

# La matière et le froid (3)

- Condensat de Bose-Einstein
- Superfluidité
- Supersolidité

Pour une meilleure compréhension, certaines explications  
pourront être légèrement simplifiées/tronquées  
Images : Wikipedia sauf mention contraire

Julien Ramonet, mars 2025

Notions utilisées :

1. Introduction

45. La matière et le froid (1)

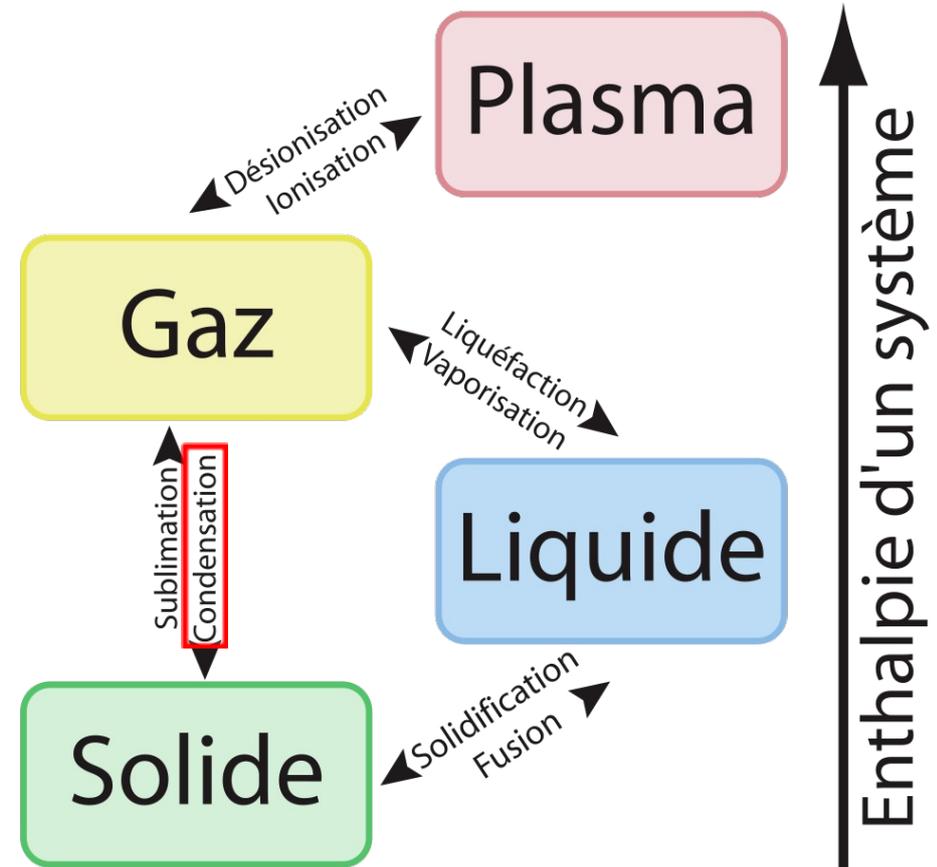
46. La matière et le froid (2)

# Transition de phase

- = changement de phase d'un système physique en raison d'une variation de température, de pression, d'excitation magnétique, ... → **changement des propriétés** du système
- Exemples :
  - Changements d'état
  - Changement des propriétés magnétiques
  - Supraconductivité, superfluidité
  - Condensation de Bose-Einstein

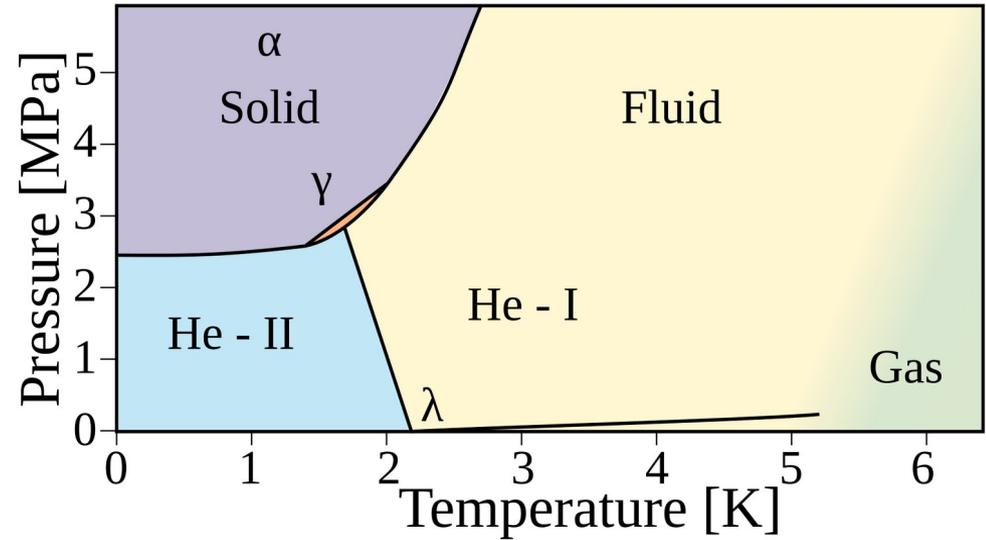
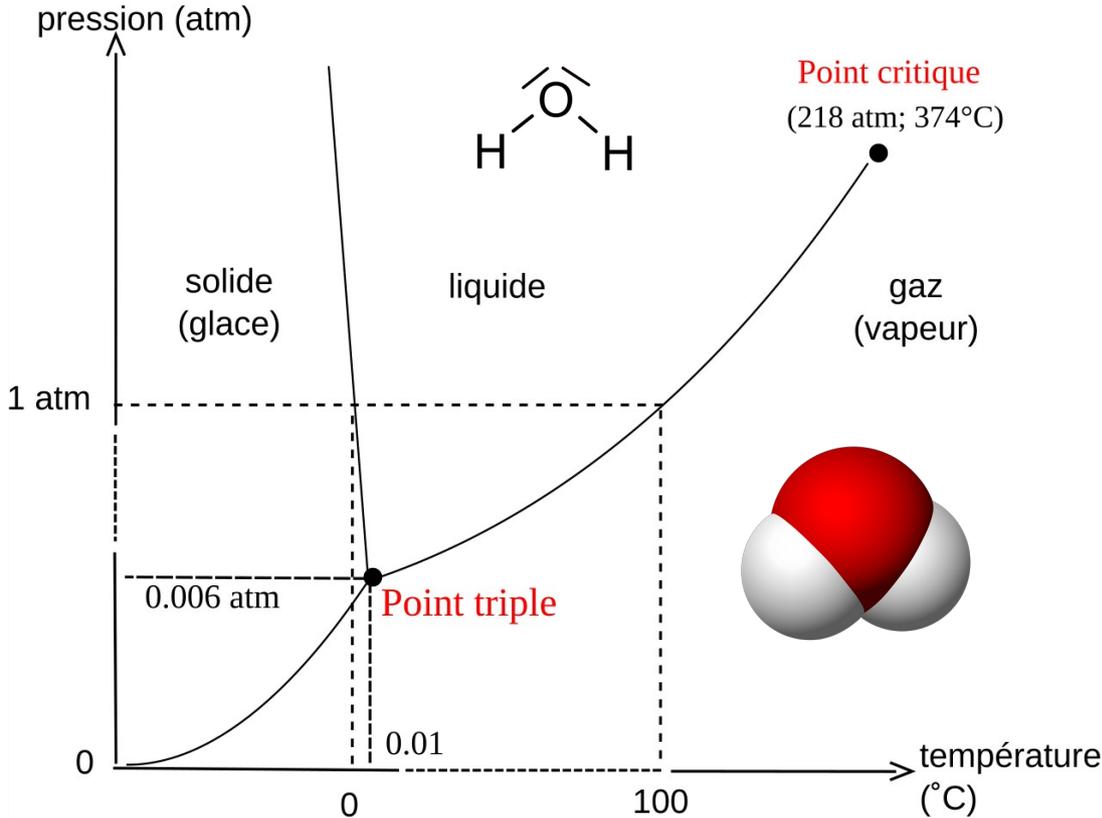
Étude mécanique et physique de froissement et dé-froissement des textiles cellulosiques à base de coton et lin

