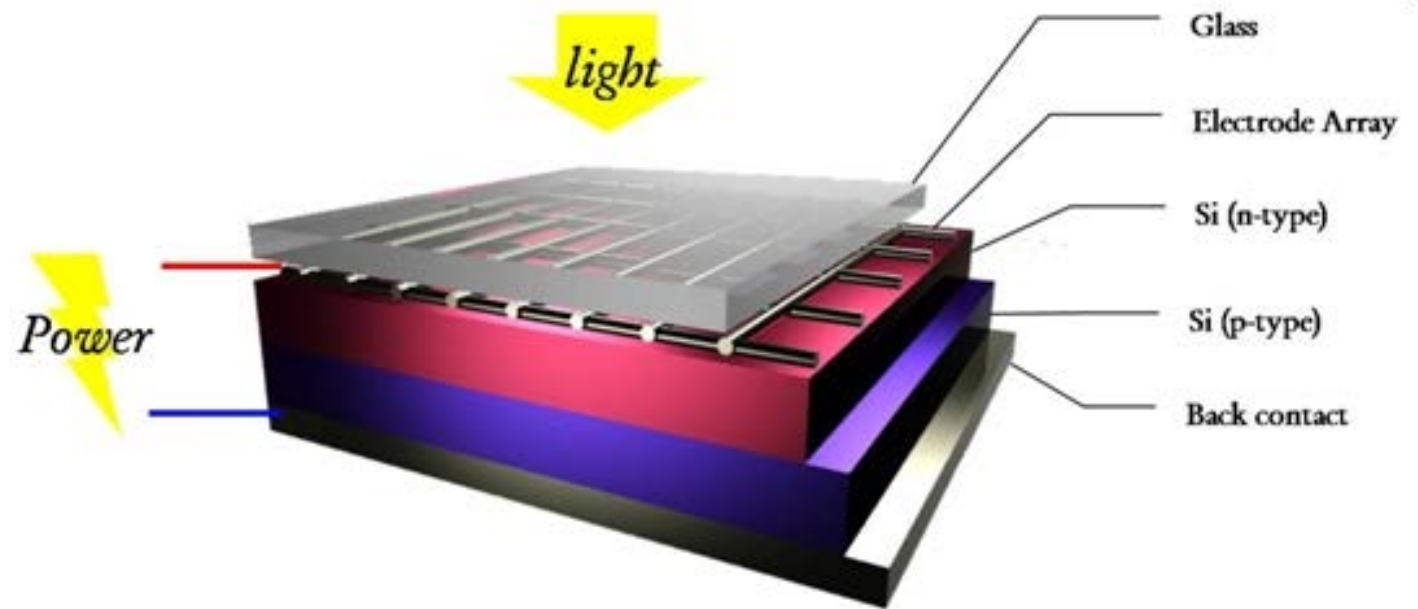
L'application à l'énergie solaire :

L'effet photoélectrique pour produire de l'électricité :
le photovoltaïque



Les différentes technologies de cellules

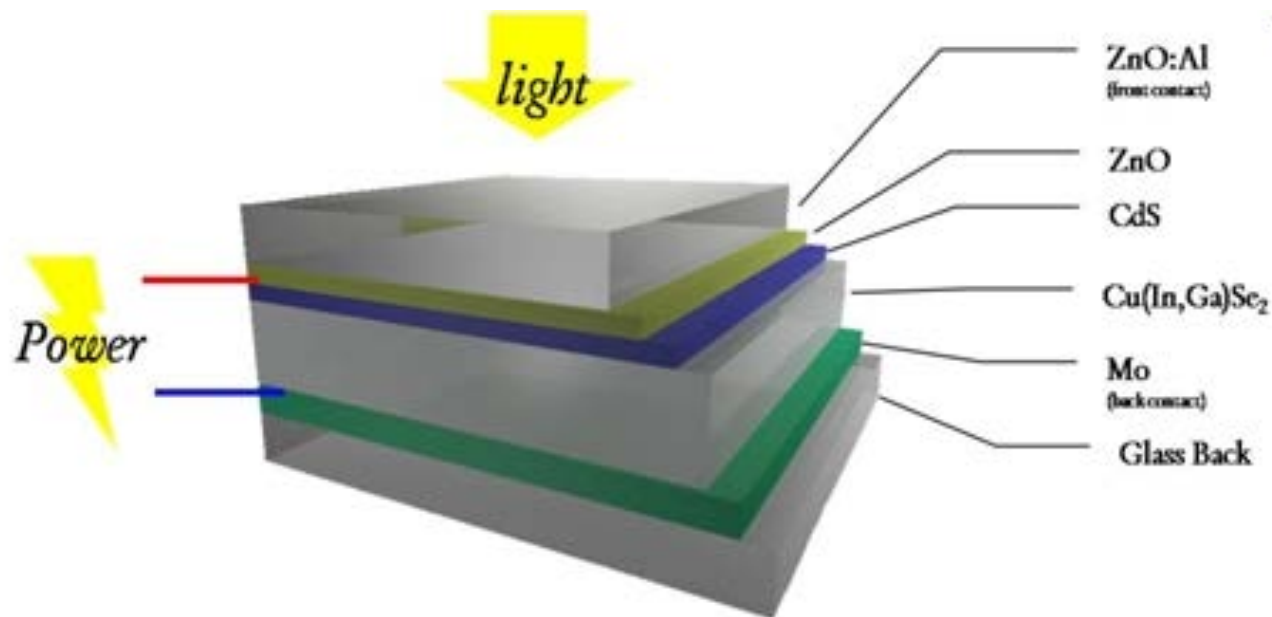
cellule semiconducteur silicium :
majoritaire sur le marché
efficacité faible (max : 20 à 30%)



Les différentes technologies de cellules

couches minces : épaisseur $1 \mu\text{m}$ au lieu de $100 \mu\text{m}$

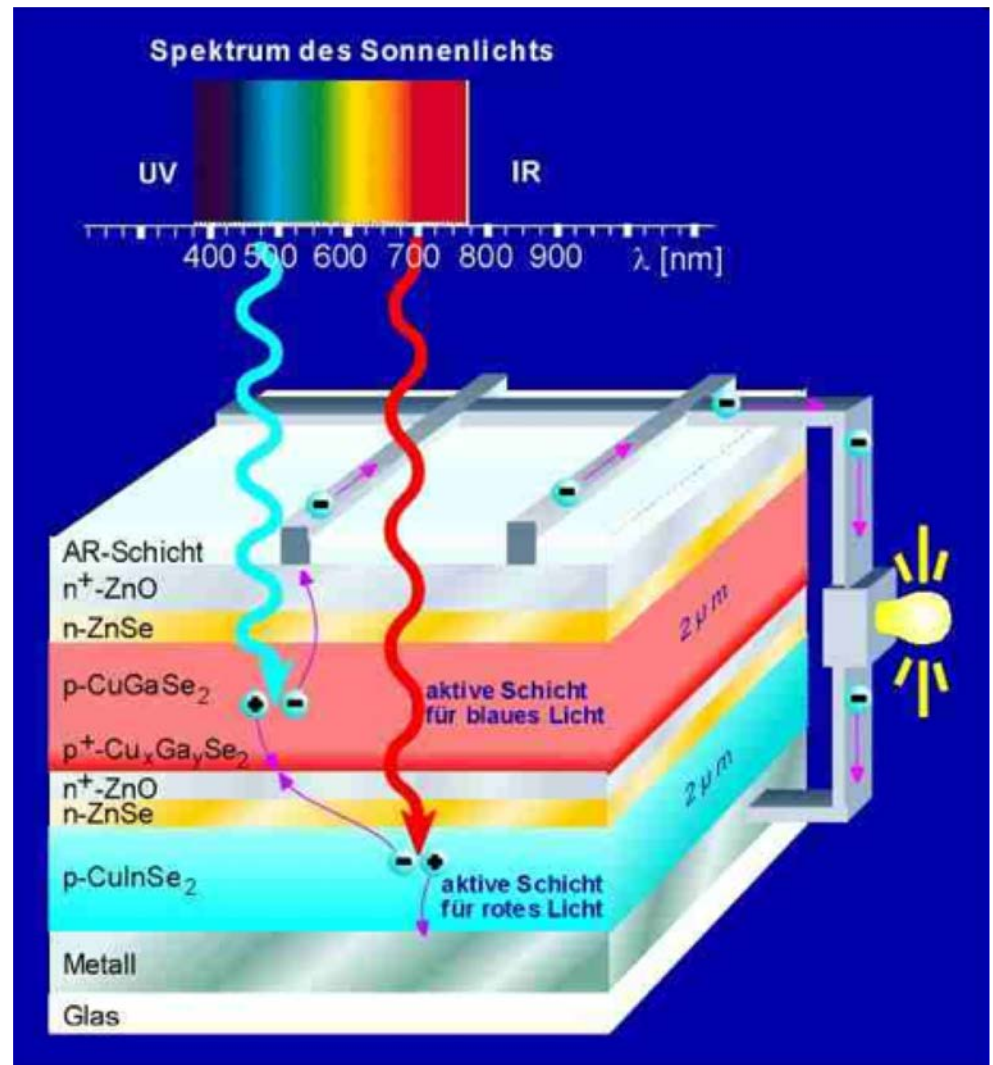
utilisent moins de matière: moins coûteuse et flexible
mais efficacité encore faible (15 à 20%)



Les différentes technologies de cellules

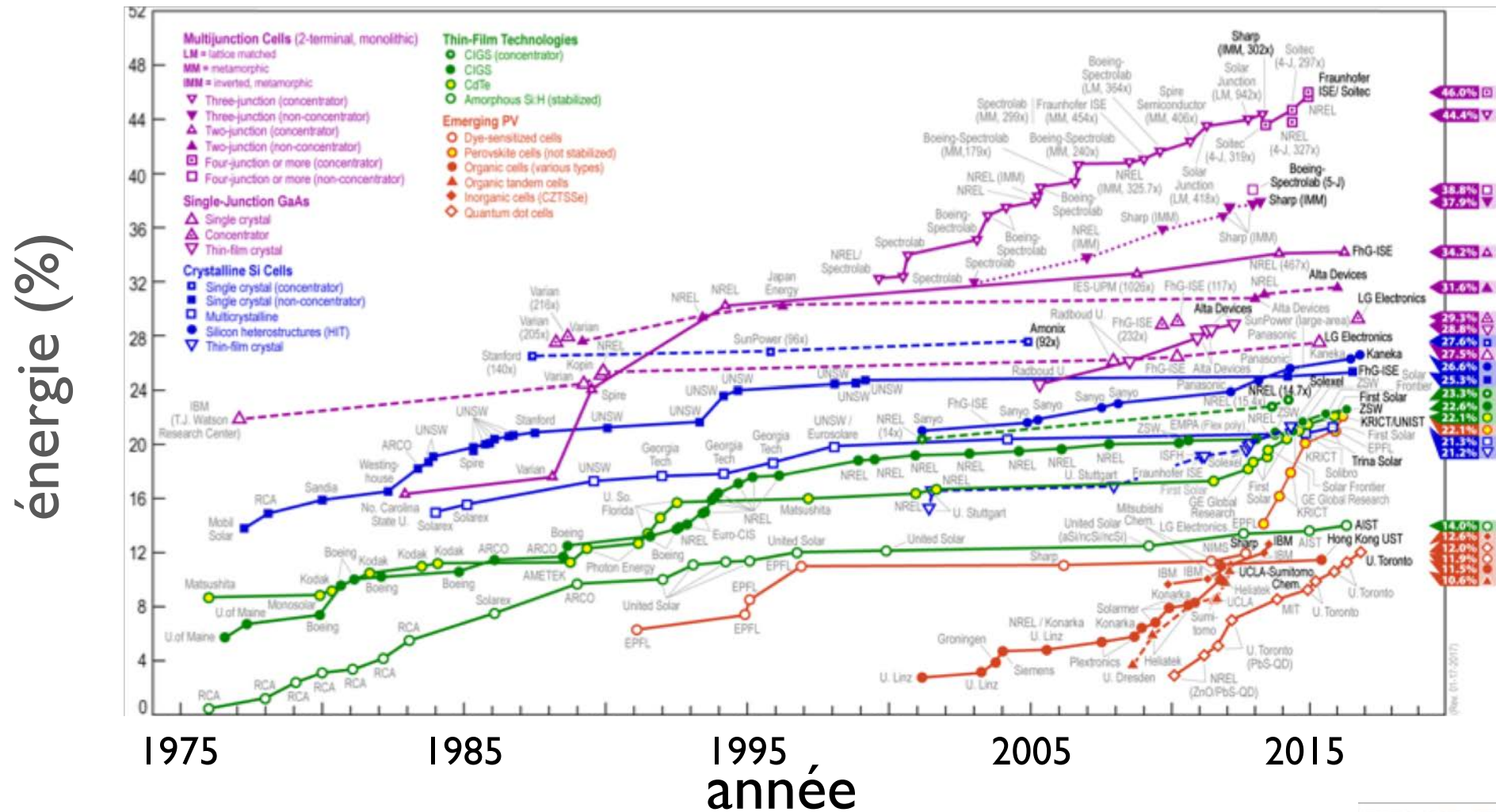
multijonctions : 3 cellules au lieu d'une, chacune pour absorber une couleur

utilisent des matériaux à gap différent donc efficacité bien meilleure (jq 40%) car absorbe différentes couleurs (une par couche)