Lina Ben Hassine



# Les diagrammes de phase

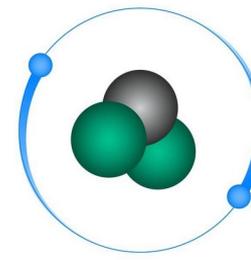
Diagramme indiquant les différentes phases d'un corps physique, en général dans un diagramme (p, T)



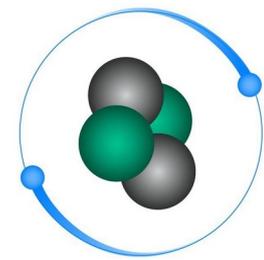
$^4\text{He}$

# Peuvent se représenter en 3D

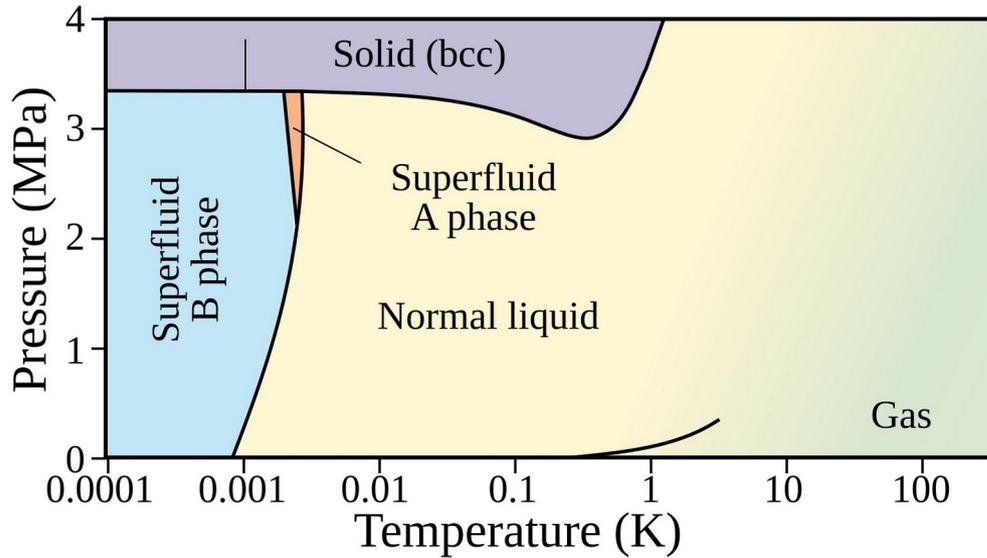
Ici :  $^3\text{He}$  (p, T, H)