Comparaison des cellules photovoltaïques

silicium - multijonctions - films minces – nouvelles technos



PCE : rapport entre électricité générée et lumière reçue dans des conditions standard d'ensoleillement

le futur des cellules : beaucoup de technologies possibles

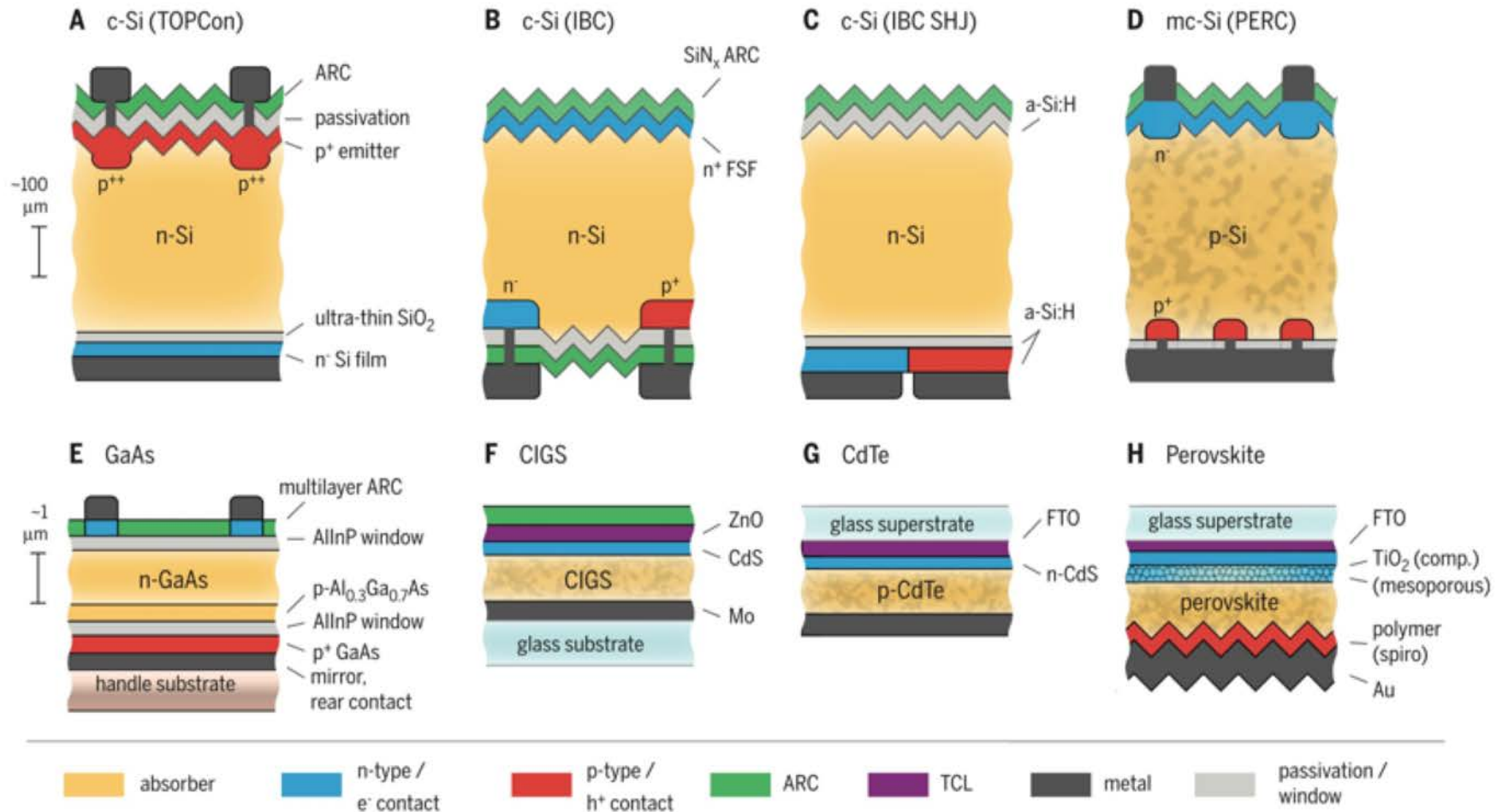
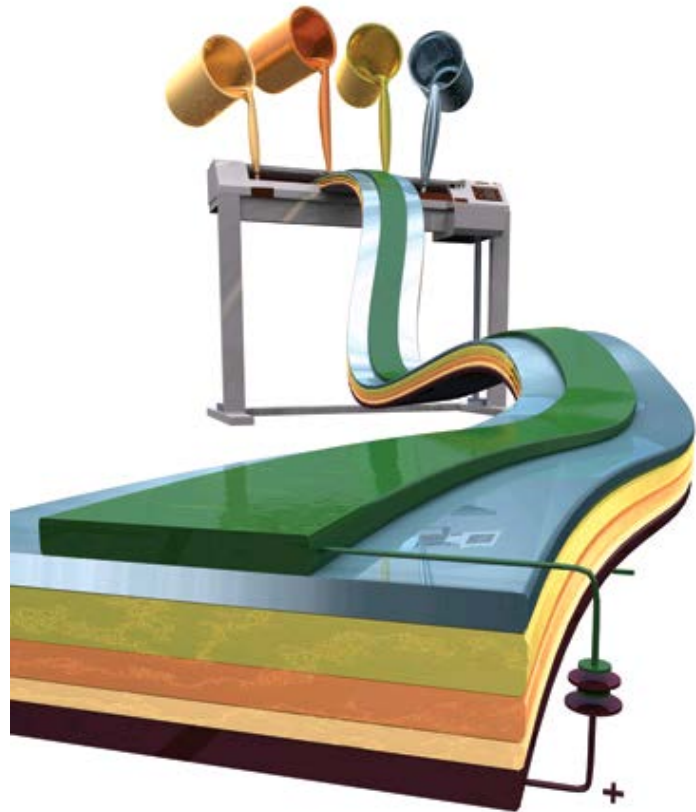
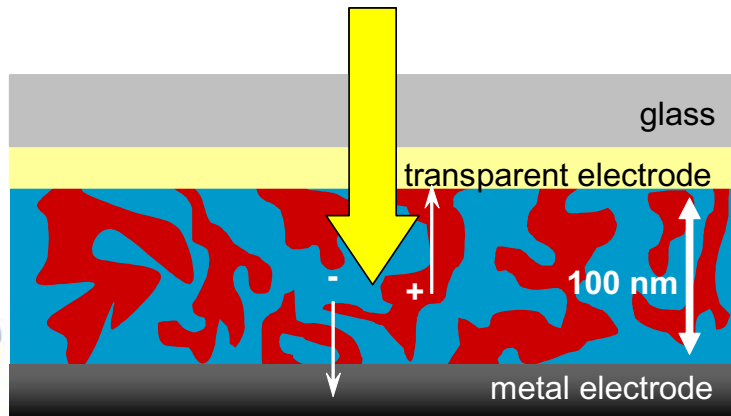


Fig. 4. Layer and contact geometry for solar cells with record efficiencies above 20%. (A) TOPCon crystalline Si (Fraunhofer). **(B)** IBC crystalline Si (SunPower). **(C)** Heterojunction IBC crystalline Si (Panasonic). **(D)** Multicrystalline Si (Trina Solar). **(E)** GaAs thin film (Alta Devices). **(F)** CIGS thin film (ZSW Stuttgart). **(G)** CdTe thin film (First Solar). **(H)** Perovskite thin film (KRICT). For industrial cells, the exact geometry is not publicly available.

technologies émergentes : cellules photovoltaïques organiques à colorant.



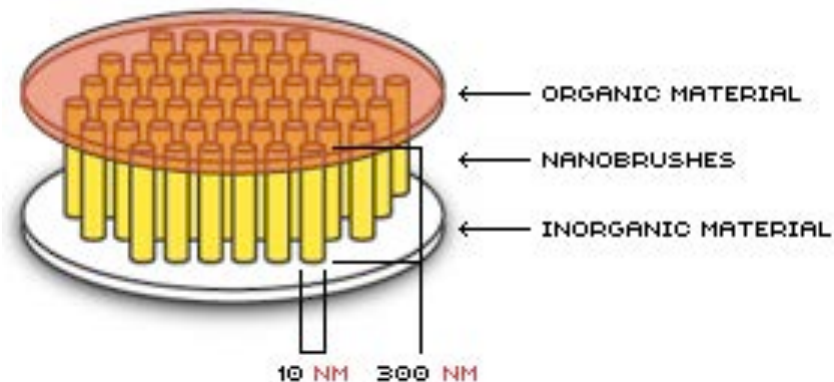
Interpenetrating Nanostructured Networks



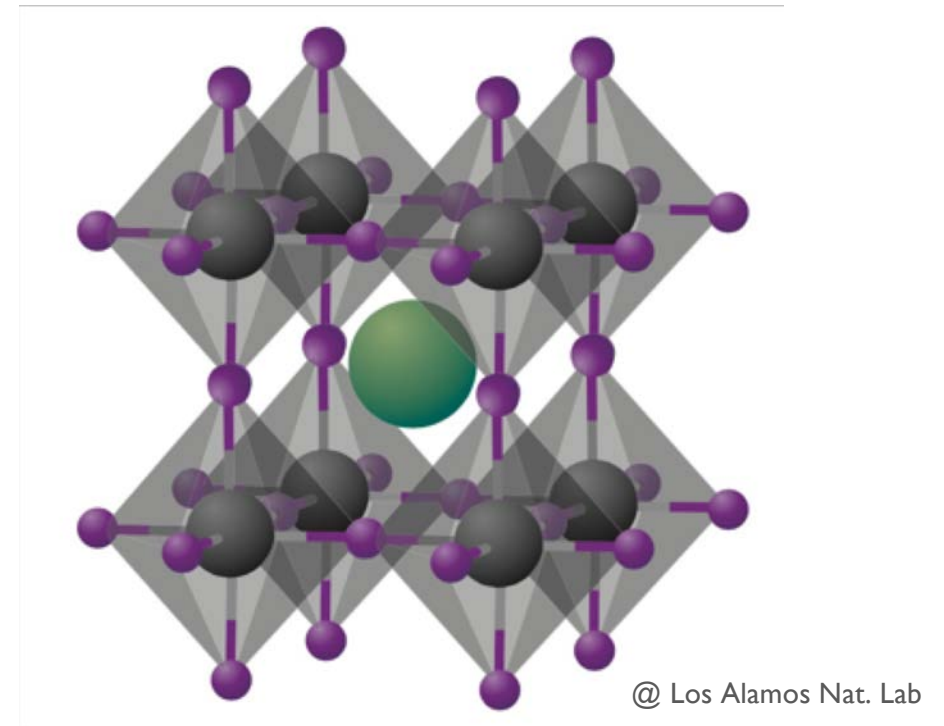
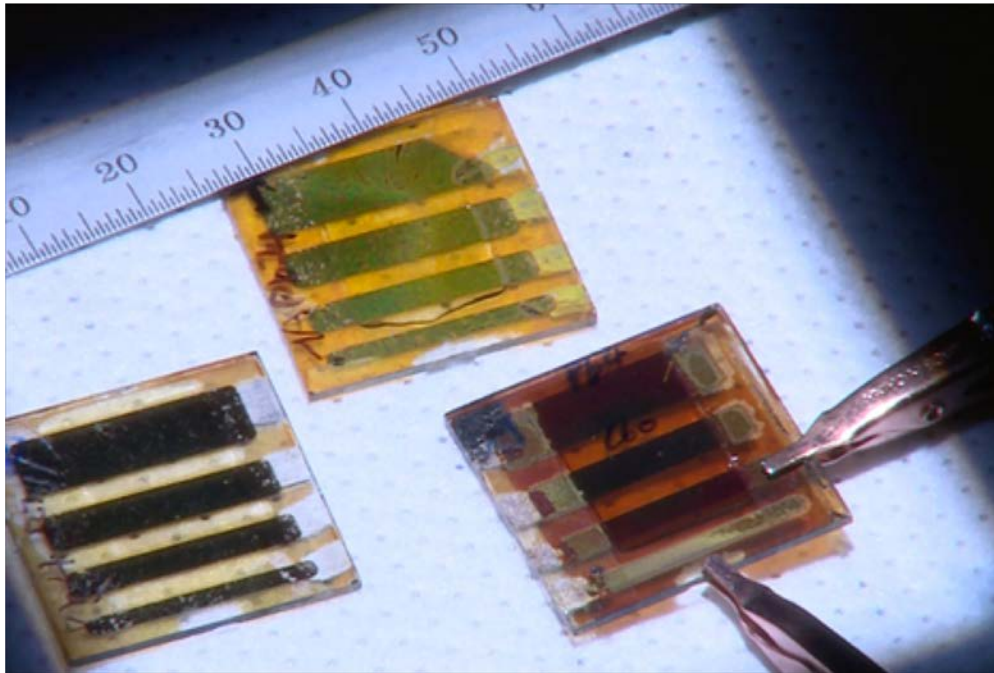
colorant
organique dans
milieu nano poreux