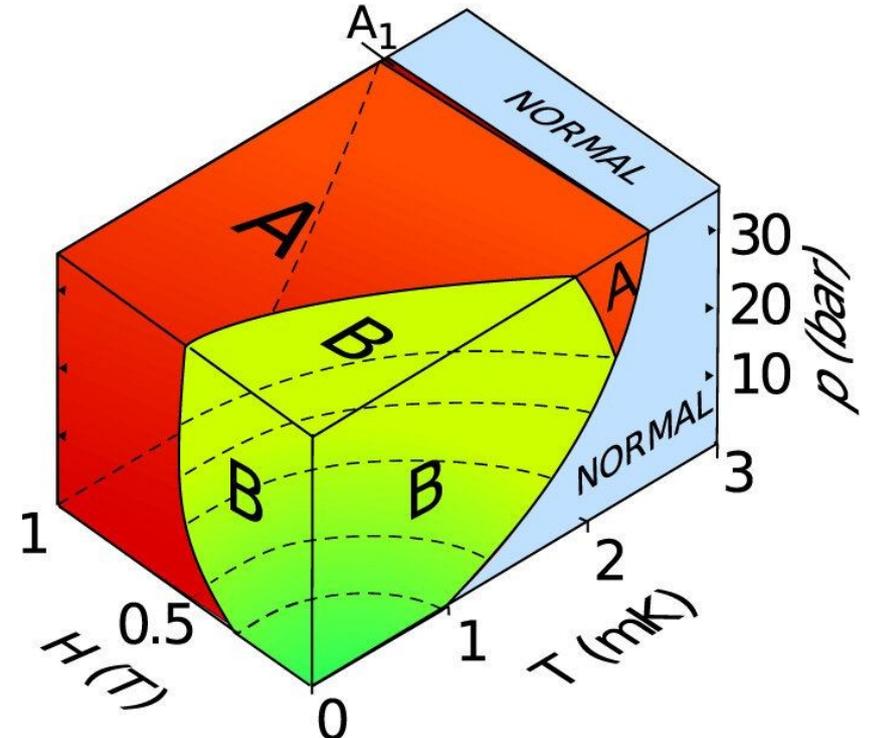
Helium-3  
2 protons, 1 neutron



Helium-4  
2 protons, 2 neutrons

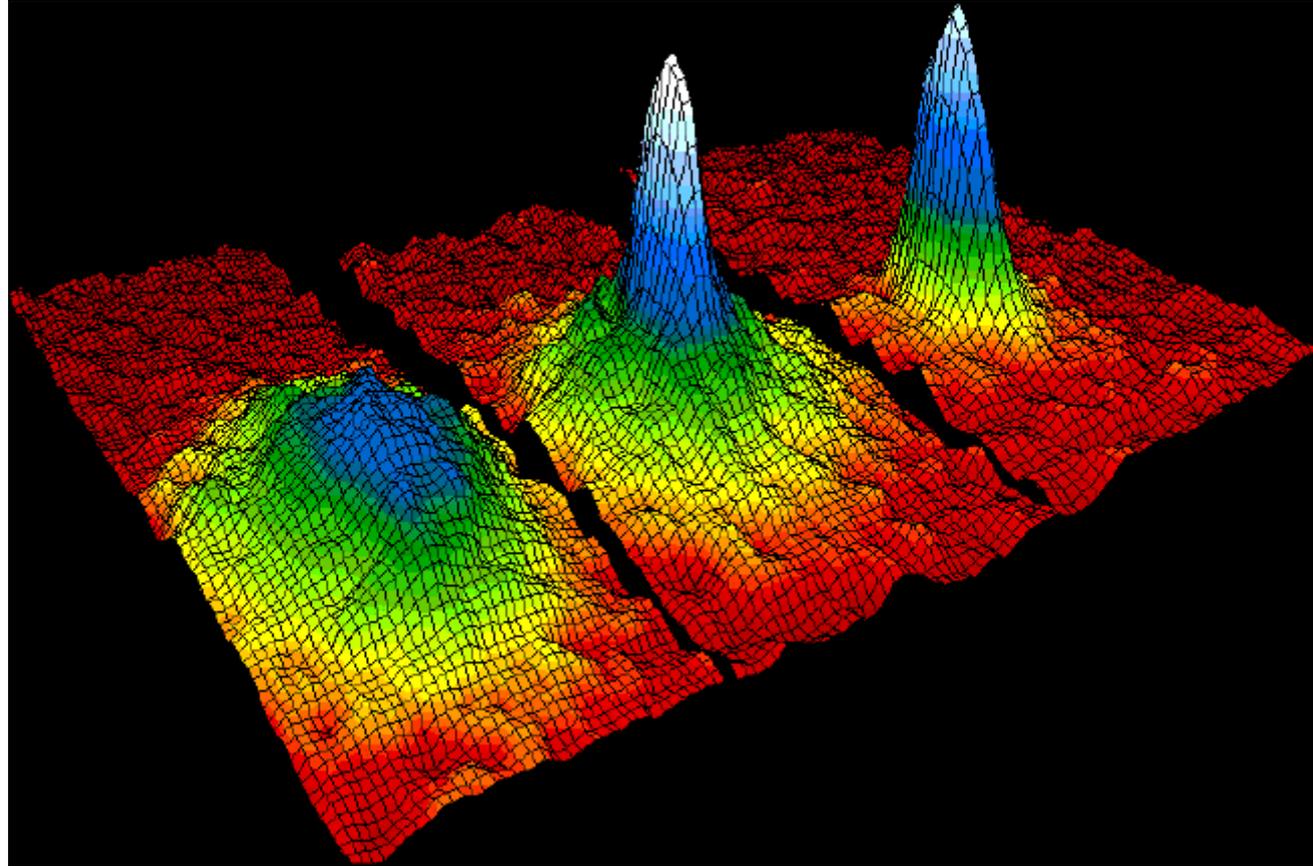


Note : échelle logarithmique de température



Éventuellement en 3D ( $^3\text{He}$ )

# Le condensat de Bose-Einstein



**3 états successifs : la température diminue et les atomes sont de plus en plus condensés (de la gauche vers la droite)**

# Fermions et bosons

## Fermions

- Particules de **spin demi-entier**
  - $\pm 1/2, 3/2, 5/2, \dots$
  - **Leptons** et **quarks**
  - Particules élémentaires ou non
  - **Représentent la matière**
- **Statistique de Fermi-Dirac**
  - Comportement individualiste : **deux fermions n'occupent jamais le même état quantique** (principe d'exclusion de Pauli, 1925)

« Théorème spin-statistique »

[youtube.com/watch?v=pWIk1gLkF2Y](https://www.youtube.com/watch?v=pWIk1gLkF2Y)

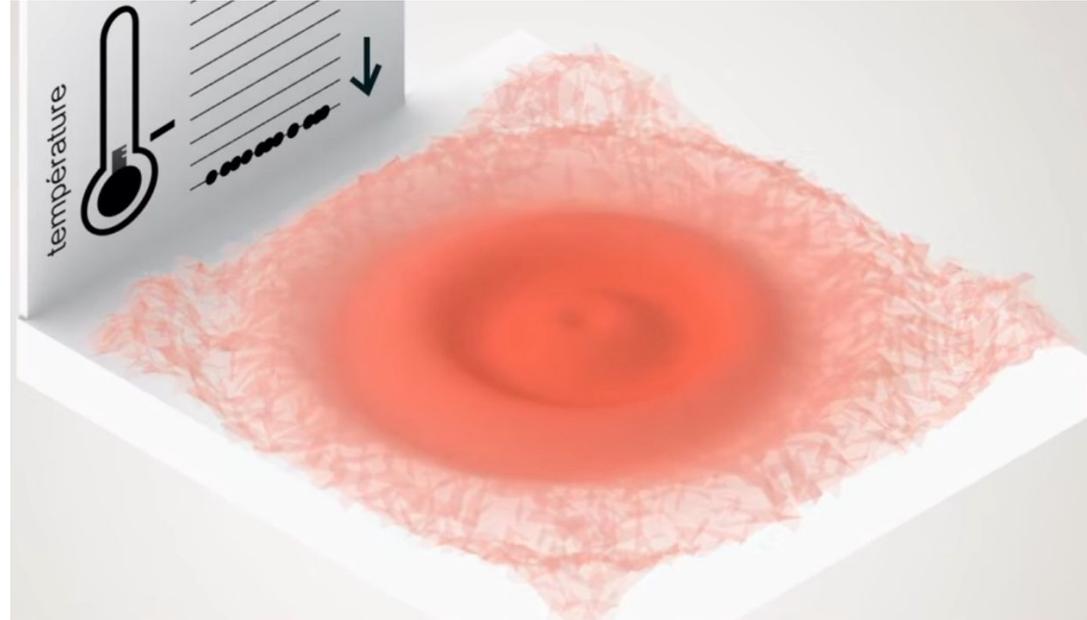
## Bosons

- Particules de **spin entier**
  - **Bosons de jauge, boson de Higgs**
  - **Véhiculent les forces**
- **Statistique de Bose-Einstein**
  - Comportement grégaire : tendent à **occuper le même état quantique** (« état fondamental ») à basse température
  - « **Condensat de Bose-Einstein** » (1925), lié à la **supraconductivité** et la **superfluidité**



# Le condensat de Bose-Einstein

- Organisation d'une population de **bosons** identiques en un **état quantique unique** d'énergie la plus basse possible → comportement « grégaire »
- = ordre à grande portée  
= état de cohérence  
= onde quantique géante  
= état quantique macroscopique
- $T \sim 10^{-7}$  K

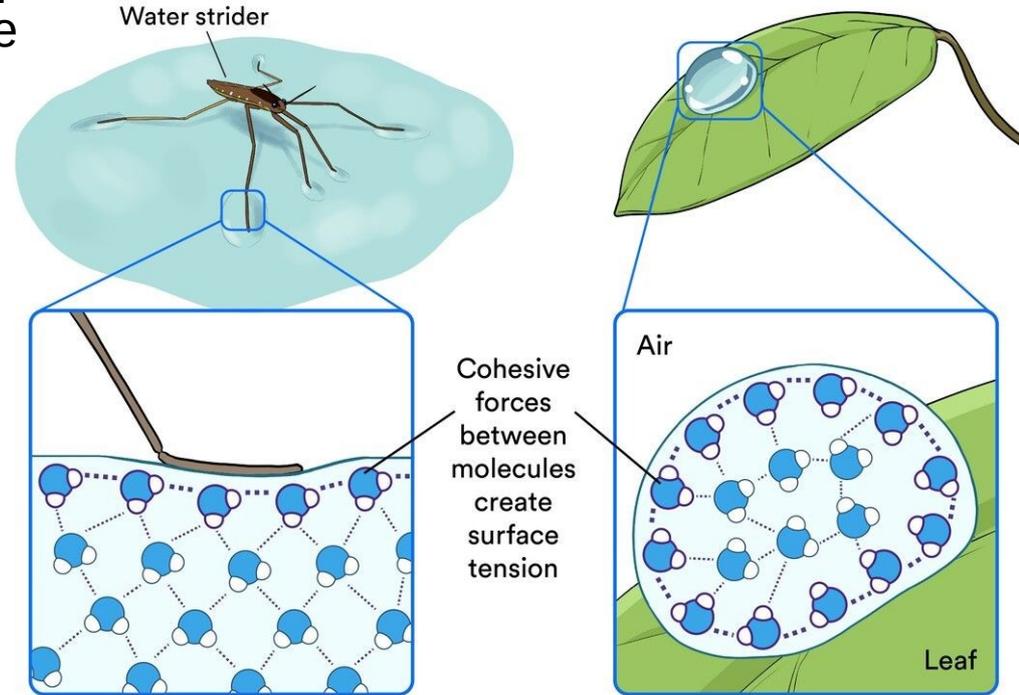
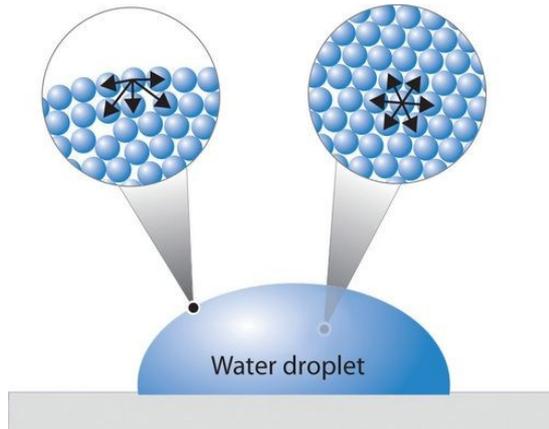