Nanotechnology Solar Cell Design

THE IDEAL SOLAR CELL:



technologies émergentes : les cellules perovskites, rencontre avec la chimie



Plus souples, moins chères, moins polluantes à produire
(mais stabilité et toxicité...)

les capteurs CCD et CMOS

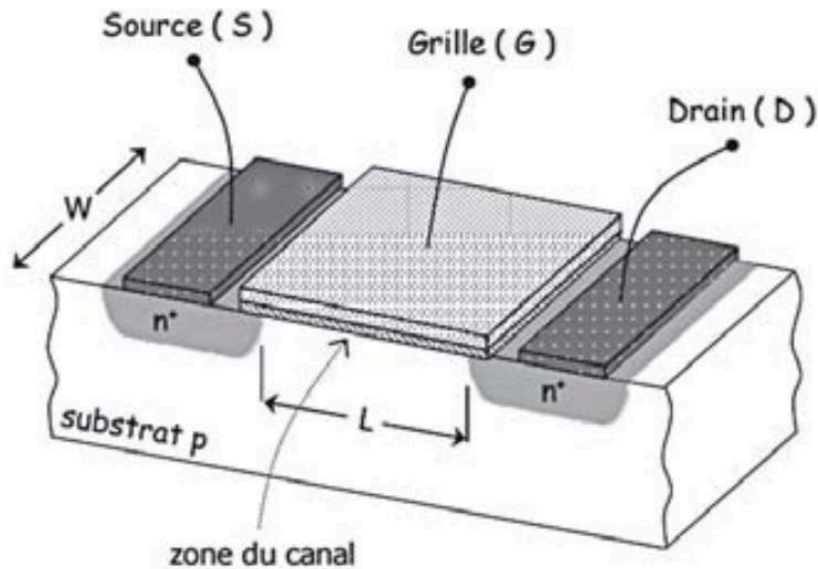
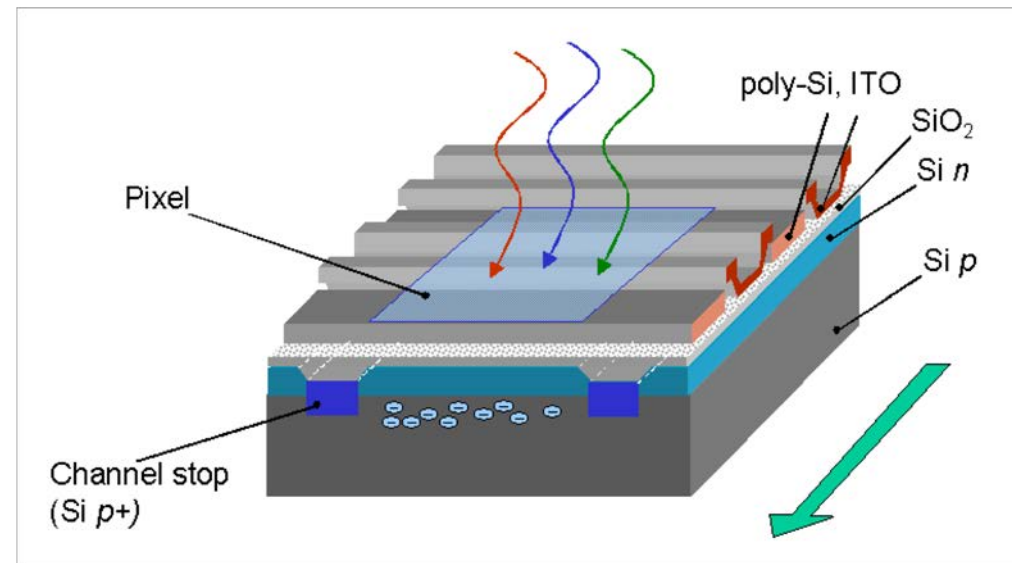


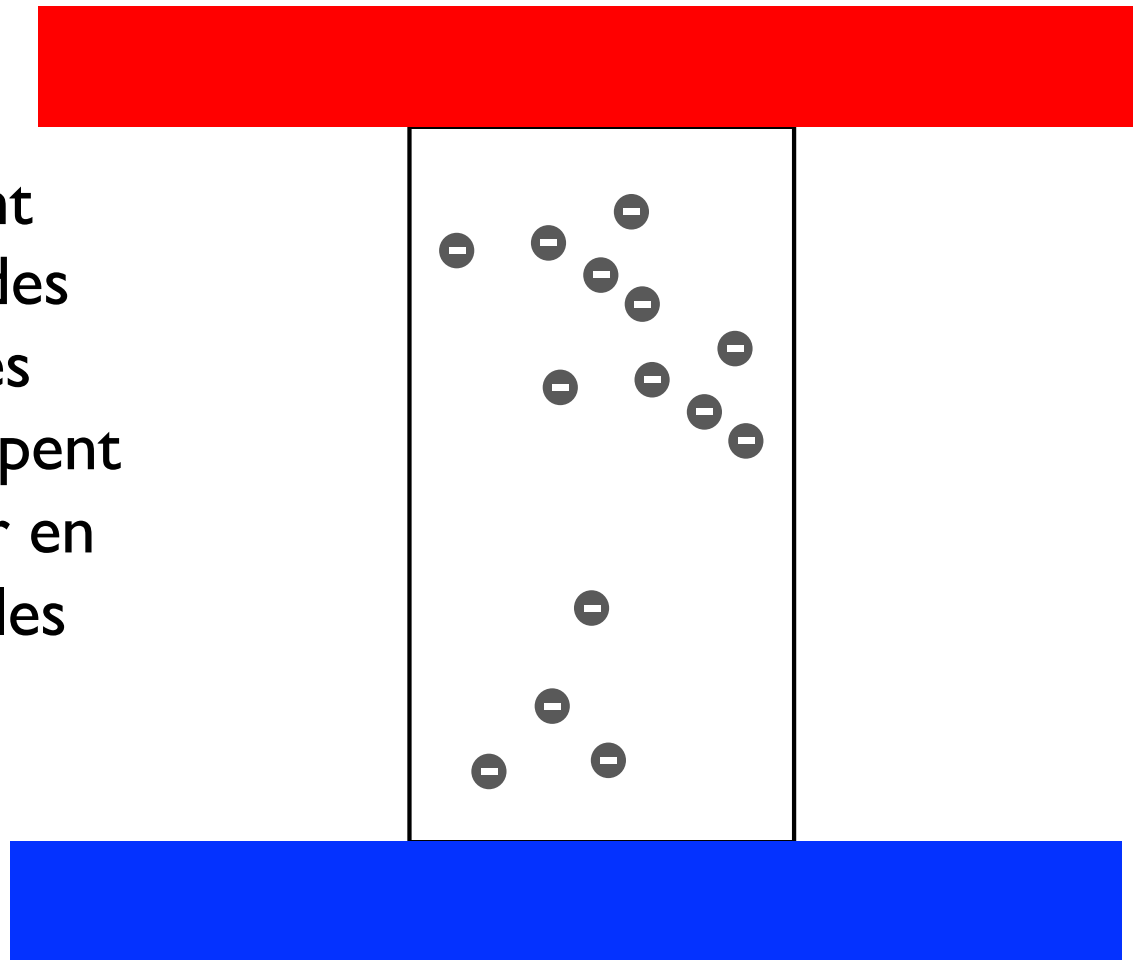
Figure 1. Schéma d'une capacité MOS. La grille (G) représente la zone photosensible tandis que les électrodes de source (S) et de drain (D) permettent de piéger les électrons dans le puits de potentiel situé sous chaque grille.

effet photoélectrique :
un photon incident crée une paire électron-trou et l'électron va aller sous l'effet du champ dans un puits sous la grille. Le nombre d'électrons piégé par capteur est proportionnel à l'intensité.

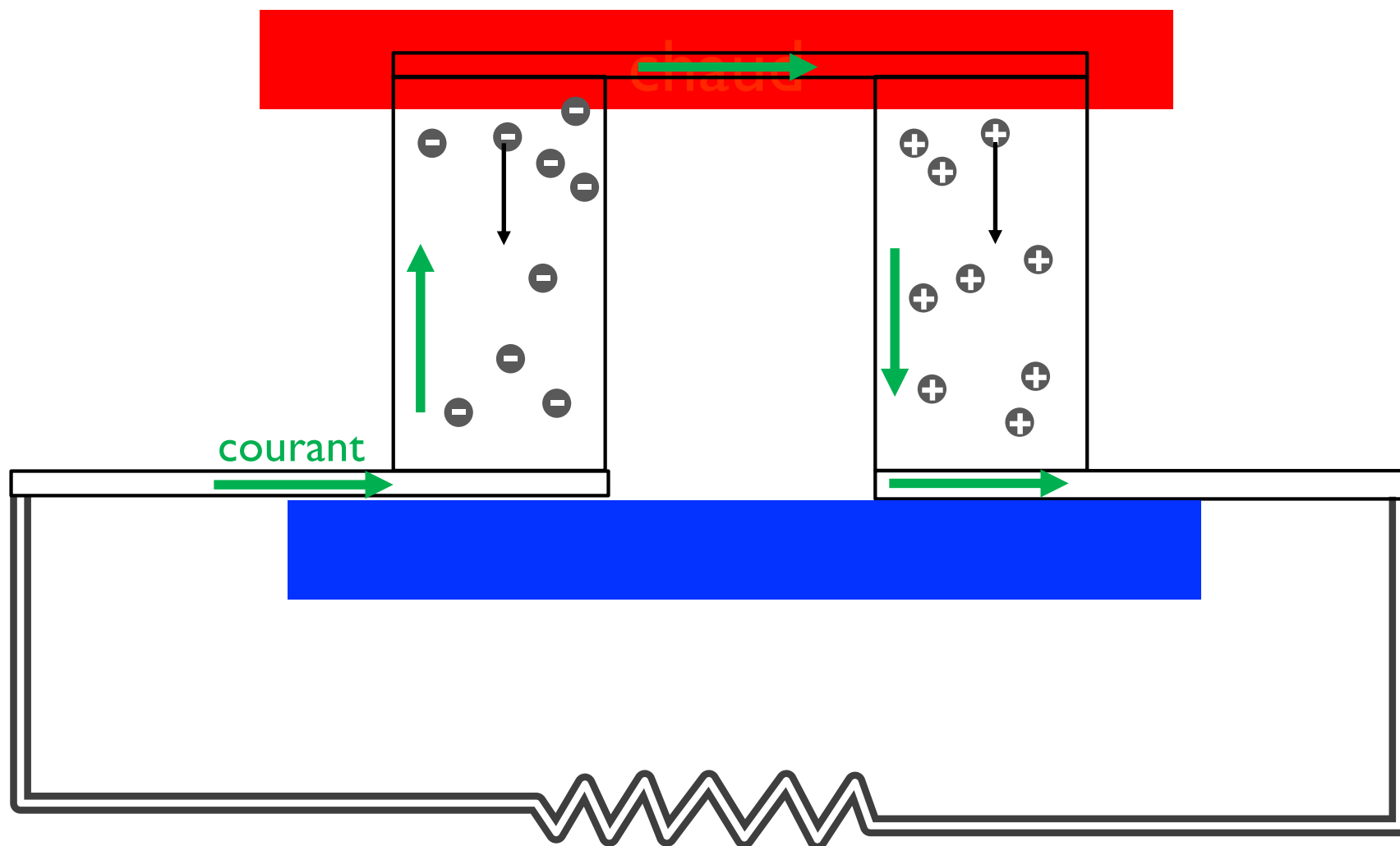


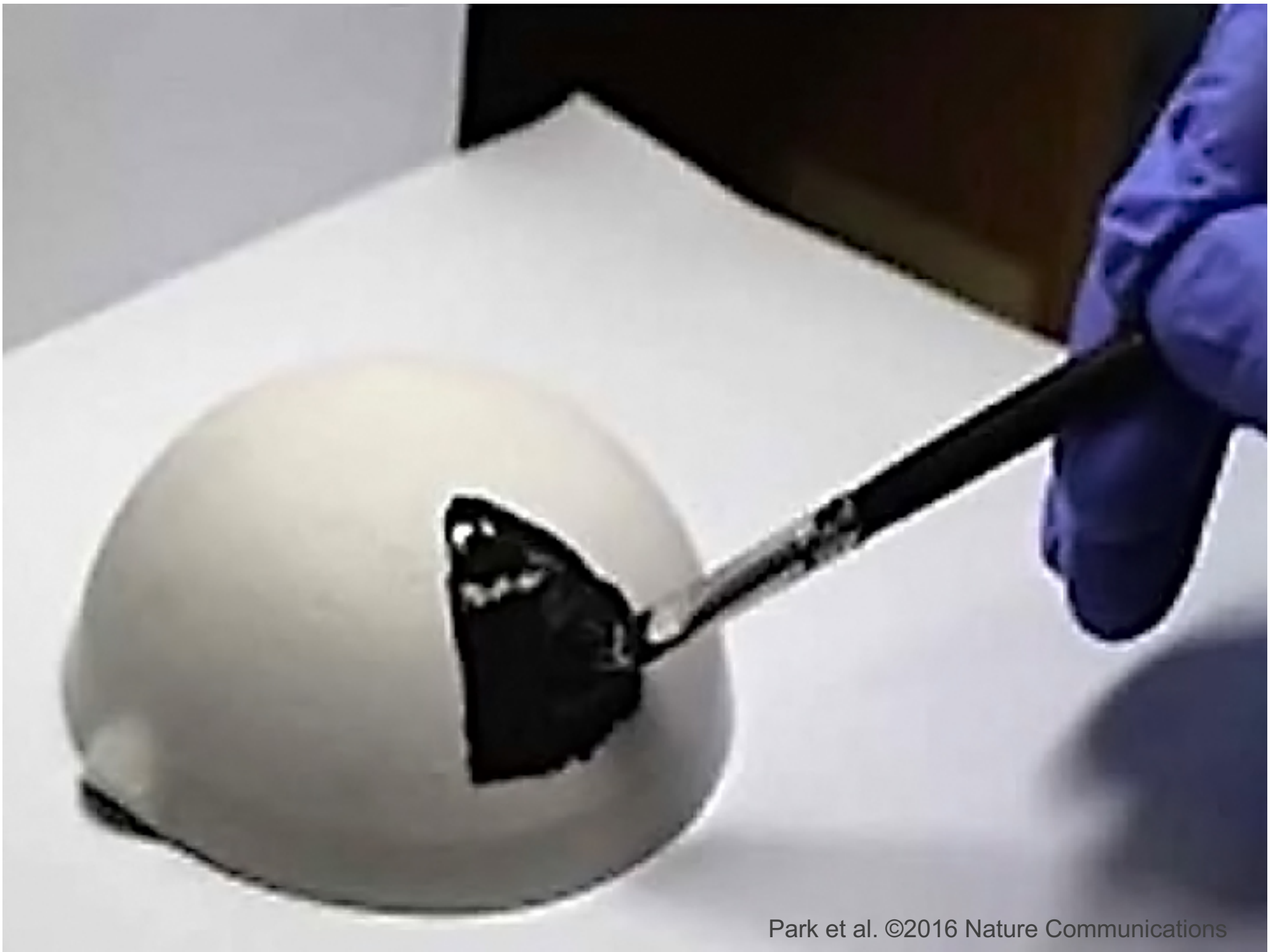
utilisation des semiconducteurs dopés les thermoélectriques

les charges vont
plus vite près des
régions chaudes
donc s'en échappent
et vont diffuser en
moyenne vers les
régions froides



Effet Seebeck : diffusion du chaud vers le froid côté trous et électrons, mais charges opposées. Donc génère un courant dans le circuit. Besoin de matériaux qui conduisent bien l'électricité mais mal la chaleur.





Le futur des technologies
quantiques ?