- Prédiction en 1925, obtention en 1995 → PNP 2001 (Cornell, Ketterle, Wieman) « pour la découverte de la condensation de Bose-Einstein dans des gaz dilués d'atomes alcalins et pour les premières études fondamentales des propriétés des condensats »

# La superfluidité

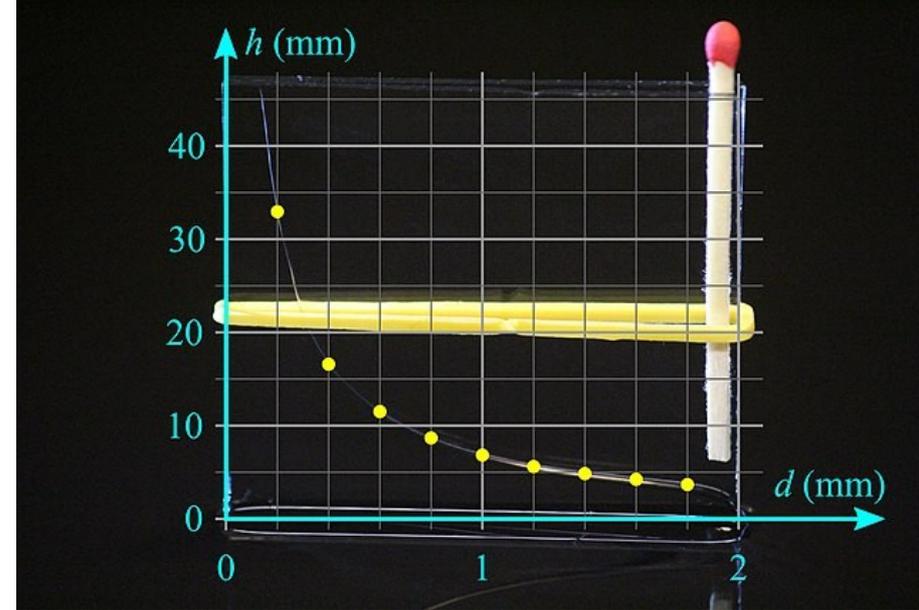
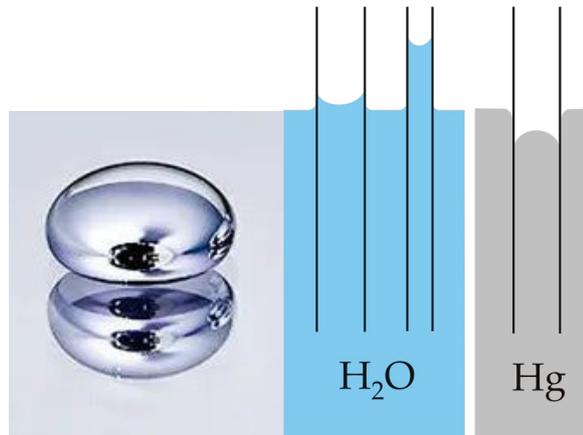
# La tension superficielle

- Une **interface** entre 2 fluides nécessite une **énergie surfacique** ( $\text{J}/\text{m}^2$ ) en raison de l'**organisation particulière des molécules** dans cette région
  - Les molécules à l'intérieur sont attirées par les molécules tout autour d'elles → énergie plus faible que les molécules en surface
- → « **tension superficielle** » ~ force qui tend à **minimiser la surface d'interface** entre 2 fluides (proportionnelle aux forces de cohésion intermoléculaires)



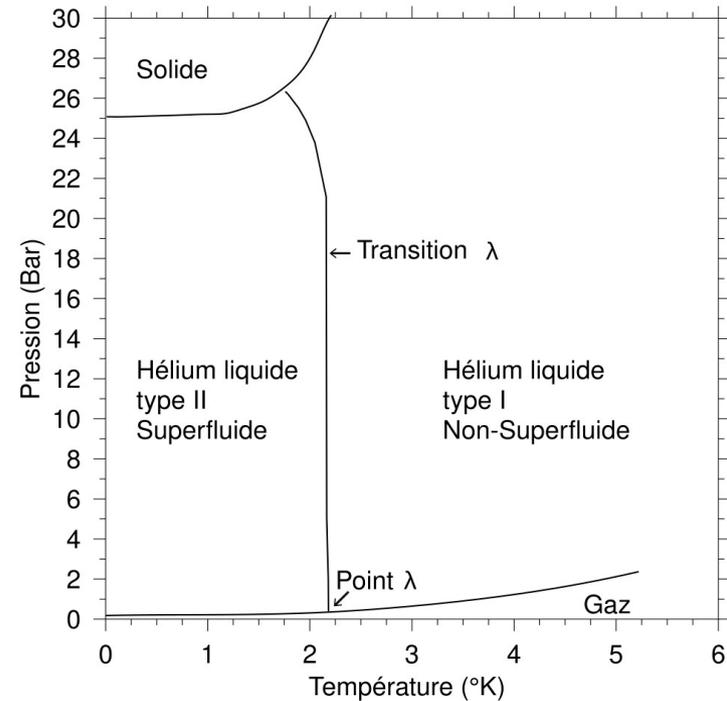
# La capillarité

- = **écoulement d'un liquide** dans des espaces réduits **sans intervention de forces extérieures**, pouvant même **défier la gravité**
  - Ex : éponge, buvard, bougie, sucre, tube capillaire, plantes
- **Compétition** entre les forces internes de cohésion (**tension superficielle**) et les **forces d'adhésion** avec l'extérieur
  - Si adhésion > : le liquide monte (H<sub>2</sub>O)
  - Si cohésion > le liquide descend (Hg)
- Dépend de :
  - Rayon du tube : ↓
  - Tension superficielle : ↓
  - Densité du liquide : ↓
  - Viscosité : ↓



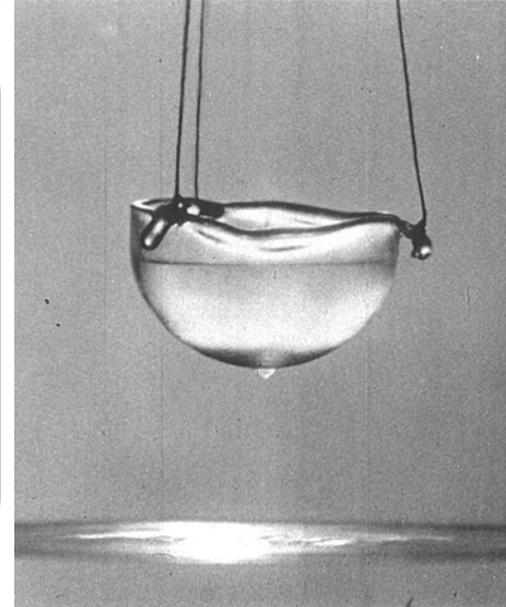
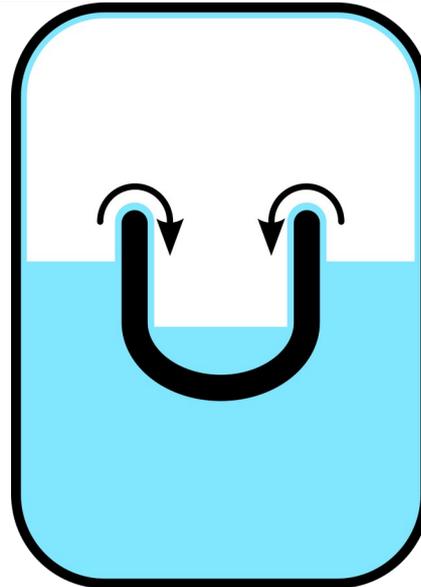
# La superfluidité