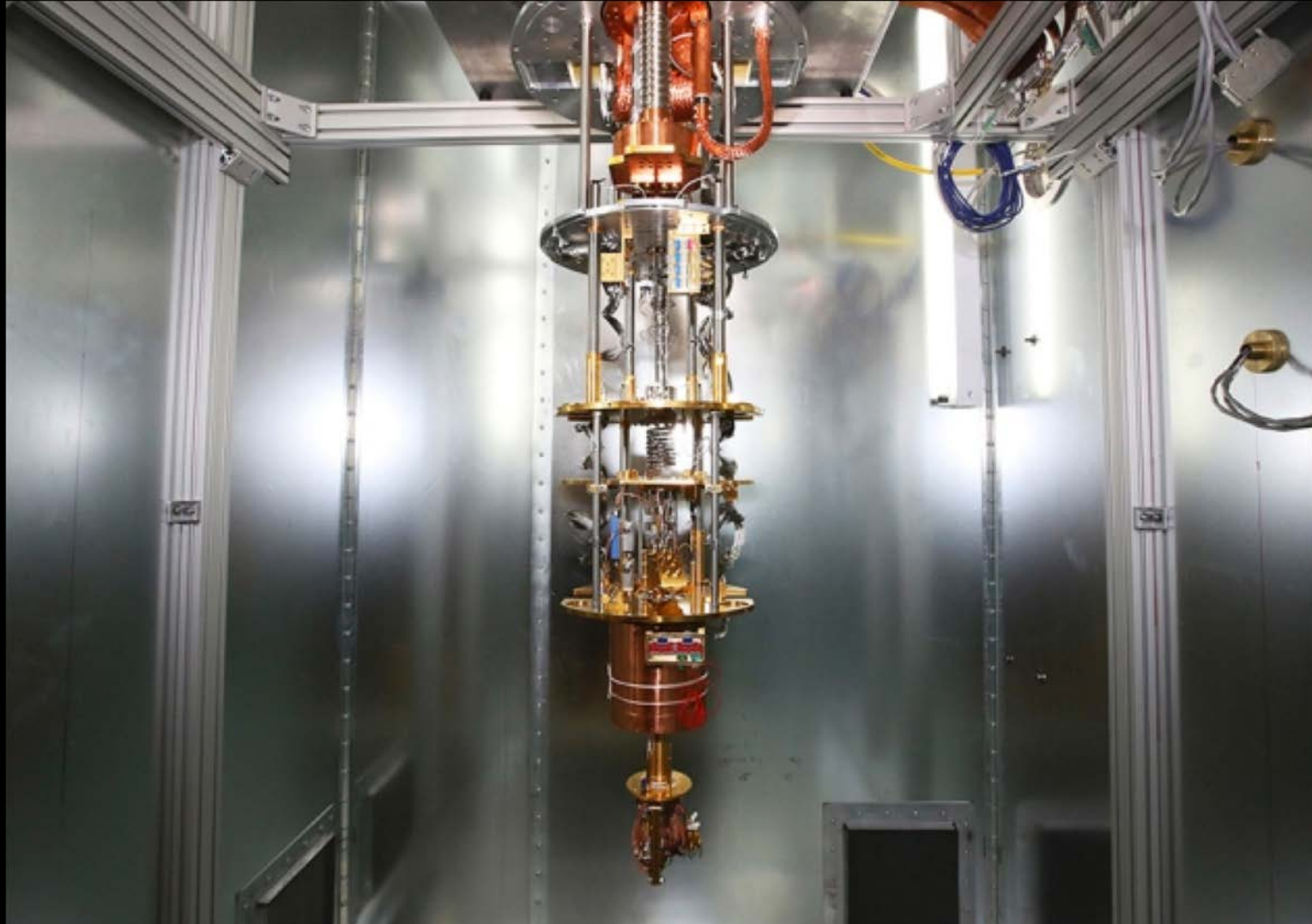
des matériaux pour l'environnement



prédire des propriétés sur mesure



ordinateurs ou simulateurs quantiques



communication et crypto quantique

RESEARCH ARTICLE

QUANTUM OPTICS

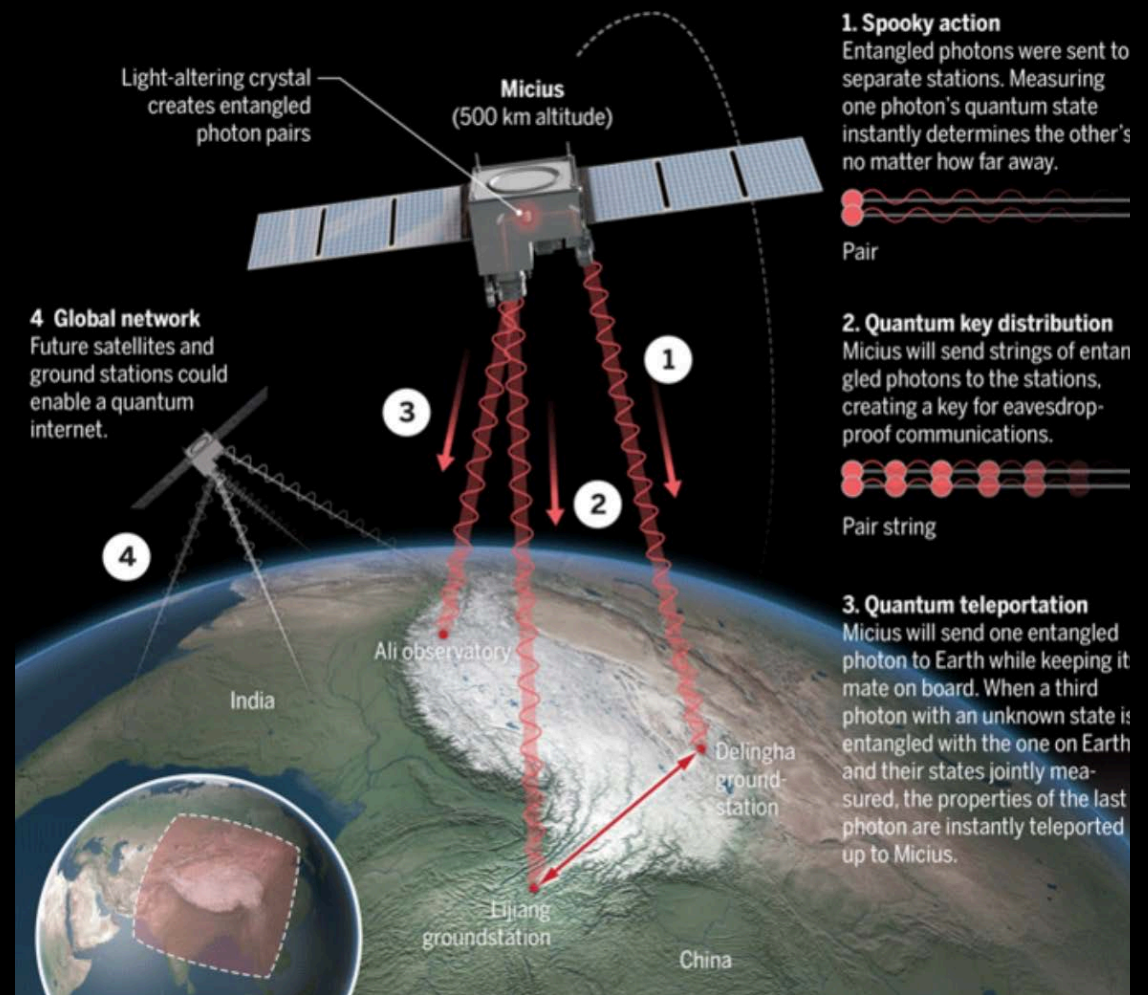
Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers

Juan Yin,^{1,2} Yuan Cao,^{1,2} Yu-Huai Li,^{1,2} Sheng-Kai Liao,^{1,2} Liang Zhang,^{2,3} Ji-Gang Ren,^{1,2} Wen-Qi Cai,^{1,2} Wei-Yue Liu,^{1,2} Bo Li,^{1,2} Hui Dai,^{1,2} Guang-Bing Li,^{1,2} Qi-Ming Lu,^{1,2} Yun-Hong Gong,^{1,2} Yu Xu,^{1,2} Shuang-Lin Li,^{1,2} Feng-Zhi Li,^{1,2} Ya-Yun Yin,^{1,2} Zi-Qing Jiang,³ Ming Li,³ Jian-Jun Jia,³ Ge Ren,⁴ Dong He,⁴ Yi-Lin Zhou,⁵ Xiao-Xiang Zhang,⁶ Na Wang,⁷ Xiang Chang,⁸ Zhen-Cai Zhu,⁵ Nai-Le Liu,^{1,2} Yu-Ao Chen,^{1,2} Chao-Yang Lu,^{1,2} Rong Shu,^{2,3} Cheng-Zhi Peng,^{1,2*} Jian-Yu Wang,^{2,3*} Jian-Wei Pan^{1,2*}

Long-distance entanglement distribution is essential for both foundational tests of quantum physics and scalable quantum networks. Owing to channel loss, however, the previously achieved distance was limited to ~100 kilometers. Here we demonstrate satellite-based distribution of entangled photon pairs to two locations separated by 1203 kilometers on Earth, through two satellite-to-ground downlinks with a summed length varying from 1600 to 2400 kilometers. We observed a survival of two-photon entanglement and a violation of Bell inequality by 2.37 ± 0.09 under strict Einstein locality conditions. The obtained effective link efficiency is orders of magnitude higher than that of the direct bidirectional transmission of the two photons through telecommunication fibers.

Quantum leaps

China's Micius satellite, launched in August 2016, has now validated across a record 1200 kilometers the "spooky action" that Albert Einstein abhorred (1). The team is planning other quantum tricks (2–4).



de nouveaux états de la matière