- C'est la propriété d'un fluide ayant une **viscosité nulle**
  - Peut s'écouler **sans perte d'énergie cinétique**
  - Un tourbillon a une durée de vie **infinie**
  - Mais ne tourne pas avec la cuiller comme du thé...
- Observée pour l'hélium 4 (1937) : « transition  $\lambda$  » à 2,2 K depuis le liquide de type I (pas superfluide)
- **Plus de forces interatomiques**
  - plus vraiment un fluide mais une collection de particules individuelles



# Propriétés

- Un superfluide peut **traverser les parois** d'une céramique cristalline
- Un superfluide peut **remonter les parois du récipient par capillarité**, formant un « film de Rollin » (de 30 nm d'épaisseur)



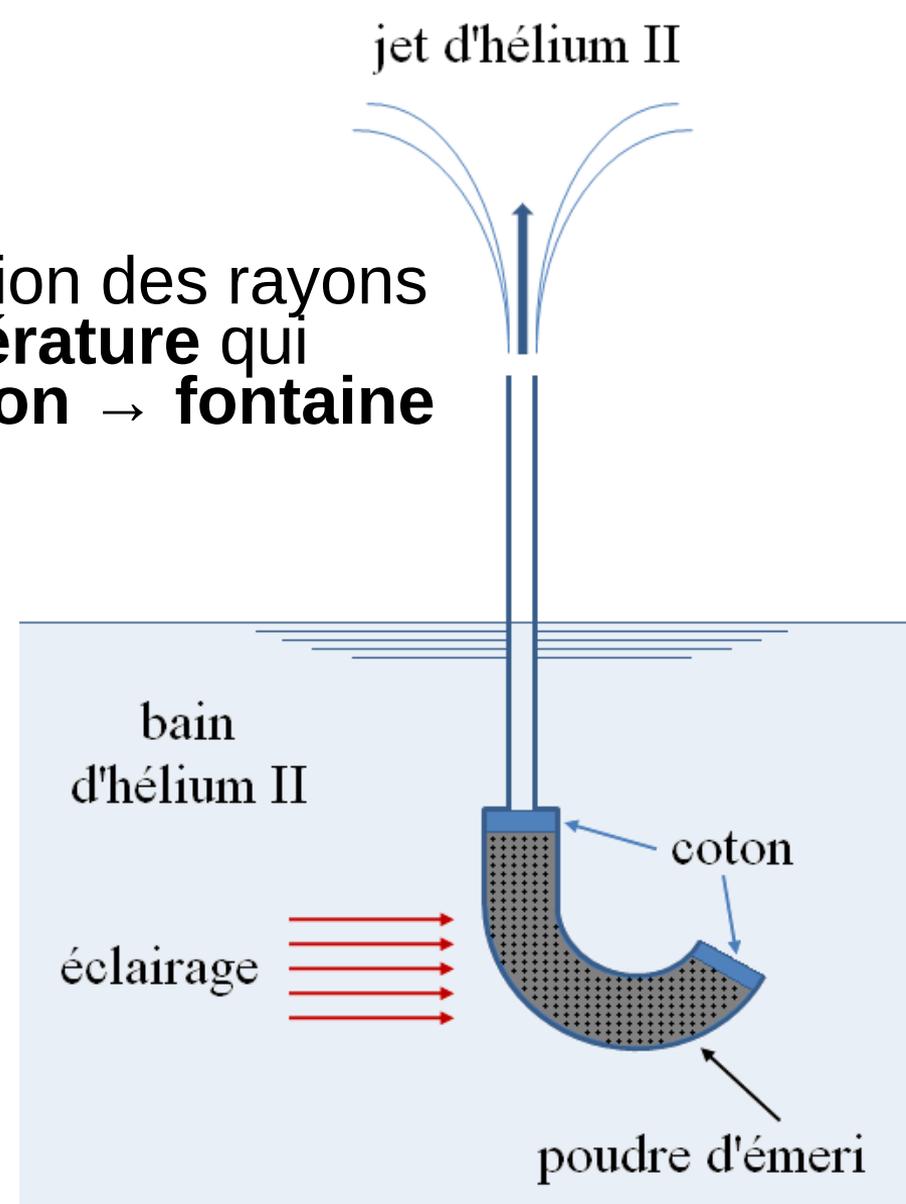
<https://youtu.be/5GeWAH4WVr8>

# L'effet fontaine

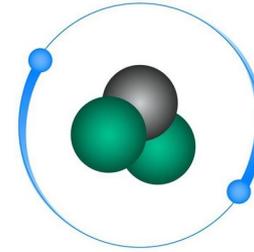
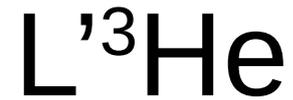
- Lorsque l'on éclaire le filtre, l'absorption des rayons lumineux crée un **gradient de température** qui génère un **phénomène de convection** → **fontaine** (tant que l'éclairage dure)



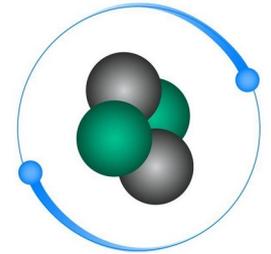
<https://youtu.be/5GeWAH4WVr8>



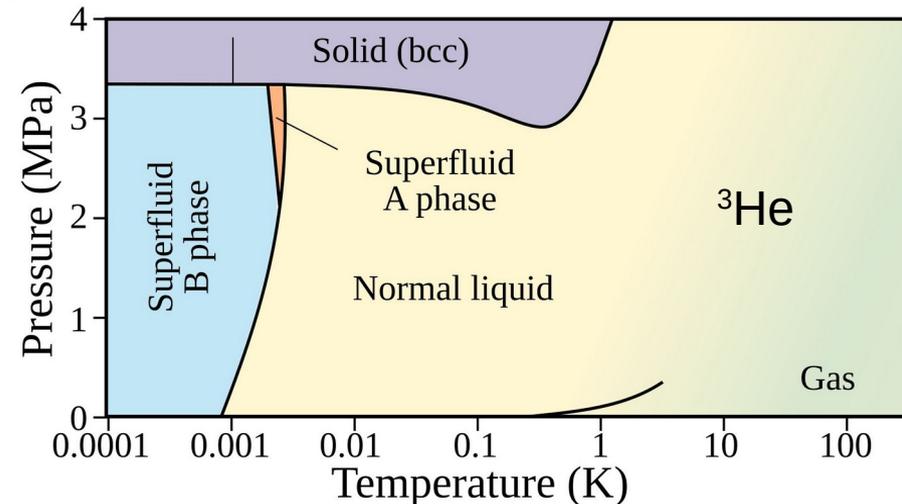
- Isotope de l'hélium 4 : 2 protons et **1 neutron**
- $L^4\text{He}$  est un **boson** mais  $L^3\text{He}$  est un **fermion** (soumis au principe d'exclusion de Pauli : **2 fermions ne peuvent occuper le même état quantique**)
  - → ne devrait pas être superfluide
- Et pourtant, c'est le cas (à une température 1 000 fois plus basse que le  $^4\text{He}$  : 0,002 K) = « **condensat fermionique** »
  - PNP 1996 : découverte, 2003 : théorisation
  - **Les atomes d' $^3\text{He}$  formeraient des paires**
    - bosons, qui peuvent condenser
    - = « transition BCS », cf. supraconductivité
- Piste « miraculeuse » pour la fusion nucléaire contrôlée
  - Mais très peu présent sur Terre
  - Mais présent en grande quantité sur la Lune...



Helium-3  
2 protons, 1 neutron



Helium-4  
2 protons, 2 neutrons



# Superfluide = CBE ?

- Le lien entre condensat de Bose-Einstein et superfluidité n'est pas encore totalement compris :
  - **« Tous les CBE ne sont pas des superfluides et tous les superfluides ne sont pas des CBE »**
- Tous les 2 des phénomènes quantiques collectifs à très basse température

<https://cs.stanford.edu/people/zjl/pdf/superfluidity4.pdf>

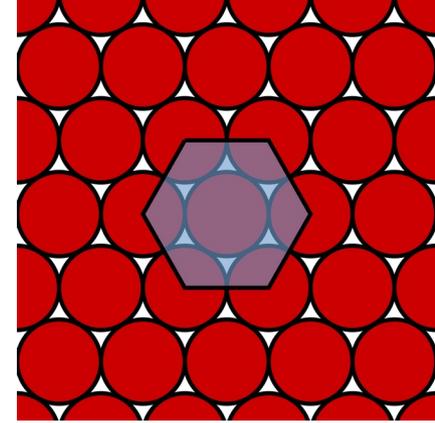
## Bose-Einstein Condensation and Superfluidity

LEV PITAEVSKII  
SANDRO STRINGARI



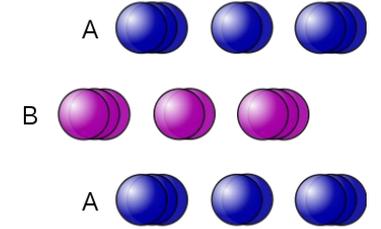
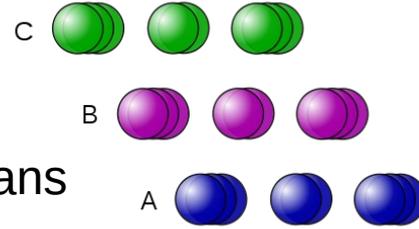
# La supersolidité

# La cristallographie

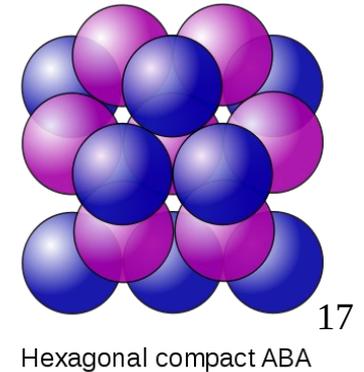
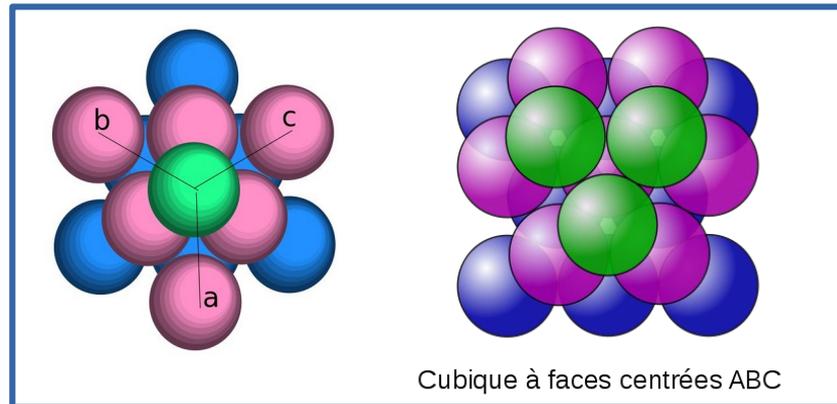
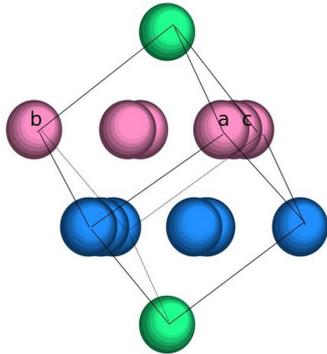
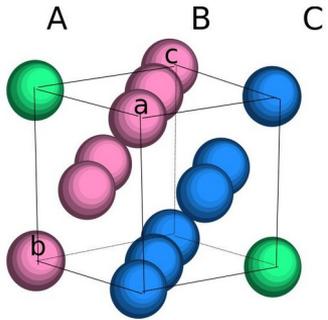


Empilement compact en 2D :  
cercles dans un espace carré  
→ forme hexagonale.

- Étude de l'**empilement atomique** des cristaux
  - Atomes représentés par des sphères
- Cristal « **parfait** » = sans **défauts cristallins**
- 2 empilements « **compacts** »
  - **Cubique à faces centrées & hexagonal compact**
  - De nombreux **autres empilements** (non compacts) existent



- **Maille** = plus petit motif reproductible à l'infini dans un cristal – exemples : CFC, HC



# Caractérisation des cristaux

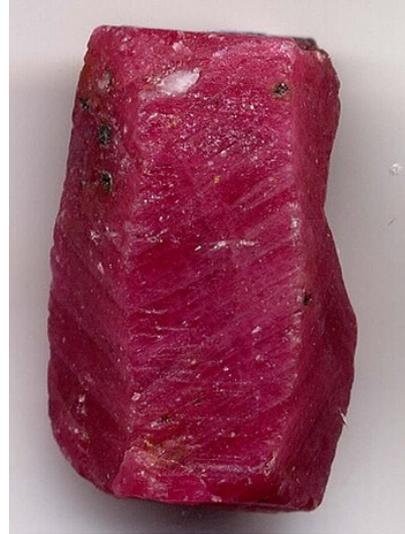
- **7 « systèmes réticulaires »** de base : cubique, hexagonal, rhomboédrique, quadratique (ou tétragonal), orthorhombique, monoclinique et triclinique
- **14 « réseaux de Bravais »**
- **230 « groupes d'espace »** (toutes les combinaisons possibles de réseaux et de symétries)

	Triclinique $a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	Monoclinique $a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ$ et $\gamma \neq 90^\circ$	Hexagonal $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ$ et $\gamma = 120^\circ$	Rhomboédrique $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	Orthorhombique $a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Quadratique $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Cubique $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Primitif P							
Maille centrée I							
Deux faces centrées C							
Faces centrées F							

<https://culturesciences.chimie.ens.fr/thematiques/chimie-des-materiaux/solides-cristallins/un-siecle-de-cristallographie-de-la-maille-0>

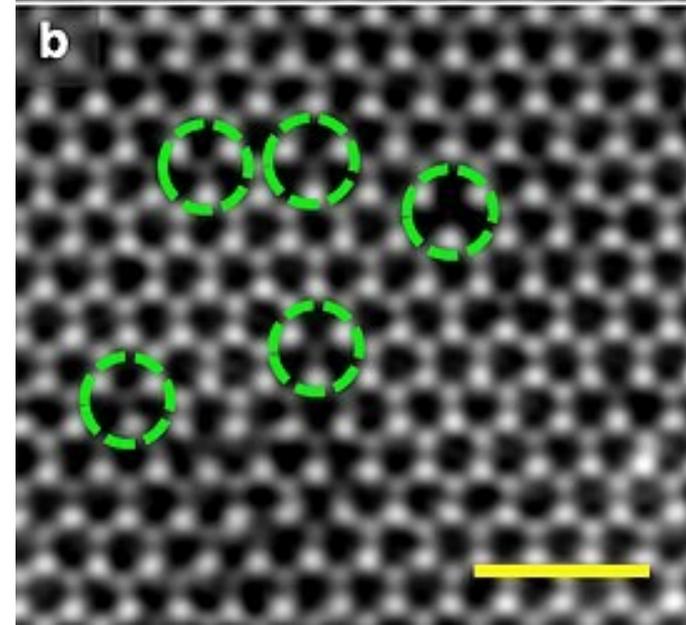
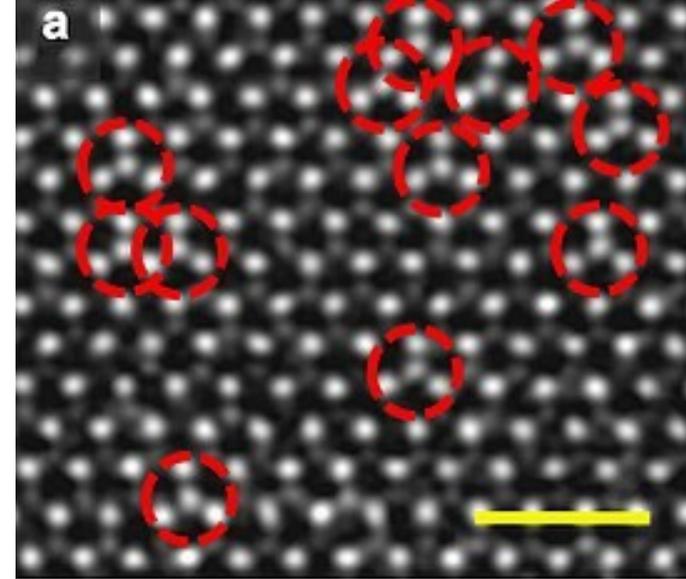
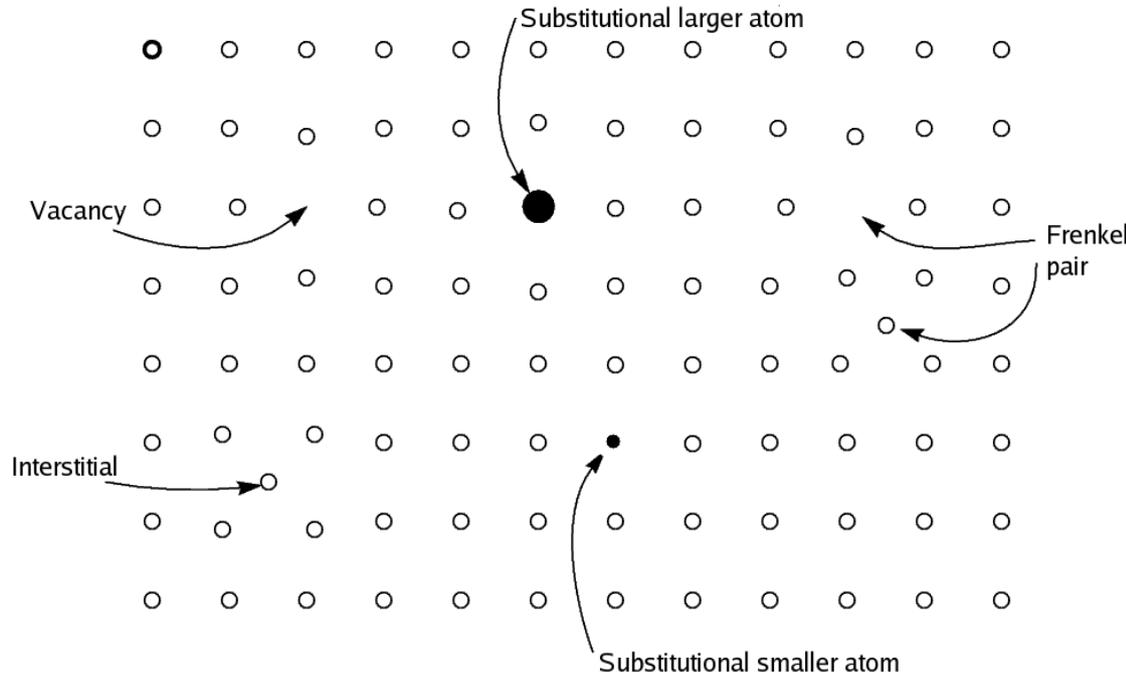
# Les défauts cristallins

- Les cristaux sont **rarement parfaits** (= totalement périodiques = maille répétée indéfiniment)
- Défauts :
  - Ponctuels (0D)
  - Linéaires (1D)
  - Planaires (2D)
  - Volumiques (3D)
- Peuvent être **problématiques** (fragilisation)
- Peuvent être **utiles**
  - Ex : **dopage** du silicium n-p par du phosphore / du bore → **semi-conducteurs**
- Peuvent être **esthétiques**
  - Ex : le corindon (alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), incolore, devient du rubis avec du chrome ou du saphir (autres couleurs avec d'autres « impuretés »)



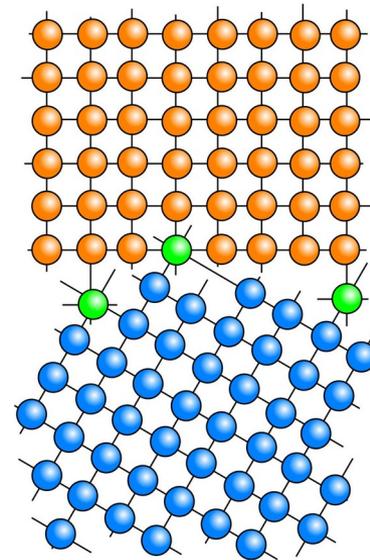
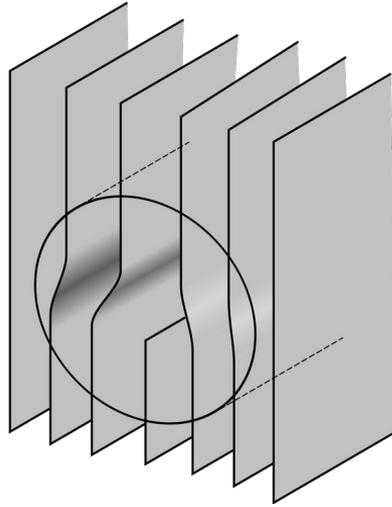
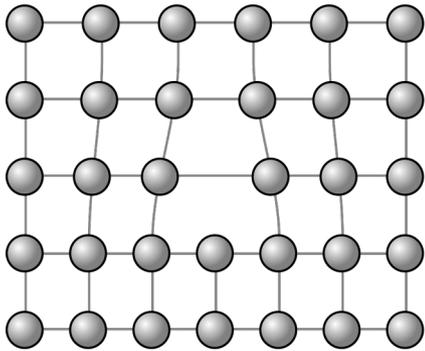
# Défauts ponctuels

- **Lacune** : il manque un atome
- **Interstitial** : il y a un atome en trop
- **Substitution** : un atome est remplacé par un autre
- **Paire de Frenkel** : un atome n'est pas à sa place



# Autres défauts

- **Linéaires** : « **dislocations** »
  - Comme si 1/2 plan atomique était **inséré** dans une structure parfaite
  - Défaut apparaissant lors d'une déformation plastique (irréversible) d'un matériau (ex : métal)



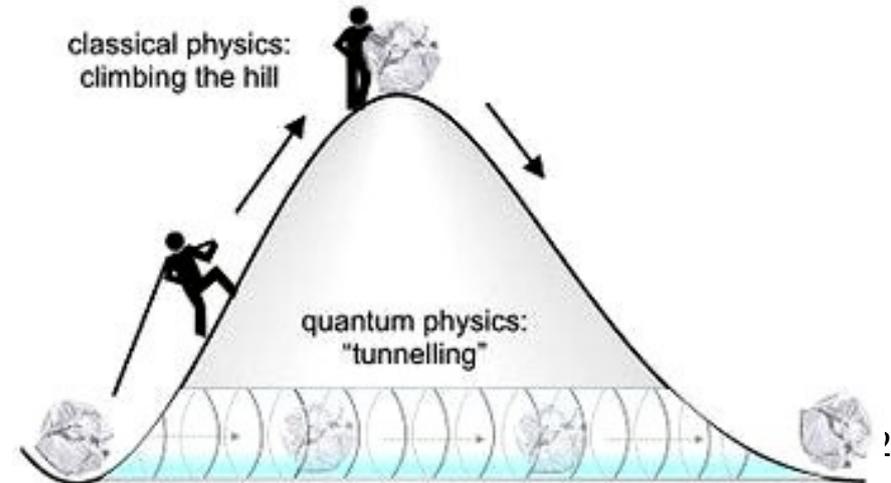
- **Surfaciques** :

- **Joints de grains** (= petits cristaux individuels formant des « polycristaux »)
- **Macles** (regroupements de cristaux identiques mais d'orientation différente)



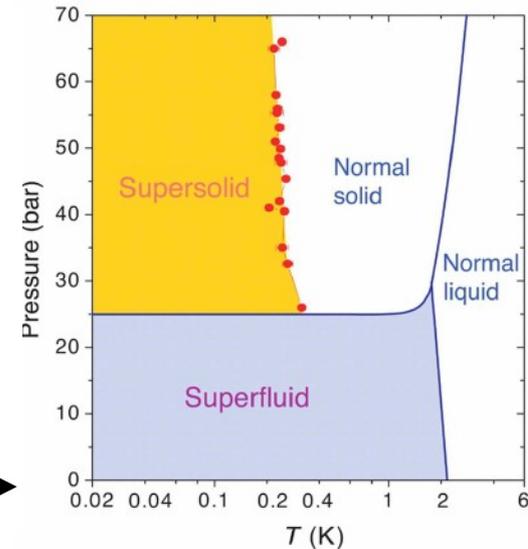
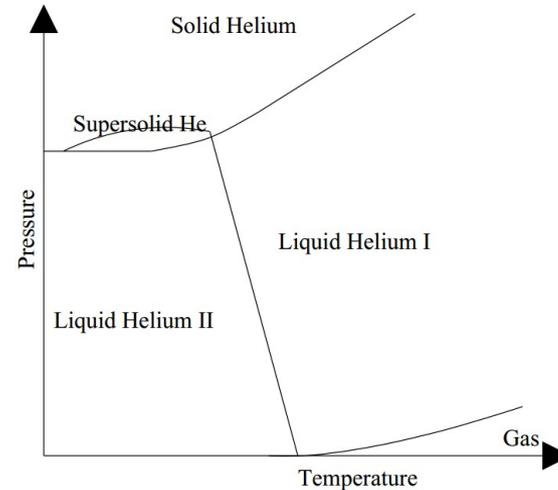
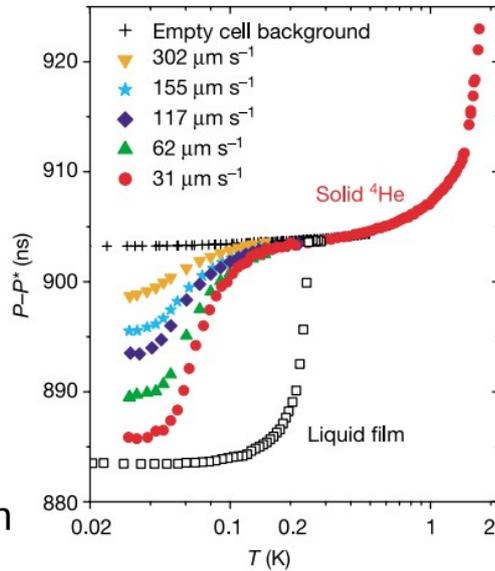
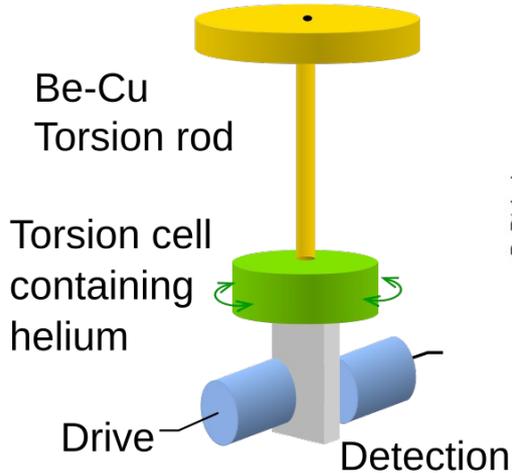
# Les « supersolides »

- Existence longtemps très hypothétique (1969)
- = solides quantiques : solides qui ont également les propriétés d'un fluide (**superfluidité**)
- **Incompatibilité** perçue initialement entre la **position bien définie** des atomes d'un cristal et la nature de la **fonction d'onde quantique** (pas/peu localisée, notamment dans CBE)
- Hypothèse initiale : l'effet tunnel permet aux vacances et aux interstitiels de se délocaliser → à basse température, **ces défauts adopteraient un comportement quantique collectif** (CBE ?) → superfluidité



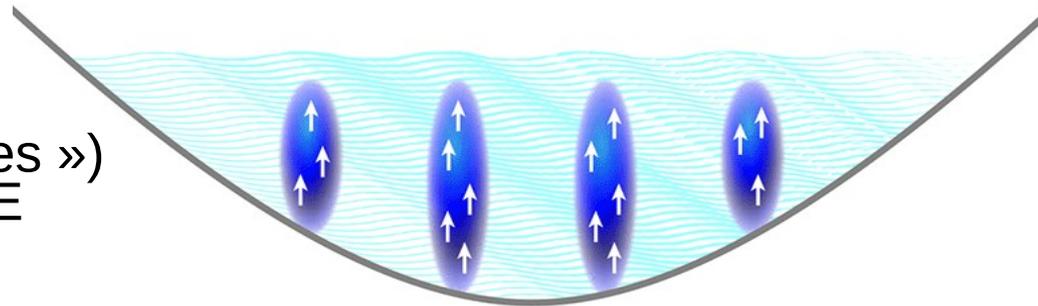
# Découverte (?)

- Première publication : « **Probable** observation of a supersolid helium phase », Nature vol 427, janvier 2004
  - Mesure avec un pendule de torsion : la **période d'oscillation** dépend des **propriétés de l'échantillon** (notamment ici des **frictions internes**)
  - → Baisse du moment cinétique de l' $^4\text{He}$  solide en-dessous de 175 mK, attribuée à l'apparition d'une phase supersolide dans l'hélium



# Mais !!

- Il s'est avéré plus tard que cette variation était due à d'autres propriétés de l'échantillon et que **la supersolidité n'avait pas été découverte...**
  - <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.109.155301>
- Finalement découverte dans un **gaz très dilué** (densité 1 million de fois moindre que l'air) **d'atomes « ultrafroids »** (qq nK)
- Subsistent de faibles interactions **à courte distance** entre les atomes
- Mais cristal = **ordre à grande distance**
- En créant et contrôlant des interactions (dipolaires) à « grande » distance de façon à ce qu'elles soient attractives, on parvient à **moduler la fonction d'onde**  
= « **localiser** » les atomes (« gouttelettes »)  
= créer une structure solide dans un CBE  
= « **supersolide** »
- Pendant ... 150 ms !



# Vortex quantiques

- La présence de **vortex quantifiés** (car régime **quantique**) est la signature de la superfluidité
- Ils ont été générés et détectés dans un gaz quantique d'atomes ultrafroids de dysprosium
  - Rotation provoquée par des champs magnétiques à l'Université d'Innsbruck
- Manipulation **très délicate** en raison de la fragilité de l'état supersolide
- Très récent : 2024 !
  - <https://arxiv.org/pdf/2403.18510>
- **Étoile à neutrons** :
  - **Densité et température extrêmes** → apparition d'un comportement collectif → mécanique quantique
  - **superfluidité des étoiles à neutrons** (avec apparition de vortex dont les modifications entraînent des modifications de la période de rotation) ?

